

Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser



Ausgearbeitet durch
B. Frei, F. Reichmuth, H. Huber
Hochschule für Technik und Architektur (HTA) Luzern

Im Auftrag des
Bundesamtes für Energie
November 2004

Impressum

Auftraggeber:

Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden
des Bundesamtes für Energie

Auftragnehmerin:

Hochschule für Technik und Architektur Luzern, Wissens- und Technologietransfer HLKS, Technikumstrasse 21, 6048 Horw

Autoren:

Beat Frei, Florian Reichmuth und Heinrich Huber
Wissens- und Technologietransfer HLKS
Hochschule für Technik und Architektur (HTA) Luzern
Technikumstrasse 21, 6048 Horw

Titelbild:

Die ausgewählten P+D Erfolgskontrollen in Rapperswil, Unterägeri, Stans, Winterthur, Magnusstrasse Zürich und Sunny Woods Zürich (von oben links im Uhrzeigersinn).

November 2004

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogramms „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt sind alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

EnergieSchweiz

Bundesamt für Energie BFE, Worblentalstrasse 32, CH_3063 Ittigen Postadresse: CH_3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch www.energie-schweiz.ch

Zusammenfassung

In den untersuchten schweizerischen Passivhäusern liegen die Raumlufttemperaturen im Winter deutlich über 20 °C, im Sommer mehrheitlich unter 26 °C und die winterlichen relativen Raumluftfeuchten sind häufig unter 30 % r.F. Mit einer Ausnahme wird die Anforderung des Passivhaus-Standards an den Primärenergieverbrauch (120 kWh/m²_{Nettowohnfläche} a) knapp erreicht oder unterboten. Nicht eingehalten werden kann die Anforderung an den Jahresheizenergieverbrauch (15 kWh/m²_{Nettowohnfläche} a) und dies teilweise deutlich (+150 %). Die energetischen Planungswerte werden teilweise deutlich überschritten (30 bis 300 %). Hierbei ist zu beachten, dass bei der Planung vielfach die Belegung und die Präsenz der Bewohner überschätzt wurden. In der Realität entspricht die Belegung dem schweizerischen Durchschnitt von 2.3 Personen pro Haushalt. Rund 35 % der gesamten Wärmeenergie wird für die Warmwasser-aufbereitung aufgewendet. Die n_{50} -Luftdichtheitswerte bewegen sich in einem Bereich von 0.6 bis 2.5 h⁻¹ und sind teilweise unerwartet hoch (Vorgabe Passivhaus-Institut $n_{50}=0.6$ h⁻¹). Der mittlere spezifische Elektrizitätsverbrauch für den Haushalt von 25.9 kWh/m²_{EBF}·a liegt deutlich über dem Minergie®-P Standard von 17 kWh/m²_{EBF}·a, jedoch unter dem SIA 380/1-Wert von 27.8 kWh/m²_{EBF} a. Der spezifische Elektrizitätsverbrauch für die Lüftung ist höher als in vergleichbaren Minergie®-Bauten, da sich die Komponenten der Luftheizung und der höhere raumspezifische Aussenluftvolumenstrom nachteilig auswirken. Der Ziel- und Grenzwert für den spezifischen Elektrizitätsverbrauch der Luftförderung des SIA - Merkblattes 2023 konnte mit einer Ausnahme nicht erreicht werden. Durch den Einbau von besseren Ventilatormotoren bzw. durch die Reduktion des Aussenluftvolumenstroms liess sich der Elektrizitätsverbrauch für die Luftförderung auf zwei Anlagen um 38 % respektive 22 % senken.

Summary

In the examined swiss passive houses the ambient air temperatures in winter season are markedly higher than 20 °C, in summer season they are mostly under 26 °C and the values for relative humidity in winter season are frequently under 30 % r.h.. With one exception the requirement of the passive house standard to primary energy consumption (120 kWh/m²*year) is reached or undercut scarcely. The requirement to yearly heating energy consumption can not to be kept (15 kWh/m²*year) and this partial clearly (+150 %). About 35 % of the total heat energy is used for domestic heat water. The measured values for energy consumption were mostly higher than predicted (30 to 300 %). The number and presence of occupants was overestimated by planners. The effective number of occupants per household is about the same as the mean value for Switzerland (2.3 persons per household). Air tightness of the envelope is unexpected bad and reaches n_{50} -values from 0.9 to 2.5 h⁻¹. The mean value of the specific household electricity consumption is 25.9 kWh/m²_{EBF}·a, which is markedly higher than the Minergie®-P standard (17 kWh/m²_{EBF}·a) but lower than the SIA 380/1-Value (27.8 kWh/m²_{EBF}·a). The specific electricity consumption for ventilation is higher than the one of comparable Minergie®-buildings because of pressure losses due to air heating components and higher outside air volume flow rates. With one exception the goal- and limit-value for the specific electricity consumption of the air delivery of the SIA - instruction card 2023 could not be achieved. In two cases it was possible to reduce the electricity consumption for ventilation by the installation of better ventilation drives (-38 %) respectively by the reduction of the outside air volume flow rate (-22 %).

Die wichtigsten Erkenntnisse im Überblick

Untersuchte Passivhäuser bei der Primärenergie unter und bei der Heizwärme über den Anforderungen

(Kap. 5.4.3 Heizung und Warmwasser und Kap. 5.4.4 Primärenergie)

Mit einer Ausnahme erreichen oder unterbieten die sechs untersuchten schweizerischen Passivhäuser die Primärenergie-Anforderung des Passivhaus-Standards ($120 \text{ kWh/m}^2_{\text{Netto}}$ a). Hingegen verfehlten alle Passivhäuser die Anforderung an den Jahresheizwärmeverbrauch ($15 \text{ kWh/m}^2_{\text{Netto}}$ a). Die Abweichungen sind teilweise hoch. Der personenbezogene Jahresheizwärmeverbrauch liegt jedoch um den Faktor 2 bis 4 unter den schweizerischen Durchschnitt.

Deutliche Diskrepanz zwischen energetischen Planungs- und Messwerten

(Kap. 5.4.5 Vergleich von energetischen Planungs- und Messwerten)

Die energetischen Planungswerte werden teilweise deutlich überschritten. Überschätzte Belegung und Präsenz, hoher Ausbaustandard für Heimelektronik, Unterschiede im Benutzerverhalten von Mietern und Eigentümern, mangelhafte Luftdichtheit und Raumlufttemperaturen von deutlich über 20°C sind als massgebliche Faktoren zu nennen.

Zeitpunkt der Zertifizierung von Passiv- und Minergie®-P-Häusern ist zu überdenken

(Kap. 5.7 Benutzerbefragung zur Zufriedenheit und Nutzung)

Dass man ein Passiv- oder Minergie®-P-Haus heute vor Baubeginn zertifizieren lassen kann, wird von beteiligten Planern und Architekten in einer Umfrage bemängelt. In der Tat haben die P+D Erfolgskontrollen und die „Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser“ aufgezeigt, dass die Zertifizierung vor Baubeginn keine Garantie dafür ist, dass der Bauherr nachher ein Gebäude hat, das die Zertifizierungskriterien überhaupt noch erfüllt. Zudem ist bei Erfolgskontrollen eine Betrachtung über zwei Jahre angebracht, da in der ersten Heizsaison häufig noch Anpassungen gemacht und Einstellungen vorgenommen werden müssen. Der Qualitätssicherungsprozess mit der Zertifizierung als Bestandteil wird heute zu früh abgeschlossen. Bei der Bausführung und dem späteren Betrieb können noch viele Fehler gemacht werden, die dafür sorgen, dass die untersuchten Passivhäuser diese Bezeichnung (noch) nicht ganz verdienen. Der Entwicklung eines Qualitätssicherungssystems für Passiv- und Minergie®-P Bauten mit dem Endprodukt „Zertifizierung nach Inbetriebnahme“ sollte bei weiteren Aktivitäten im Programm „Rationelle Energie Nutzung in Gebäuden“ Rechnung getragen werden.

Luftheizung in Passivhäusern ist zu überdenken

Die betrachteten Passivhäuser zeichnen sich mehrheitlich durch tiefe Belegung und niedrige Präsenz aus. Mit den eingestellten Luftvolumenströmen resultiert eine niedrige relative Feuchte im Wohnbereich. Eine mögliche Gegenmassnahme sind bedarfsabhängig geregelte Lüftungssysteme. Da die Lüftungssysteme sowohl zur Lufterneuerung als auch zur Luftheizung genutzt werden, kann bei bedarfsabhängigen Luftvolumenströmen die Luftheizung nicht mehr im Komfortbereich betrieben werden. Die Verwendung eines statischen Heizsystems wird somit wiederum aktuell.

Luftbefeuchtung mit Dampf in Passivhäusern aus primärenergetischer Sicht fragwürdig

(Kap. 5.4.5 Thermischer Komfort und Behaglichkeit)

Als Reaktion auf die publizierten tiefen Messwerte von Raumluftfeuchten in Passiv- und Niedrigenergiebauten wird auf dem Markt derzeit die Luftbefeuchtung mit Dampf als Komponente des Lüftungssystems propagiert. Berechnungen auf der Basis von Messwerten aus schweizerischen Passivhäusern haben für unterschiedliche Sollwerte von Raumluftfeuchten aufgezeigt, dass der durch die Dampfluftbefeuchtung verursachte Energieverbrauch über demjenigen für die Heizung liegen würde. Aus primärenergetischer Sicht ist die Dampfluftbefeuchtung überhaupt in Frage zu stellen, da eine weitere Erhöhung des Elektrizitätsverbrauchs in Passivhäusern unbedingt zu vermeiden ist. Alternativen zur Dampfluftbefeuchtung wurden in einer Diplomarbeit an der HTA Luzern untersucht [24]. Hygroskopische Rotationswärmeübertrager übertragen Feuchte, was in der Diplomarbeit experimentell bestätigt werden konnte [24]. Die Problematik der Geruchsübertragung ist aber im Auge zu behalten.

Passivhaus im Umbau hat das grösste Realisierungspotenzial

Das untersuchte Umbauobjekt an der Magnusstrasse in Zürich hat gezeigt, dass auch bei einem Umbau unter erschweren Voraussetzungen (Auflagen des Denkmalschutzes) passivhausnahe Energiekennzahlen erreicht werden können. Da Umbauten in der Schweiz das grösste Potential haben, sind diese bei weiteren P+D Erfolgskontrollen zu bevorzugen. Die Herausforderung, bei bestehender Gebäudehülle und teilweise bestehenden Installationen nachhaltige Sanierungen vorzunehmen, ist gross.

Unterschiede im Benutzerverhalten von Mietern und Eigentümern hat Auswirkungen auf das Passivhaus

Das Benutzerverhalten von Mietern und Eigentümern unterscheidet sich deutlich. So schneidet das Passivhaus Stans mit definierten Eigentumsverhältnissen im Quervergleich überdurchschnittlich gut ab. Die Information und das Bewusstsein der Eigentümer für energetische Belange sind sehr ausgeprägt. Die Eigentümer haben schon bei der Planung mitgearbeitet. In den vermieteten Passhaus-Wohneinheiten lagen die Raumlufttemperaturen zwischen 22 und 24 °C, diese Werte entsprechen dem heute üblichen Werten. Bei der Planung ist daher von Raumlufttemperaturen im Bereich 22 bis 23 °C auszugehen, ansonsten sind die Annahmen zu optimistisch und können in der Realität nicht eingehalten werden.

Elektrizitätsverbrauch Haushalt in Passivhäusern trotz Energieeffizienzklasse A zu hoch

(Kap. 5.4.1 Elektrizität)

Obwohl Haushaltsgeräte der Energieeffizienzklasse A und A+ eingesetzten wurden, lag der spezifische Elektrizitätsverbrauch für den Haushalt noch deutlich über dem Minergie®-P Standardwert von 17 kWh/m²_{EBF}*a. Die Heimelektronik mit hohen Stand-by Verlusten, zusätzliche Lichtinstallationen und in jeder Wohnung vorhandenen PC und Drucker führen dazu, dass der Elektrizitätsverbrauch noch zu hoch ist. Durch die Verwendung neuer Netzteile liessen sich die Bereitschaftsverluste um den Faktor 20 reduzieren [29]. Die Kennzahlen der Elektrizität für Lüftung und Luftförderung sind derzeit noch zu weit von den Richtwerten entfernt. Da der Primärenergieeinsatz bei der Elektrizität hoch bewertet wird, liegt in den erwähnten Punkten ein beträchtliches Verbesserungspotential für die Energiebilanz.

Messpunkte für die Prüfung von Kompaktlüftungsgeräten an schweizerische Verhältnisse anpassen

(Kap. 5.4.5 Thermischer Komfort und Behaglichkeit)

Die P+D Erfolgskontrollen haben gezeigt, dass die Abluftfeuchte häufig Werte von unter 30 % erreicht. Vergleicht man die schweizerischen und die deutschen Daten miteinander, so stellt man fest, dass in Deutschland kaum Werte unter 30 % zu registrieren sind. Beim Betrieb von Abluftwärmepumpen in Passivhäusern wurde festgestellt, dass die niedrigere Abluftfeuchte vermehrte Abtauzyklen verursacht, was in der Folge zu tieferen durchschnittlichen Zulufttemperaturen führt. Die erforderliche Heizleistung wurde nicht mehr erreicht und dies führte zu Reklamationen, da die gewünschten Raumlufttemperaturen nicht eingehalten werden konnten. Daher wird vorgeschlagen, dass bei der Prüfung von Kompaktlüftungsgeräten die Messpunkte an schweizerische Verhältnisse angepasst werden.

Wärmeenergie für die Warmwasseraufbereitung in Passivhäusern

(Kap. 5.4.3 Heizung und Warmwasser)

Das Thema „Wärmeenergie für die Warmwasseraufbereitung in Passivhäusern“ ist noch weiter zu entwickeln. In den Erfolgskontrollen konnte diesem Thema noch nicht die Bedeutung beigemessen werden, die es verdient hat. Daher wurde an der HTA Luzern eine Semesterarbeit zum Thema initialisiert [25]. Gemäss Passivhausphilosophie wird für die Warmwasseraufbereitung etwa gleichviel Energie verwendet wie für die Heizung. In den untersuchten Objekten konnte dieses Verhältnis (noch) nicht verifiziert werden, da meistens deutlich mehr Energie für die Heizung als für die Warmwasseraufbereitung aufgewendet wird. Die Messwerte im Passivhaus Stans zeigen allerdings, dass das Verhältnis bei einem passivhausnahen Betrieb und entsprechendem Benutzerverhalten erreicht werden kann.

Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangslage	9
1.1 Die Vision der 2000 Watt Gesellschaft	9
1.2 Passiv- und Minergie®-P-Häuser als wichtiger Beitrag zur 2000 Watt Gesellschaft	9
2 Ziele und Vorgaben.....	10
3 Ausgewählte P+D Erfolgskontrollen an schweizerischen Passivhäusern.....	11
3.1 Passivhaus im Umbau Magnusstrasse, Zürich	11
3.2 Passivhaus im Wechsel, Stans.....	13
3.3 Passivhaus Obermatt, Rapperswil.....	15
3.4 Passivhaus im Bödli, Unterägeri	17
3.5 Passivhaus Rychenbergstrasse, Winterthur	19
3.6 Passivhaus Sunny Woods, Zürich	21
4 Vorgehen und gewählte Methoden.....	23
4.1 Bewertung der Gebäudehülle mittels Infrarot - Thermographie	23
4.2 Benutzerverhalten	23
4.3 Temperatur und relative Feuchte.....	24
4.4 Nutz-, End- und Primärenergie	25
4.5 Akustik	25
5 Ergebnisse, Erkenntnisse und Erfahrungen.....	26
5.1 Vergleich der Baukonstruktionen.....	26
5.1.1 Luftdichtigkeit der Gebäudehülle	30
5.1.2 Thermographische Aufnahmen.....	31
5.2 Thermischer Komfort und Behaglichkeit.....	41
5.3 Gebäudetechnik	51
5.4 Energieverbrauch	54
5.4.1 Elektrizität.....	54
5.4.2 Elektrizität für die Lüftung und für die Luftförderung	57
5.4.3 Heizung und Warmwasser	61
5.4.4 Primärenergie.....	64
5.4.5 Vergleich von energetischen Planungs- und Messwerten	66
5.5 Akustik	67
5.6 Belegung und Präsenz	82
5.7 Benutzerbefragung zur Zufriedenheit und Nutzung.....	85
6 Schlussbemerkungen	92
7 Anhang 1: Literaturquellen	93
8 Anhang 2: Verzeichnisse	95
8.1 Tabellenverzeichnis.....	95
8.2 Abbildungsverzeichnis	96

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
A_{Brutto}	[m ² _{EBF}]	Energiebezugsfläche nach SIA 380/1
A_{Netto}	[m ²]	Nettowohnfläche \approx Energiebezugsfläche nach PHPP
$E_{\text{Lüftung}}$	[kWh/a]	Jährlicher Energieverbrauch durch die Lüftung
$E_{\text{El Wohnen}}$	[kWh/a]	Jährlicher Energieverbrauch im Wohnbereich
$E_{\text{El Allgemein}}$	[kWh/a]	Jährlicher Energieverbrauch im Allgemeinbereich
$E_{\text{El Haushalt}}$	[kWh/a]	Jährlicher Gesamtenergieverbrauch Wohnen und Allgemein (inkl. Lüftung)
$e_{\text{El Haushalt}}$	[kWh/m ² _{EBF} ·a]	Spezifischer jährlicher Gesamtenergieverbrauch
$e_{\text{Lüftung}}$	[kWh/m ² _{EBF} ·a]	Spezifischer jährlicher Energieverbrauch für die Lüftung
e_p nach PHPP	[kWh/m ² ·a]	Spezifischer jährlicher Primärenergieverbrauch (KEA nach Gemis)
e_p nach Min. P	[kWh/m ² _{EBF} ·a]	Spezifischer jährlicher Primärenergieverbrauch (KEA nach Minergie®-P)
$P_{\text{Lüftung}}$	[W]	Leistungsaufnahme des Lüftungsgeräts
P_p nach PHPP	[W/Person]	Personenbezogener Leistungsverbrauch Primär (gewichtet nach GEMIS)
P_p nach Min. P	[W/Person]	Personenbezogener Leistungsverbrauch Primär (gewichtet nach Minergie®-P)
$P_{\text{El Haushalt}}$	[W/Person]	Personenbezogener Gesamtleistungsverbrauch
$P_{\text{P Lüftung}}$	[W/Person]	Personenbezogener Leistungsverbrauch für die Luftförderung
$P_{\text{P h+ww}}$	[W/Person]	Personenbezogener Leistungsverbrauch für Heizung und BWW
$p_{\text{Lüftung}}$	[Wh/m ³]	Spezifischer Energieverbrauch für die Luftförderung
q_h	[kWh/m ² _{EBF} ·a]	Spezifischer jährlicher Heizwärmeverbrauch
$q_{h P}$	[kWh/m ² _{EBF} ·a·Person]	Spezifischer Heizenergieverbrauch pro Person und Jahr
q_v Mittel	[m ³ /h]	Mittlerer geförderter Volumenstrom
q_{ww}	[kWh/m ² _{EBF} ·a]	Spez. jährlicher Wärmeverbrauch für Brauchwarmwasser Aufbereitung

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BWW	Brauchwarmwasser
EBF	Energiebezugsfläche [m ²]
KEA	Kumulierter Energie Aufwand (Faktor zur Berechnung der Primärenergie)
LW WP	Luft / Wasser Wärmepumpe
PHI	Passivhausinstitut Darmstadt (www.passiv.de)
PHPP	Passivhaus Projektierungspaket
PWT	Plattenwärmeübertrager
RWT	Rotationswärmeübertrager

1 Ausgangslage

1.1 Die Vision der 2000 Watt Gesellschaft

Im Durchschnitt beträgt der globale kommerzielle Energieleistungsbedarf pro Kopf heute 2000 Watt, wobei er weltweit zwischen weniger als 500 Watt (Äthiopien und andere Länder in der dritten Welt) und über 10'000 Watt (USA) variiert. Damit das Postulat der Nachhaltigkeit erfüllt wird, dürfen jedoch bei einer erwarteten Weltbevölkerung von 10 Milliarden Menschen im Jahre 2050 die CO₂-Emissionen 1 Tonne pro Kopf und Jahr nicht überschreiten. In der Schweiz liegt der Primärenergieleistungsbedarf heute pro Person etwa bei 6300 Watt. Hiervon entfällt über ein Viertel auf das Heizen und Wohnen [11].

Das Projekt der „2000-Watt-Gesellschaft“ [17] strebt die schrittweise Realisierung einer Lebens- und Wirtschaftsform an, die mit einem Drittel des heutigen Energieverbrauchs auskommt und gleichzeitig die Lebensqualität verbessert. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass eine Gesellschaft mit einem durchschnittlichen Energieleistungsbedarf pro Kopf von 2000 Watt technisch ohne Verzicht auf die zentralen Elemente unseres heutigen westlichen Lebensstils zu realisieren wäre. 2000 Watt entsprechen ungefähr dem Schweizer Pro-Kopf-Energieleistungsbedarf im Jahre 1960. Die Einführung einer 2000 Watt-Gesellschaft bedeutet nicht, den Lebensstandard und den Komfort auf die Verhältnisse von 1960 zu reduzieren, sondern, auf der Basis des heutigen Lebensstils mit innovativen technischen Lösungen und Konzepten die Effizienz des Energieeinsatzes zu verbessern und gleichzeitig den Energieverbrauch zu senken. 2000 Watt entsprechen einem Verbrauch von rund 1'700 Liter Heizöl und Benzin pro Jahr.

1.2 Passiv- und Minergie®-P-Häuser als wichtiger Beitrag zur 2000 Watt Gesellschaft

Wie bereits erwähnt, entfällt ein grosser Teil des Energieleistungsbedarfs auf das Heizen und Wohnen. Der momentane Anteil der Heiz- und Wohnenergie an gesamten Endenergieverbrauch beträgt fast 40 % [11]. In diesem Bereich lassen sich demnach grosse Einsparpotenziale ausschöpfen. Bei einem Passivhaus oder einem Minergie®-P Haus reduziert sich die aufzubringende Energie für die Heizung auf ein Minimum – und dies nicht nur bei Neubauten. Auch Altbauten lassen sich mit Fokus auf den Passivhausstandard sanieren. Da die Gebäudeinfrastruktur in der Schweiz mehrheitlich bestehend ist und im Lauf der nächsten Jahre grosser Sanierungsbedarf besteht, kommt dem vorhandenen Energieeinsparpotential sehr grosse Bedeutung zu.

Das Bundesamt für Energie und das Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprogramm „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ haben diese Entwicklungen erkannt und fördern Pilot- und Demonstrationsanlagen und dazugehörige Erfolgskontrollen.

Die HTA Luzern hat an vier Passivhäusern Erfolgskontrollen im Auftrag des BFE durchgeführt. Drei Neubauten und ein Umbau wurden über eine Dauer von zwei Jahren untersucht. Beim Passivhaus im Umbau hat die Erfolgskontrolle gezeigt, dass der Energieverbrauch durch eine Gebäudesanierung auf weniger als die Hälfte des schweizerischen Durchschnitts reduziert werden kann. Im Vergleich zum Zeitpunkt vor der Sanierung liess sich die Betriebsenergie gar um den Faktor 9 reduzieren.

Dem Projekt „Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser“ dienten sechs Erfolgskontrollen als Datengrundlage. Der Einfachheit halber werden alle Objekte als Passivhäuser bezeichnet, obwohl nicht in allen Fällen das Passivhaus gemäss Vorgaben des Passivhausinstitutes Darmstadt als Vorgabe gedient hat. Ziel aller realisierten Bauten war es aber, einen möglichst kleinen Energiebedarf zu realisieren. Die ausgewählten P+D Erfolgskontrollen an schweizerischen Passivhäusern werden nachfolgend kurz beschrieben

2 Ziele und Vorgaben

Die „Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser“ soll alle an einem Neu- oder Umbau nach Passiv- oder Minergie®-P® Standard interessierten Parteien ansprechen. Gebäudetechnik - Planer- und Ingenieure sowie Architekten sind die primäre Zielgruppe. Investoren, Bauherren und Weitere sollen einen Überblick darüber erhalten, welches Verhalten ausgeführte schweizerische Passivhäuser zeigen.

Das Projekt soll die Auswertung und Umsetzung der Erfahrungen aus den Erfolgskontrollen ermöglichen. Es hat sich deutlich gezeigt, dass auch gute Konzepte am Benutzerverhalten scheitern. Daher sollen die Erkenntnisse und Erfahrungen der Öffentlichkeit in Form von Status-Seminarbeiträgen und Publikationen zugänglich gemacht werden.

In der vergleichenden Auswertung schweizerischer Passivhäuser interessieren aber nicht nur die Energiekennzahlen. Der thermische Komfort, die Akustik, das Benutzerverhalten und die Zufriedenheit der Nutzer sollen aufgezeigt werden.

3 Ausgewählte P+D Erfolgskontrollen an schweizerischen Passivhäusern

3.1 Passivhaus im Umbau Magnusstrasse, Zürich



Abbildung 3-1 : Der Passivhausumbau an der Magnusstrasse in Zürich nach der Sanierung [15].

- Bauherrschaft: EcoRenova, Unternehmen für Investitionen in nachhaltiges Bauen, Zürich
- Architekt: Viridén und Partner, Zweierstrasse 35, 8004 Zürich

Das 107-jährige Mehrfamilienhaus an der Magnusstrasse 23 im Kreis 4 in Zürich war in einem sehr schlechten Zustand. Baufälliger Dachstock, veraltete Haustechnikinstallationen, Heizung mittels Einzelölp- und Elektroöfen und einfach verglaste Fenster waren die Kennzeichen. Es wurde deshalb entschieden, das Haus einer Gesamtsanierung zu unterziehen.

Das fünfgeschossige Gebäude beinhaltet nach dem Umbau vier Wohnungen. Ganz im Sinne der Bauökologie sollte soviel Bausubstanz wie möglich erhalten bleiben. Die Unweltbelastung durch nicht erneuerbare Energie sollte im Vergleich zum ursprünglichen Zustand um den Faktor 10 reduziert werden. Die gesamte Sanierung ist in einer kurzen Bauzeit von 8 bis 10 Wochen realisiert worden.

Die benötigte Energie für Heizung und Warmwasser wird in einem Speicher (2'600 l) mit integriertem Boiler von der Sonnenkollektorenanlage (15.5 m² Fläche) und einer Luft/Wasser - Wärmepumpe bereitgestellt. Die Belüftung findet durch dezentrale Wohnungslüftungsgeräte mit integrierter Wärmerückgewinnung statt.

Konstruktions- und Gebäudekenndaten

Konstruktion

Baujahr / Umbaujahr	1894 / 2001
Bauweise	Steinbau mit Holzdach
Gebäudeart	Umbau MFH
Anzahl Wohnungen	4
Belegung Total [Pers.]	6
Höhenlage [m.ü.M]	520
Energiebezugsfläche [m ²]	475
Nettowohnfläche [m ²]	382

Gebäudetechnik

Lüftungsanlage	Einzelwohnungsanlage
Wärmeerzeugung	Luft/Wasser Wärmepumpe
Zusatzeheizung	Holzofen

Energetische Kennzahlen aus Erfolgskontrolle

Spez. Heizwärme [kWh/m ² EBF'a]	24.6
Primärenergie Min. P [kWh/m ² EBF'a]	66.5

Tabelle 3-1 : Konstruktions- und Gebäudekenndaten Passivhaus im Umbau Magnusstrasse, Zürich [Objektübersicht.xls].

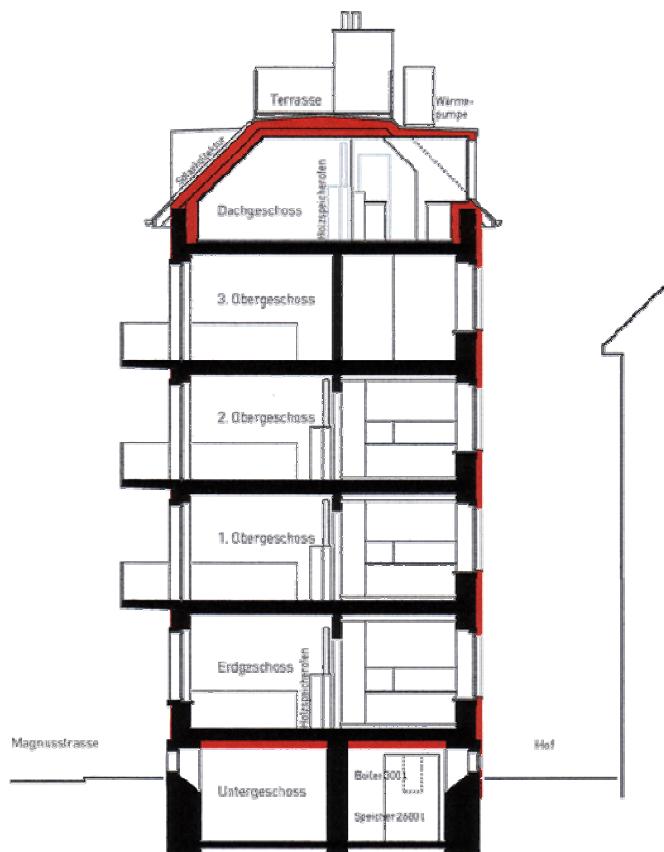


Abbildung 3-2 : Querschnitt durch den Passivhausumbau Magnusstrasse, rot die neu erstellten Gebäudeteile [15].

3.2 Passivhaus im Wechsel, Stans



Abbildung 3-3 : Das Passivhaus im Wechsel, Stans in der Westansicht [9].

- Bauherrschaft: Einfache Gesellschaft „Wohnen im Wechsel“
- Architekt: BARBOS AG, Generalunternehmen für Baubiologie und Bauökologie, Stans

Das Passivhaus im Wechsel Stans, wurde 2000/2001 im Auftrag eines Konsortiums von 6 Familien in Stans gebaut. Anforderungen an das Haus waren nebst tiefem Energieverbrauch auch eine verdichtete Bauweise in einem familienfreundlichen Umfeld. Kennzeichnend für das Passivhaus Stans ist der Wunsch aller am Bau beteiligten Parteien, ein ökologisch vorbildliches Haus zu errichten welches in welchem zukunftsweisende Technologien und erneuerbare Energien sinnvoll eingesetzt werden.

Das viergeschossige Holzhaus beinhaltet acht Wohnungen davon 2 Maisonette- und 2 Geschosswohnungen. Die Wohnungsgröße liegt zwischen 3½ und 6½ Zimmern. Alle Wohnungen sind konsequent nach Süden orientiert. Im Kellergeschoss sind Wasch- und Trocknungsräume sowie der Technikraum untergebracht. Der Liftturm befindet sich vom gedämmten Wohnbereich statisch und thermisch getrennt auf der Nordseite.

Die Erzeugung der Nutzwärme bewerkstellt im Passivhaus Stans ein Pelletkessel und auf dem Dach montierte Sonnenkollektoren. Die Wärmeverteilung erfolgt über ein zentrales Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung (doppelter Plattenwärmeübertrager). Ein Erdregister mit vier parallelen Rohren ist dem Lüftungsgerät vorgeschaltet und verhindert Frost am Außenlufteneintritt nach dem Erdregister. Im Sommer lässt sich die Wärmerückgewinnung mit einem Bypass umgehen. Zudem wird die Lüftungsanlage vom Mai bis September nur nach Bedarf per Handschalter eingeschaltet.

Konstruktions- und Gebäudekenndaten

Konstruktion

Baujahr	2000
Bauweise	Holzelement
Gebäudeart	MFH
Anzahl Wohnungen	8
Belegung Total [Pers.]	30
Höhenlage [m.ü.M]	447
Energiebezugsfläche [m ²]	1250
Nettowohnfläche [m ²]	998

Gebäudetechnik

Lüftungsanlage	Mehrwohnungsanlage
Wärmeerzeugung	Holzpelletskessel
Zusatzzheizung	keine

Energetische Kennzahlen aus Erfolgskontrolle

Spez. Heizwärme [kWh/m ² EBF'a]	15.0
Primärenergie Min. P [kWh/m ² EBF'a]	55.0

Tabelle 3-2 : Konstruktions- und Gebäudekenndaten im Passivhaus Stans [Objektübersicht.xls].

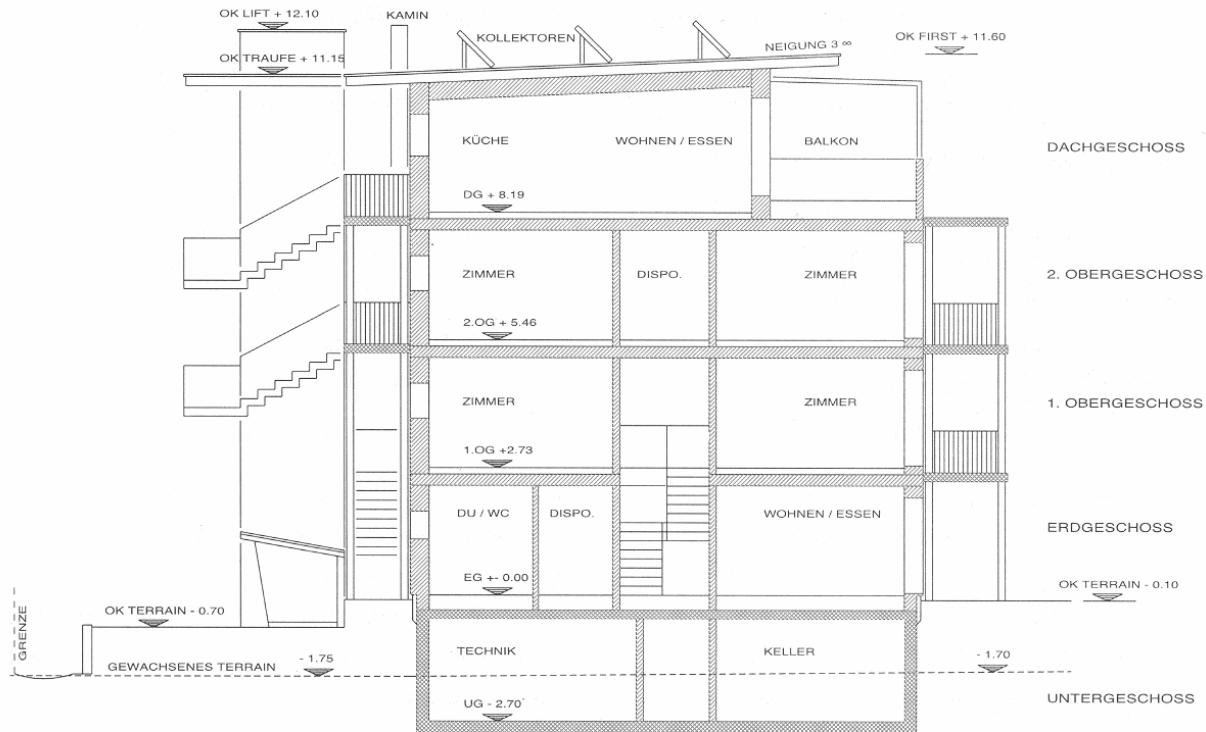


Abbildung 3-4 : Querschnitt durch das Passivhaus im Wechsel, Stans: links der Liftturm - rechts der gedämmte Wohnungsteil.

3.3 Passivhaus Obermatt, Rapperswil



Abbildung 3-5 : Das Passivhaus Obermatt in Rapperswil in der Nord-West Ansicht [9].

- Bauherrschaft: Rainer Kaufmann, Obermatt 33, 5102 Rapperswil
- Architekt: Architekturbüro Setz, Obermatt 33, 5102 Rapperswil

In Rapperswil steht das erste mehrgeschossige Passivhaus der Schweiz mit gemischter Nutzung. Es ist nach Minergie® zertifiziert worden. Das Gebäude beinhaltet vier Wohnungen und zwei Büros und steht an einer stark lärm- und luftschadstoffbelasteten Lage auf einem über lange Zeit scheinbar unverkäuflichen Grundstück nahe der Autobahn. Damit die Lärmbelastung der Bewohner minimiert werden konnte, ist das Gebäude - ungewöhnlich für ein Passivhaus- nordorientiert und mit kleinem Südfensteranteil gebaut worden. Das Gebäude wurde 2001 mit dem Schweizer Solarpreis ausgezeichnet.

Das Gebäude in Mischbauweise besteht aus einem Stahlbetonskelett mit wärmegedämmten Aussenwand-Elementen in Holzrahmenbauweise. Die Luft- und Wärmeverteilung ist in den massiven Betondecken eingelegt. Das Treppenhaus ist aus Kostengründen offen und unbeheizt ausgeführt worden. Der dadurch bedingte Energiemehrbedarf beträgt laut Planung nur 1.3 %.

Die zentrale, drehzahlgeregelte Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung steht im Untergeschoss und stellt die notwendige Frischluft zur Verfügung. Die Wärmerückgewinnung wird mit einem Rotationswärmeübertrager realisiert. Die Aussenluft wird durch ein Lufterdregister geführt. Die Luftvolumenströme sind für jede Wohnung und jedes Büro fest eingestellt und über einen Konstantvolumenstromregler geregelt. Bei jedem Bezüger wird die Zuluft im Winter nachgewärmt. Eine Brennwert - Gastherme mit 21 kW Leistung produziert die gesamte Wärme für Heizung und Warmwasser. Die Wohn- und Büroräume werden ausschliesslich über Zuluft beheizt. Die Bäder und Büro – WC sind mit Heizkörpern ausgestattet.

Konstruktions- und Gebäudekenndaten

Konstruktion

Baujahr	2000/2001
Bauweise	Mischbauweise
Gebäudeart	Wohn- und Gewerbehaus
Anzahl Wohnungen (Büros)	4(2)
Belegung Whg. (Büros) [Pers.]	8 (12)
Höhenlage [m.ü.M]	500
Energiebezugsfläche [m ²]	1068
Nettowohnfläche [m ²]	904

Gebäudetechnik

Lüftungsanlage	Mehrwohnungsanlage
Wärmeerzeugung	Brennwert - Gasterme
Zusatzeheizung	keine

Energetische Kennzahlen aus Erfolgskontrolle

Spez. Heizwärme [kWh/m ² _{EBF} a]	31.9
Primärenergie Min. P [kWh/m ² _{EBF} a]	105.2

Tabelle 3-3 : Konstruktions- und Gebäudekenndaten im Passivhaus Obermatt in Rapperswil [Objektübersicht.xls].

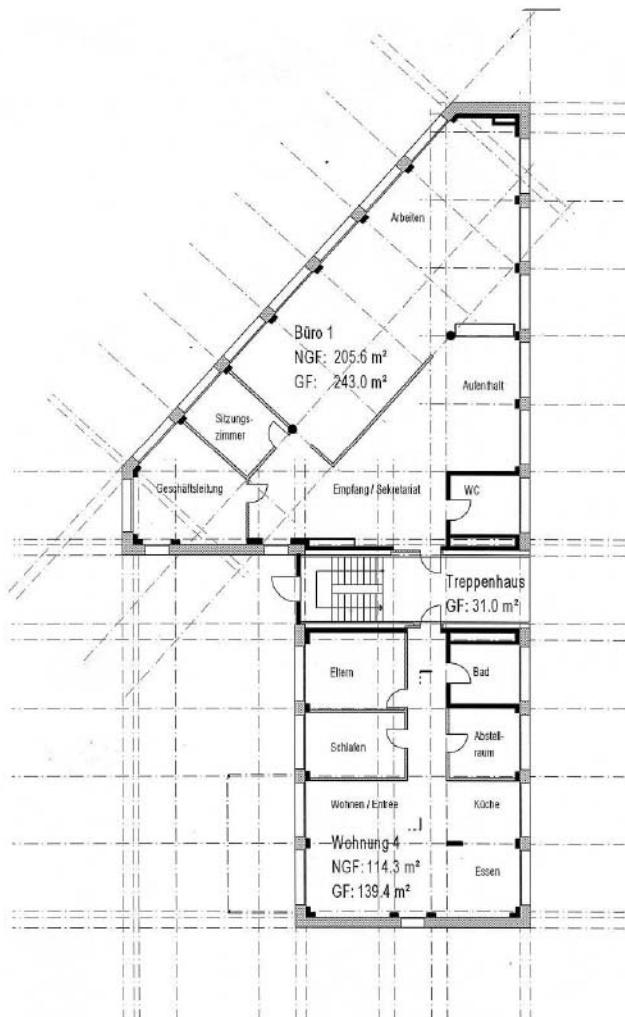


Abbildung 3-6 : Grundriss des Passivhaus Rapperswil mit unbeheiztem Treppenhaus in der Mitte [16]

3.4 Passivhaus im Bödli, Unterägeri



Abbildung 3-7 : Das Passivhaus im Bödli, Unterägeri in der Ostansicht [14].

- Bauherrschaft: Armin Stämpfli, Krummfeld 12, 6423 Seewen
- Architekt: Christoph Breu, Perfidenstrasse 17, 6432 Rickenbach

Beim Passivhaus Unterägeri handelt es sich um ein Mehrfamilienhaus in Massivbauweise. Das viergeschossige Gebäude umfasst fünf Mietwohnungen, wovon zwei 3½-Zimmerwohnungen und drei 5½-Zimmerwohnungen sind. Die Wohnungen werden durch ein Treppenhaus mit integriertem Lift erschlossen.

Als Besonderheit befinden sich sowohl Treppenhaus als auch Lift innerhalb des Wärmedämmperimeters. Im Erdgeschoss befinden sich fünf eingeschobene Garagen. Ein allseitig zurückversetztes Attikageschoss bildet nach oben den Abschluss. Das Attikageschoss musste aufgrund des Baugesetzes zurückversetzt gebaut werden. Dadurch ergaben sich Probleme bei der Wärmedämmung der Dachterrasse, welche schlussendlich mit Vakuumisolierplatten gedämmt worden ist.

Im Passivhaus Unterägeri erfolgt die Wärmeerzeugung mit einem kleinen Blockheizkraftwerk (BHKW) das mit Flüssiggas betrieben wird. Die Außenluft wird über ein Luftherdregister vorgewärmt und den dezentralen Wohnungslüftungsgeräten zugeführt. Das Warmwasser wird aus einem im Speicher integrierten Warmwassererwärmer bezogen. Der Speicher wird einerseits durch die Solaranlage und andererseits durch das Klein - BHKW geladen. Die Wärmeverteilung in den Wohnungen ist mit dezentralen Lüftungsgeräten und Luftherzern realisiert worden. In den Bädern befinden sich Heizkörper. Zusätzlich wurde jede Wohnung mit einem Holzofen ausgestattet.

Konstruktions- und Gebäudekenndaten

Konstruktion

Baujahr	2001/2002
Bauweise	Massiv
Gebäudeart	MFH
Anzahl Wohnungen	5
Belegung Total [Pers.]	12
Höhenlage [m.ü.M]	739
Energiebezugsfläche [m ²]	696
Nettowohnfläche [m ²]	647

Gebäudetechnik

Lüftungsanlage	Einzelwohnungsanlage
Wärmeerzeugung	BHKW - Flüssiggas
Zusatzeheizung	Holzofen

Energetische Kennzahlen aus Erfolgskontrolle

Spez. Heizwärme [kWh/m ² EBF'a]	20.1
Primärenergie Min. P [kWh/m ² EBF'a]	84.5

Tabelle 3-4 : Konstruktions- und Gebäudekenndaten des Passivhauses im Bödli, Unterägeri [Objektübersicht.xls].

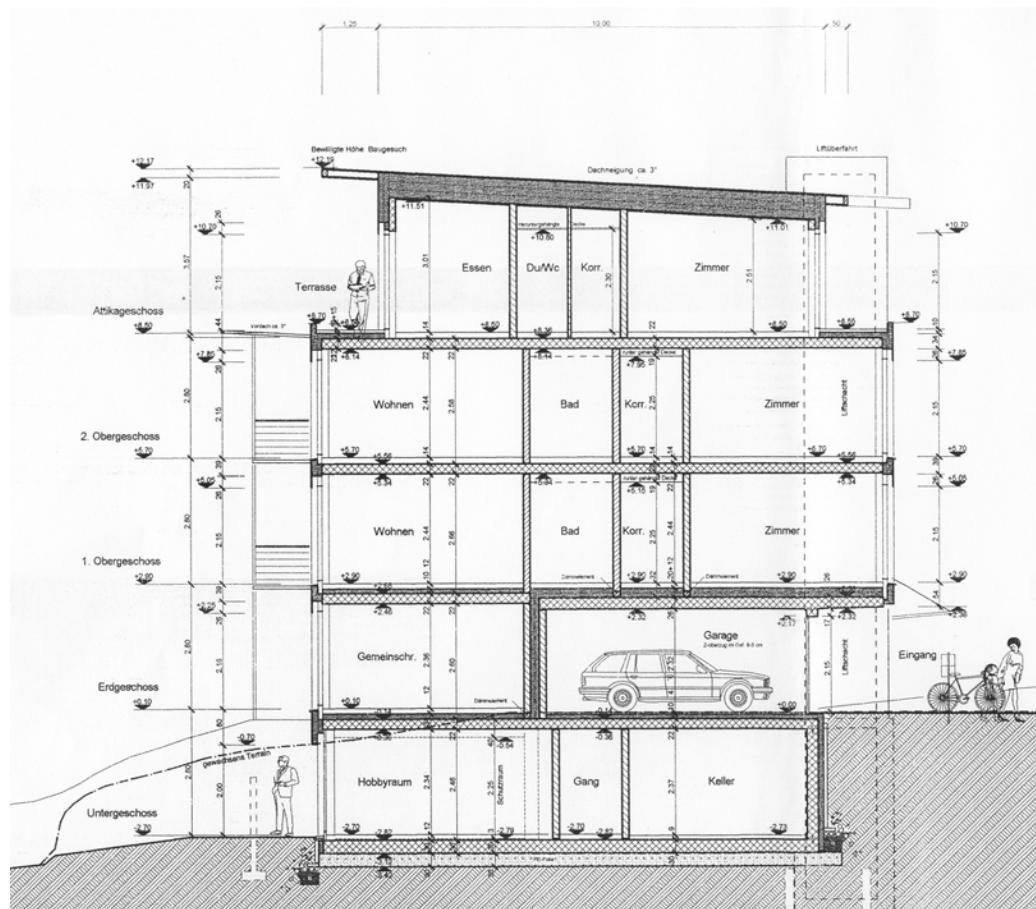


Abbildung 3-8 : Querschnitt durch das Passivhaus Unterägeri, rechts sind die eingeschobenen Garagen im EG ersichtlich.

3.5 Passivhaus Rychenbergstrasse, Winterthur



Abbildung 3-9 : Das Passivhaus an der Rychenbergstrasse in Winterthur [8].

- Bauherrschaft: Rita Hunziker Rüegger, 8173 Neerach
- Architekt: Bänninger + Partner, Hans Bänninger, 8400 Winterthur

Das seit Frühjahr 2000 bewohnte Passivhaus an der Rychenbergstrasse 298 in Winterthur ist nach den Richtlinien des Passivhausstandards gebaut worden und nach Minergie® zertifiziert. Das durch die Bauweise erzielte hohe Niveau beim Schall- und Wärmeschutz sowie die attraktive, stadtnahe Lage machten die Wohnungen für Käufer sehr begehrte.

Es beinhaltet sechs grosse Wohnungen, wovon zwei Attikawohnungen sind. Das Gebäude aus vorfabrizierten Holzelementen steht auf einer massiven Tragkonstruktion aus Betonböden und Dach sowie Kalksandsteinwänden. Das unbeheizte Treppenhaus vermeidet eine Wärmebrücke ins Untergeschoss und stellt eine Alternative zu einem Aussenabgang dar. Die grossen Terrassen wurden stirmseitig freitragend vor die wärmegedämmte Gebäudehülle platziert, wo sie die Sonneneinstrahlung auf die Südseite nicht beeinträchtigen und gleichzeitig tief genug sind, um dort als Beschattungsvorrichtung zu dienen.

Die Nutzwärme wird mit einem 24 kW Pelletheizkessel erzeugt. Die Wärmeverteilung erfolgt über ein zentrales Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung und vorgesetztem Erdregister zur Aussenluftvorwärmung. Die konvektive Fassade besteht aus 59 m² Fassadenkollektoren, welche auf die vorfabrizierten Holzelemente montiert wurden. Die Kollektorluft wird zuerst genutzt um das Warmwasser vorzuwärmen. Danach wird der Boden der untersten Wohnungen durchströmt (Hypokauste). Abschliessend wird die Luft dem zentralen Lüftungsgerät zugeführt.

Konstruktions- und Gebäudekenndaten

Konstruktion

Baujahr	1999
Bauweise	Holzelement
Gebäudeart	MFH
Anzahl Wohnungen	6
Belegung Total [Pers.]	10
Höhenlage [m.ü.M]	484
Energiebezugsfläche [m ²]	892
Nettowohnfläche [m ²]	781

Gebäudetechnik

Lüftungsanlage	Mehrwohnungsanlage
Wärmeerzeugung	Holzpelletskessel
Zusatzeheizung	keine

Energetische Kennzahlen aus Erfolgskontrolle

Spez. Heizwärme [kWh/m ² EBF'a]	18.9
Primärenergie Min. P [kWh/m ² EBF'a]	77.0

Tabelle 3-5: Konstruktions- und Gebäudekenndaten des Passivhauses an der Rychenbergstrasse in Winterthur [Objektübersicht.xls].

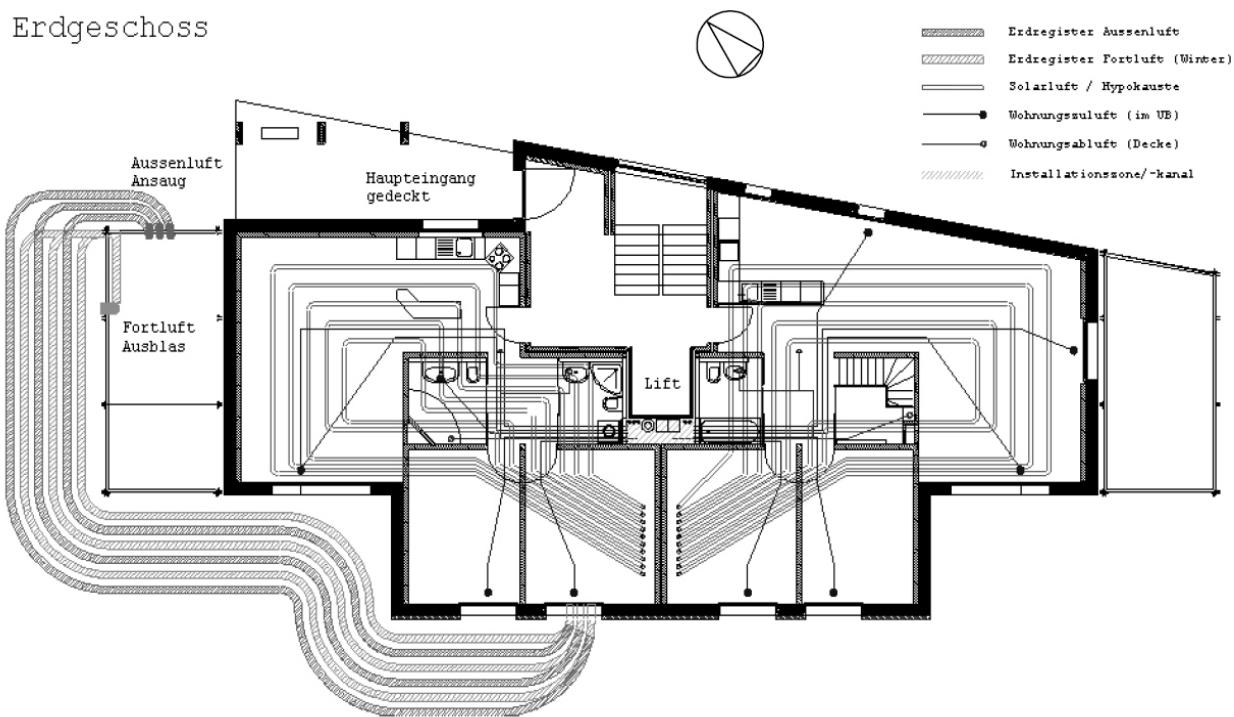


Abbildung 3-10 : Grundriss des Erdgeschosses im Passivhaus Rychenbergstrasse in Winterthur mit integriertem Lüftungsschema [8].

3.6 Passivhaus Sunny Woods, Zürich



Abbildung 3-11 : Das Passivhaus Sunny Woods in Zürich Höngg [7].

- Bauherrschaft: Kämpfen Bau GmbH, Generalunternehmung, Zürich
- Architekt: Beat Kämpfen, Regensdorferstrasse 15, 8049 Zürich

Das Passiv - Mehrfamilienhaus Sunny Woods liegt im Rütihofquartier in Zürich Höngg. Das Gebäude wurde 2002 sowohl mit dem Schweizer Solarpreis als auch mit dem europäischen Solarpreis ausgezeichnet. Das Projekt mit sechs Eigentumswohnungen sollte Leute ansprechen, die von den Vorzügen eines Einfamilienhäuschen im Grünen träumen und doch lieber in der Stadt Zürich wohnen bleiben.

Der viergeschossige Holzbau beinhaltet sechs Maisonettewohnungen. Der beheizte Wohnteil ist als reiner in der Zimmerei weitgehend vorfabrizierter Holzbau ausgeführt worden. Die Tiefgarage, die Kellerwände und das Treppenhaus für die äussere Erschliessung sind demgegenüber in Beton erstellt.

Für die Warmwasseraufbereitung und die Luftheizung werden eine Luft/Wasser-Wärmepumpe sowie Solarkollektoren verwendet. Die Belüftung findet durch dezentrale Wohnungslüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung und wohnungsweisem Erdregister mit Bypass statt. Das Pultdach ist durchgehend mit Solarpaneelen belegt. Der damit erzeugte Strom wird vollständig zum Betreiben der Wärmepumpe verwendet.

Konstruktions- und Gebäudekenndaten

Konstruktion

Baujahr	2000/2001
Bauweise	Holzelement
Gebäudeart	MFH
Anzahl Wohnungen	6
Belegung Total [Pers.]	18
Höhenlage [m.ü.M]	520
Energiebezugsfläche [m ²]	1387
Nettowohnfläche [m ²]	1233

Gebäudetechnik

Lüftungsanlage	Einzelwohnungsanlage
Wärmeerzeugung	Luft/Wasser Wärmepumpe
Zusatzeheizung	keine

Energetische Kennzahlen aus Erfolgskontrolle

Spez. Heizwärme [kWh/m ² EBF'a]	27.5 *
Primärenergie Min. P [kWh/m ² EBF'a]	65.7

* Basierend auf der Annahme $q_h = 2 \cdot q_{ww}$
sowie Speicher- und Verteilverluste = 20%

Tabelle 3-6 : Eckdaten des Passivhauses Sunny Woods in Zürich Höngg [Objektübersicht.xls].

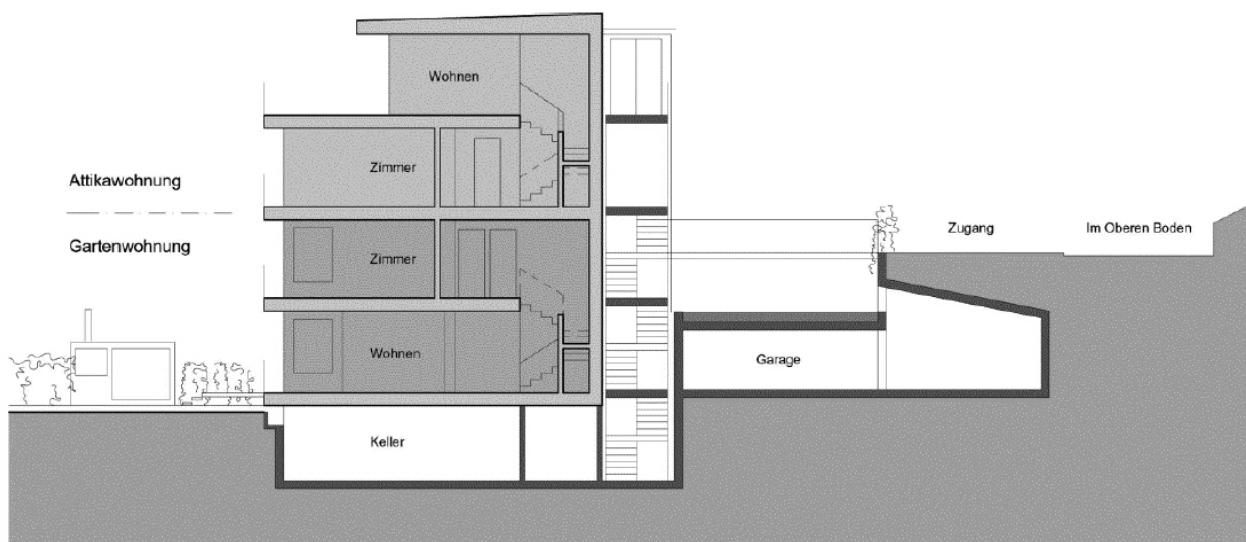


Abbildung 3-12 : Querschnitt durch das Passivhaus Sunny Woods in Zürich Höngg [7]

4 Vorgehen und gewählte Methoden

Die vergleichende Auswertung stützt sich hauptsächlich ab auf die Messdaten und Erfahrungen aus den vier Erfolgskontrollen der HTA Luzern. Diese vier P+D Erfolgskontrollen beinhalteten ein Passivhaus im Umbau und drei Neubauten mit unterschiedlichen Gebäudekenndaten. Zusätzlich zu diesen Messdaten sind noch die Daten aus den Schlussberichten von zwei anderen Objekten [7] und [8] ausgewertet worden. Eine Benutzerumfrage bei Bauherren, Architekten und Gebäudetechnik-Planern wurde durchgeführt. Insgesamt wurden sechs schweizerische Passivhäuser miteinander verglichen. Nachfolgend sind Methoden aufgeführt, die für spezifische Fragestellungen verwendet wurden.

4.1 Bewertung der Gebäudehülle mittels Infrarot - Thermographie

Die Infrarot - Thermographie eignet sich zur Untersuchung von Wärmedämmungs- und Feuchteproblemen sowie für das Detektieren von Wärmebrücken. An kritischen Stellen wie zum Beispiel im Fenster- und Giebelbereich oder bei Rollladenkästen lassen sich Schwachstellen schnell aufzeigen. Die so gefundenen Problemstellen können beispielsweise energetische Probleme begründen. Die durch die Infrarot - Thermographie zur Verfügung stehenden Informationen über die Oberflächentemperaturen lassen die Beurteilung der Strahlungsasymmetrie zu. Diese ist eine zentrale Einflussgröße auf den thermischen Komfort. Soweit möglich, wurden thermographische Aufnahmen aller betrachteten Passivhäuser gemacht oder beschafft. In Stans, Unterägeri und Rapperswil konnten die nötigen Aufnahmen durch die HTA Luzern selbst ausgeführt werden. Bei den Gebäuden in Zürich stammen die thermographischen Aufnahmen aus den Luftdichtigkeitsprüfungen und wurden den Schlussberichten entnommen.

Verwendetes Messgerät:

Ungekühlte Infrarot - Thermographiekamera NEC TH7102 WX, SN: 204 04 63

4.2 Benutzerverhalten

Die Auswertung des Benutzerverhaltens stützt sich einerseits auf bereits durchgeführte Befragungen. *Lenel und andere* haben im Minergie® - Praxistest [20] fast 300 Fragebögen zum Thema Zufriedenheit mit Minergie®-Bauten ausgewertet. Die Resultate aus dieser Befragung sind als Vergleichsgröße für unsere Erhebungen herangezogen worden. *Gräppi und andere* [21] haben eine Benutzerumfrage in Passivhäusern der Schweiz, Deutschland und Österreich durchgeführt und ausgewertet. Bei den schweizerischen Passivhäusern, darunter die Objekte Stans und Rapperswil, wurden 19 Fragebögen ausgefüllt retourniert und ausgewertet. Teilweise haben die Bauherren auch selbst Benutzerbefragungen lanciert. So zum Beispiel in Stans [6] und an der Magnusstrasse in Zürich [5].

Um mit dem Minergie® - Praxistest [20] vergleichbare Datensätze zu erhalten, sind die Bauherren, Architekten sowie die Haustechnikplaner der untersuchten sechs Objekte zusätzlich zu ausgesuchten Themen befragt worden. Die erhaltenen Daten sind gemeinsam mit der Hochschule für soziale Arbeit in Luzern analysiert und ausgewertet worden.

Die Befragungen haben sich auf die folgenden Themenkreise bezogen:

- Allgemeine Belange
- Bauphase
- Wohnkomfort
- Betrieb, Nutzung und Information

4.3 Temperatur und relative Feuchte

Als Vergleichsgrössen für den thermischen Komfort werden die Temperatur und die relative Feuchtigkeit in den untersuchten Passivhäusern herangezogen. Da nur aus den Erfolgskontrollen der HTA Luzern saisonale Daten vorliegen, beschränkt sich die Untersuchung des thermischen Komforts auf diese vier Objekte.

Die Komfortwerte werden getrennt für das Winterhalbjahr (Oktober bis und mit März) sowie für das Sommerhalbjahr (April bis und mit September) betrachtet. Im Winterhalbjahr wird als Komfortgrenze eine Raumlufttemperatur von 20 °C angenommen (gemäss SIA - Norm 384/2, allgemeiner Richtwert). Im Summenhäufigkeitsdiagramm zeigt sich die kumulierte Häufigkeit der Unterschreitungen dieser Temperatur. Im Sommerhalbjahr wird analog dazu die Überschreitung der 26 °C Marke betrachtet (gemäss SIA - Norm 382/2, Auslegungstemperatur für Kühlanlagen). Als kritischer Wert für die relative Raumluftfeuchte wurde 30 % r. F. festgelegt (gemäss SIA - Norm 180, untere Grenze der relativen Raumluftfeuchte).

In den P+D Erfolgskontrollen wurden die Daten für Temperatur und relative Feuchte im Stundenintervall erfasst.

Verwendete Messgeräte:

Rotronic Hygrolog, Messbereiche: Relative Feuchte 0..100 % r.F., Temperatur – 40..85°C

Rotronic HTO45 W, 0-10V, Messbereich: Relative Feuchte 0..100 % r.F., Temperatur 0..40°C

4.4 Nutz-, End- und Primärenergie

Als Standardvergleichsgröße für den Energieverbrauch wird vor allem der spezifische Energieverbrauch pro Energiebezugsfläche bewertet. Diese Betrachtung erlaubt einen direkten Objektvergleich aufgrund des Energieverbrauchs pro Jahr und Quadratmeter Energiebezugsfläche. Die Planungs- und Zertifizierungs-Pakete der zur erfüllenden Energiestandards geben hier Grenzwerte vor.

Die Energieverbrauchswerte der ausgewählten Passivhäuser wurden den jeweiligen P+D Erfolgskontrollen entnommen.

Eine ebenfalls interessante Größe ist der Leistungsbedarf pro Person. Der jährliche personenbezogene Primärenergieverbrauch entspricht im landesweiten Durchschnitt einer Dauerleistung von rund 6300 Watt, wovon allein über ein Viertel auf Wohnen und Heizen entfällt [11].

In den untersuchten Passivhäusern sind die auch Lüftungsgeräte untersucht worden. Besonderes Augenmerk wurde bei der Auswertung auf die spezifische Energie für die Luftförderung pLüftung gelegt. Diese Größe quantifiziert die nötige Leistung, die ein Lüftungsgerät aufnimmt, um einen Kubikmeter Luft pro Stunde zu fördern. Die berechneten Werte werden mit den in den Merkblättern des Bundesamtes für Energie [12] und des SIA [13] festgehaltenen Werten verglichen.

Der Heizenergieverbrauch ist bei der Zertifizierung eines Gebäudes nach dem Passivhausstandard eine der zentralen Größen. Das Passivhaus - Projektierungspaket (PHPP) verlangt zur Zertifizierung einen Heizwärmebedarf von maximal 15 kWh/m²·a bezogen auf die Netto-Energiebezugsfläche. Der Grenzwert nach Minergie®-P® orientiert sich an der Berechnung des Heizwärmebedarfs nach der SIA-Norm 380/1. Da nicht für alle Gebäude die Planungs- und Berechnungsunterlagen zur Verfügung standen, wurde als Vergleichsgröße zu den Messwerten der Grenzwert nach PHPP herangezogen.

Der zweite relevante Kennwert zur Beurteilung von Passivhäusern ist der Primärenergieverbrauch. Die über die Systemgrenzen zugeführte Energie wird hier mit so bezeichneten KEA - Faktoren (**Kumulierter Energie Aufwand**) gewichtet, damit die graue Energie, welche zur Energieerzeugung, Transport und Verteilung aufgewendet werden muss, berücksichtigt werden kann. Die KEA-Faktoren sind je nach Energiestandard verschieden (vergleiche hierzu Kapitel 5.4.4 Primärenergie). Minergie®-P® gewichtet die nichterneuerbaren Energien nicht so hoch wie das PHPP und gesteht erneuerbaren Energien Faktoren kleiner als 1 zu Ans das Netz abgegebene Energie, beispielsweise von einem Klein – BHKW, wird der Primärenergiebilanz bei beiden Standards gutgeschrieben.

4.5 Akustik

In drei Passivhäusern, welche mit zentralen und dezentralen Lüftungsgeräten ausgestattet sind, wurden Akustikmessungen durchgeführt. Das Hauptaugenmerk bei den Akustikmessungen wurde auf die Gebäudetechnik gerichtet. Es sollte festgestellt werden, ob durch den Betrieb der kontrollierten Wohnungslüftung eine erhöhte akustische Belastung im Raum auftritt.

Die Messungen wurden mit einem digitalen Handschalldruckpegel-Messgerät durchgeführt. An diesem Gerät können die Schalldruckpegel der Oktavbandfrequenzen einzeln gemessen werden.

Verwendetes Messgerät:

Brüel&Kjær 2230 mit Oktavfilter Typ 1625 und 1/2" Kondensatormikrophon 4155, SN: 1 134 104

Messunsicherheit ±2dB

5 Ergebnisse, Erkenntnisse und Erfahrungen

5.1 Vergleich der Baukonstruktionen

Die untersuchten Passivhaus - Neubauten sind Mehrfamilienhäuser, die zwischen 1999 und 2001 erstellt wurden. Alle Neubauten wurden im suburbanen Raum realisiert. Sie sind von ihrer Grösse und Nutzung her miteinander vergleichbar. Das Gebäude an der Magnusstrasse in Zürich ist ein Umbau.

Alle Gebäude weisen einen drei- bis fünfgeschossigen beheizten Wohnteil auf, der möglichst kompakt und wärmebrückenfrei mit Wärmedämmung umhüllt wird. Die Kellergeschosse, das Treppenhaus mit dem Lift liegen demgegenüber im Kaltbereich. Auch werden die Balkone als thermisch getrennte, selbsttragende Konstruktionen den Gebäuden vorgesetzt.

Die Hauptwohnräume werden in der Regel nach Süden ausgerichtet, wo grosse Fensteröffnungen einen maximalen solaren Gewinn ermöglichen. Gegen Norden zeigen sich die meisten Häuser - mit Ausnahme von Rapperswil - als eher geschlossene Bauten mit wenig Fensteranteil.

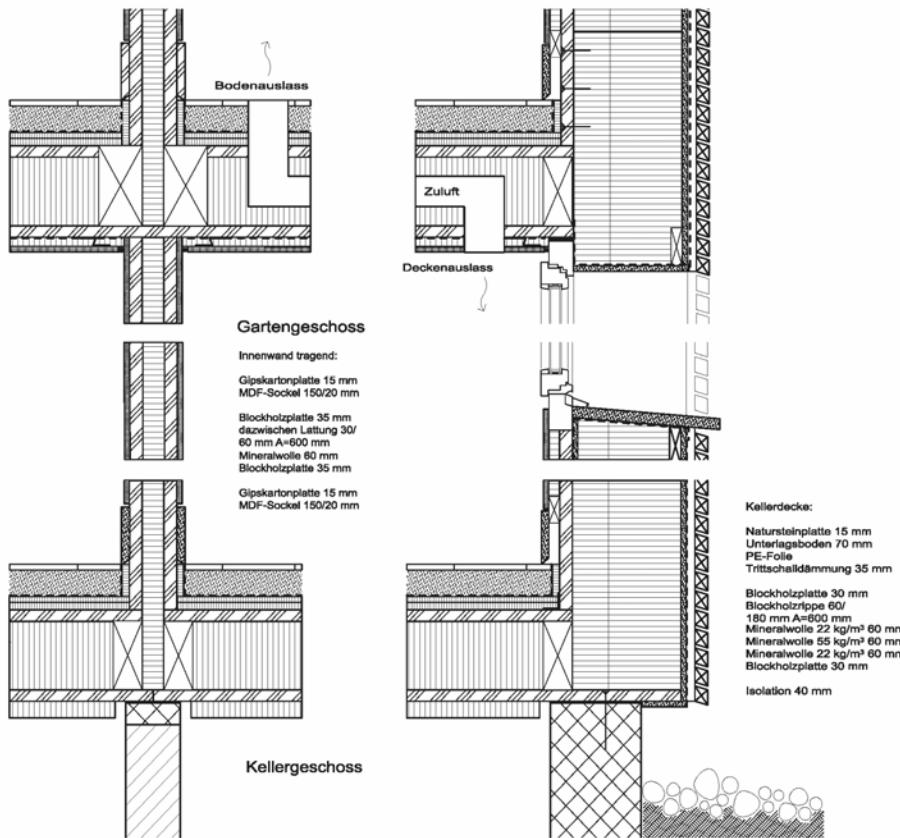


Abbildung 5-1 : Konstruktionsschnitt beim Passivhaus Sunny Woods in Zürich.

Der Passivhausstandard ist an eine hohe Wärmedämmstärke von 30 cm und mehr gebunden. Dies führt meist zu dicken Außenwandaufbauten und folglich zu einem markanten Verlust an Wohnfläche. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wird in vielen Fällen die Außenwandkonstruktion in Holzbau ausgeführt. Die untersuchten Neubau - Passivhäuser weisen eine Holzkonstruktion auf. Die Ausnahme bildet hier das Passivhaus Unterägeri, welches in Massivbauweise ausgeführt wurde. Die Fensterrahmen sind jeweils in Holz oder Holz - Metall gefertigt. Die Verglasung ist in der Regel dreifach ausgeführt, mit einem Chromstahlrandverbund luftdicht gehalten und mit Krypton aufgefüllt. Eine Alternative zur Dreifachverglasung kam im Haus Wechsel zur Anwendung; das Heat Mirror TC88 ist eine Doppelverglasung mit bespannter beschichteter Folie im Zwischenraum.

Beim Passivhaus Unterägeri wurden so genannte Vakuumdämmplatten (VIP) eingebaut, um den Konstruktionsaufbau zu minimieren. Vakuumdämmungen haben den Vorteil einer sehr effizienten Dämmeigenschaft (40mm VIP entsprechen in etwa 40 cm Mineralwolle). Der Einsatz dieser Dämmplatten im Hochbau ist auf Grund der fehlenden Langzeiterfahrungen problematisch. Mit einem Vakuumverlust, entweder über mechanische Beschädigungen, oder über undichte Folien, fällt die Dämmeigenschaft auf Werte von herkömmlichen Wärmedämmungen.

Beim Passivhaus im Umbau an der Magnusstrasse in Zürich handelt es sich um eine Totalsanierung eines 107 jährigen Hauses. Die bestehende Bausubstanz musste unter denkmalpflegerischen Auflagen erhalten bleiben. Im Gegensatz zu den Neubauten steht das Gebäude inmitten eines städtischen Kontexts mit einer Hof- und einer Strassenfassade mit eher kleinen Fensteröffnungen. Die Strassenfassade wurde optisch nur minimal verändert und erhielt aussen und innen nur jeweils 3 cm Wärmedämmung. Der Dachstock wurde neu als Stahlkonstruktion mit Holzelementen erstellt. Im Umgang mit der bestehenden Bausubstanz gab es Schwachstellen mit der Luftdichtigkeit und der ungenügenden Dämmung der Gebäudehülle.

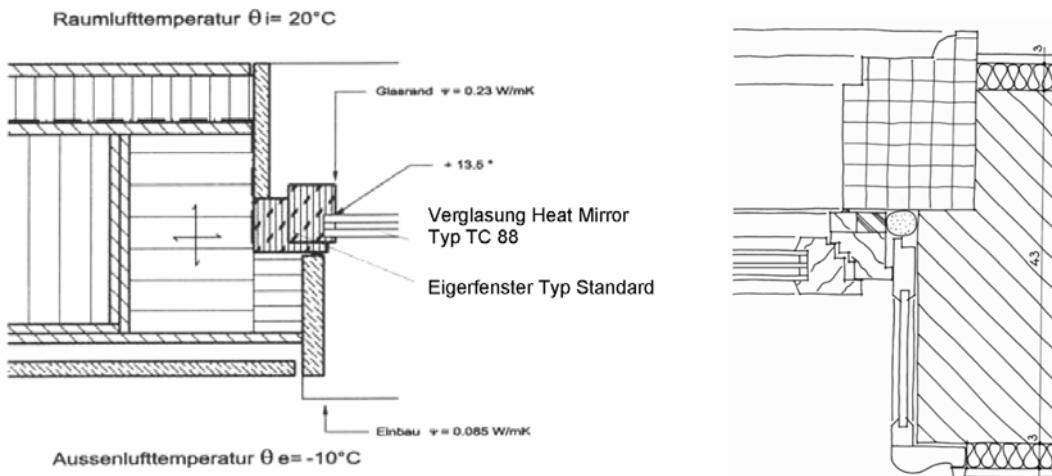


Abbildung 5-2 : Fensteranschläge im Passivhaus in Stans (links) und beim Passivhaus im Umbau Magnusstrasse in Zürich (rechts).

Die Passiv - Mehrfamilienhäuser in Stans und Sunny Woods in Zürich wurden vorwiegend aus vorgefertigten Holzelementen erstellt. Im jeweils 4-geschossigen Wohnteil wurden einzig die Unterlagsböden betoniert, um eine genügende Masse der Decke zu erreichen.

Die tragende Struktur im Passivhaus Sunny Woods bildet ein Schottensystem aus nur 35 mm starken, auf der Innenseite angebrachten Blockholzplatten, auf denen auch die Decken lasten. Die Tafelbauweise ermöglichte die Planung mit grossformatigen Elementen von hohem Vorfertigungsgrad, was eine höhere Fertigungsqualität und kürzere Montagezeiten vor Ort zur Folge hatte.

Die Tragkonstruktion im Passivhaus Stans besteht aus sichtbaren Holz-Betonverbunddecken auf vorgefertigten Holzelementwänden in Rahmenbauweise mit einer Vorsatzschale aus Gipsfaserplatten. Einzelne Stahlstützen und Stahlträger unterstützen die Statik.

Viergeschossige Holzbauten sind in der Schweiz gemäss der Feuerpolizei-Gesetzgebung nicht erlaubt. Beide Projekte wurden trotzdem bewilligt, da die Fluchtmöglichkeit über aussen liegende Treppenhäuser in F60 gegeben ist.

Beim vorfabrizierten Holzbau ist das Tragwerk nicht zwingend auch in Holz auszuführen. In Rapperswil wurde eine Mischbauweise aus Stahlbetonskelett in Ortsbeton mit Außenwandelementen aus vorgefertigter Holzrahmenbauweise verkleidet. Die Betondecken fungieren als horizontale Verteilebene sämtlicher Gebäudetechnikleitungen. Bei einer Deckenstärke von 25cm kann auf zusätzliche Massnahmen im Brandschutz und Schallschutz verzichtet werden. Gleichzeitig ist die hohe Betonmasse positiv für die Wärmeträgheit der Räume. Durch die Installationen in der Decke, sind die Außenwände frei von Leitungen.

Ein Nachteil der Mischbauweise ist laut Architekt der erhebliche Mehraufwand bei der Planung und Bauausführung der Schnittstellen zwischen Massiv- und Leichtbau.

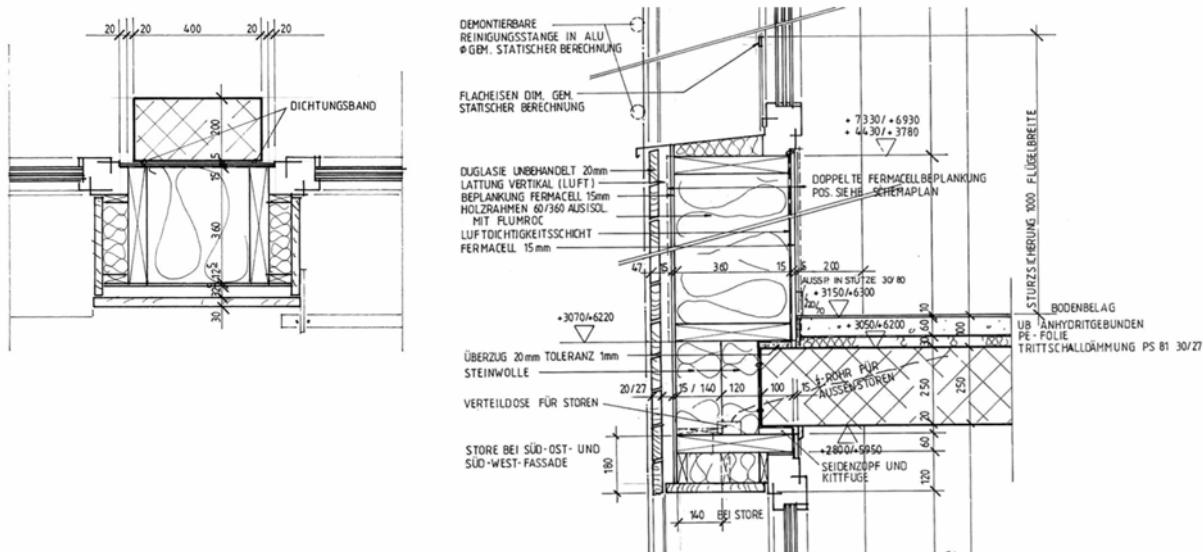


Abbildung 5-3 : Grundrissdetail Stütze und Schnittdetail Deckenauflager im Passivhaus in Rapperswil

Die Fassade beim Passivhaus an der Rychenbergstrasse in Winterthur ist ebenfalls mit Holzelementen verkleidet, die mit 30cm Zelluloseflocken ausgedämmmt wurden. Die tragende Struktur im Innern bilden Betondecken und Kalksandsteinwände. Bei den Stirnseiten wurde vor die Kalksandsteinmauer im Abstand von 14 cm auf eine äussere Schale mit 16 cm gedämmten Holzelementen vorgestellt und mit einzelnen Chromstahlankern gehalten. Der Zwischenraum wurde vor Ort mit Zellulosefasern ausgeblasen. Die Terrassen sind freitragend vor der wärmegedämmten Gebäudehülle platziert. Der Luftdichtigkeit der Gebäudehülle wurde schon in der Ausschreibung der Fassade grosse Beachtung geschenkt, was eine sorgfältige Planung sämtlicher Fugendetails beim Holzelementbau mit sich brachte. Die Bautoleranzen der Baumeisterarbeiten durften maximal 1.5 cm betragen.

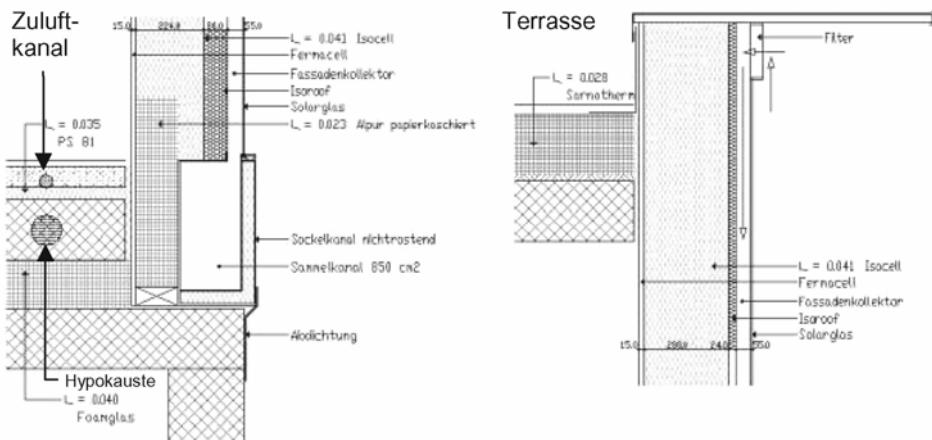


Abbildung 5-4 : Detailschnitte der Deckenauflager im Passivhaus Rychenbergstrasse in Winterthur.

Das Passivhaus Unterägeri ist in Massivbauweise konstruiert, die Geschossdecken sind aus Beton, die Mauern aus Backstein oder Kalksandstein. Die 18 cm dicken Aussenwände sind mit 24 cm Wämedämmung eingepackt und verputzt. Eine spezielle Lösung erforderte der Übergang der kalten Betondecke zu den Mauern der Obergeschosse, was über ein speziell entwickeltes Dämmelement gelöst wurde. Ebenfalls eine Speziallösung erforderte der Dachaufbau der begehbar Dachterrasse. Um einen möglichst stufenlosen Zugang von der Attikawohnung zu erhalten, wurden vakuumierte Dämmplatten „Vakucomp“ in zwei Lagen mit einer Höhe von je 25 mm verlegt.

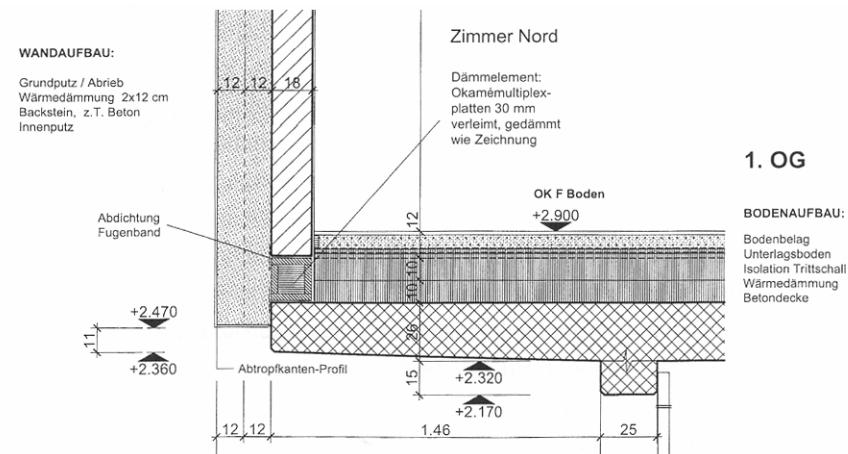


Abbildung 5-5 : Detailschnitt der Decke über der Garage im Passivhaus im Bödli in Unterägeri.

5.1.1 Luftdichtigkeit der Gebäudehülle

Die Luftdichtigkeit wurde nicht in allen Passivhäusern überprüft. Die n_{50} -Werte der Passivhäuser in Unterägeri und in Rapperswil sind nach wie vor ausstehend. Das Passivhaus im Umbau an der Magnusstrasse hat erwartungsgemäss einen erhöhten n_{50} -Wert, da es sich hierbei um eine Sanierung handelt. Erstaunlicherweise sind aber auch bei den Neubauten teilweise hohe Werte gemessen worden.

Objekt	Luftdichtigkeit geplant, n_{50} [h ⁻¹]	Luftdichtigkeit gemessen, n_{50} [h ⁻¹]	Abweichung Planungswert [%]
Im Wechsel, Stans	0.6	0.6	0
Im Bödeli, Unterägeri	0.6	keine Messung	-
Obermatt, Rapperswil	0.6	keine Messung	-
Magnusstrasse, Zürich	0.6	2.1	242
Sunny Woods, Zürich	0.6	2.5	308
Rychenbergstrasse, Winterthur	0.6	0.9	50

Tabelle 5-1 : Zusammenstellung der n_{50} - Werte [Luftdichtigkeit.xls].

Der grösste n_{50} -Wert wird gemäss *Tabelle 5-1* von einem grossvolumigen Neubau erzielt. Es stellt sich nun die Frage, wo die Ursache für die vergleichsweise schlechten Werte bei den untersuchten Passivhäusern liegt. Mehrfamilienhäuser sind generell schwieriger abzudichten und zu messen als Einfamilienhäuser. Im Passivhaus Stans wurde mit sehr grossem Aufwand erreicht, dass erstens korrekt gemessen werden konnte und zweitens die Gebäudehülle abgedichtet werden konnte. Zudem muss immer beachtet werden, in welcher Bauphase die Luftdichtheitsmessung stattgefunden hat. Je früher die Messung stattfindet, desto einfacher sind die zu treffenden Massnahmen. Hingegen ist bei einer frühzeitigen Messung nicht gewährleistet, dass die Luftdichtheitswerte über die Zeit Bestand haben, da sich erfahrungsgemäss noch einige Schwachstellen einschleichen können.

Laut einer Untersuchung der EMPA [18] liegt der n_{50} -Mittelwert für vier gemessene Passivhäuser bei 0.5 h⁻¹ und bei 16 gemessenen Minergie®-Bauten bei 1.2 h⁻¹. Eine Studie des Fraunhofer Instituts [19] mit Messungen an 32 Passivhäusern kommt auf einen gemessenen Mittelwert über alle Objekte von ebenfalls 0.5 h⁻¹.

5.1.2 Thermographische Aufnahmen

Passivhaus Stans

Die ermittelten Raumlufttemperaturen und die Oberflächentemperaturen zeigen, dass bei der herrschenden Außenlufttemperatur von ca. 2°C keine wesentliche Beeinträchtigung des thermischen Komforts vorgelegen hat. Die Differenz zwischen Oberflächen- und die Raumlufttemperatur ist klein, demzufolge ist die Strahlungsasymmetrie ebenfalls klein. Es ist aber durchaus möglich, dass bei tieferen Außenlufttemperaturen Einbussen bezüglich thermischem Komfort und Behaglichkeit hingenommen werden müssen. In der Dachgeschoss - Wohnung rechts wurde im Wohnbereich eine bedeutende Differenz bezüglich der Zulufttemperaturen an den beiden Auslässen festgestellt.

Am Rahmen der Eingangstüre (Abbildung 5-6) zur Attikawohnung links konnten Undichtigkeiten festgestellt werden.

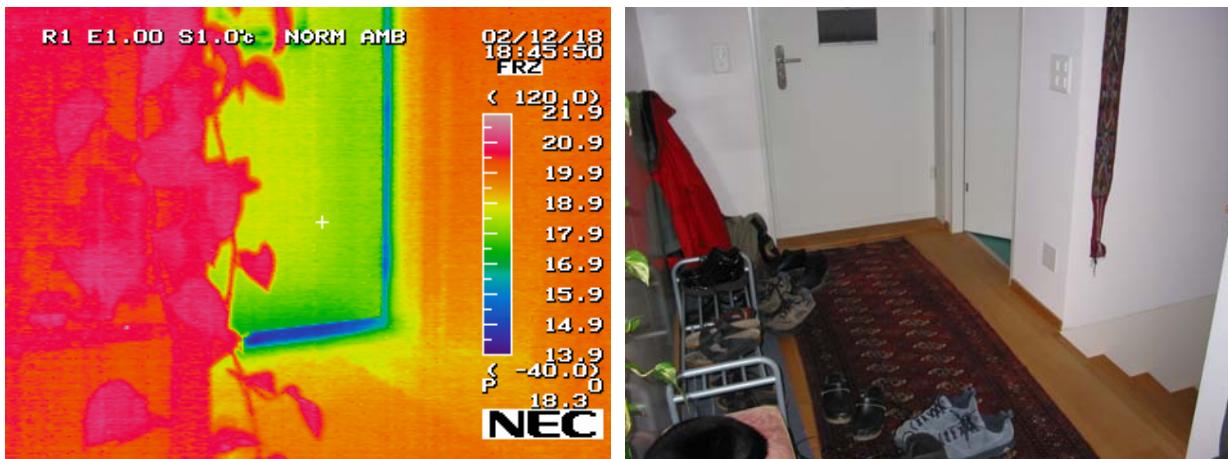


Abbildung 5-6 : Eingangstüre der Attikawohnung links im Passivhaus Stans [Quelle HTA Luzern]

Da dieser Wohnung mit der Luftheizung nur knapp genügend Heizwärme zugeführt werden kann, wirkt sich dieser Umstand zusätzlich belastend aus. Tatsächlich traten in dieser Wohnung Probleme mit der thermischen Behaglichkeit auf, welche durch den Einsatz einer zusätzlichen elektrischen Heizung gelöst werden mussten. Auch die Wärmebrücke im Wohnzimmer der Attikawohnung (Abbildung 5-7) könnte den erhöhten Wärmebedarf dieser Wohnung erklären.

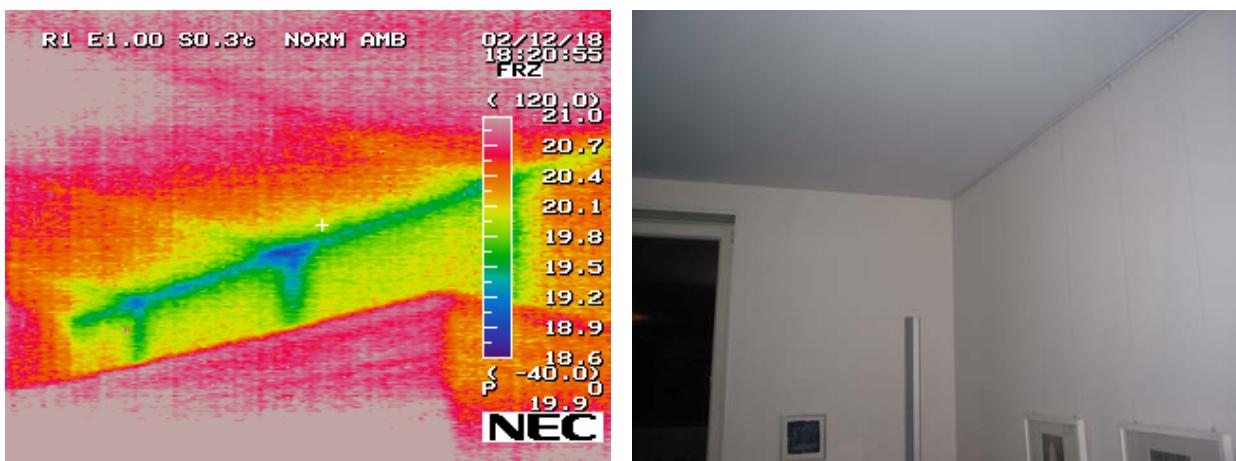


Abbildung 5-7: Kante der Wohnzimmerwand und der Decke der Attikawohnung [Quelle HTA Luzern]

In den anderen Wohnungen wurden keine Mängel festgestellt, was sich auch bei der Betrachtung des spezifischen Heizenergieverbrauchs zeigt (Abbildung 5-8). Der Verbrauch der Attikawohnung links (Wohnung 8) ist signifikant höher.

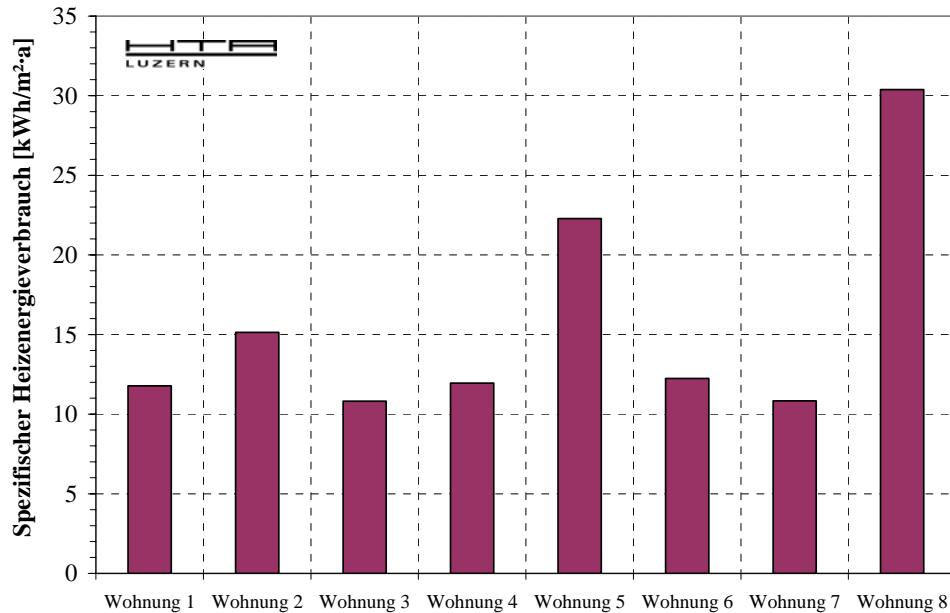


Abbildung 5-8 : Wohnungsweiser spezifischer Heizenergieverbrauch im Passivhaus Stans.

Passivhaus Rapperswil

Aufgrund des hohen Heizwärmeverbrauchs im Passivhaus Rapperswil wurden Mängel in der Gebäudehülle vermutet. Die thermographischen Aufnahmen die bei einer Aussenlufttemperatur von ca. -1°C erstellt wurden, sollten diese Schwachstellen aufzeigen.

Im Erdgeschoss sowie in der Attikawohnung West konnten sehr undichte Fensterrahmen detektiert werden (Abbildungen 5-9 und 5-10).

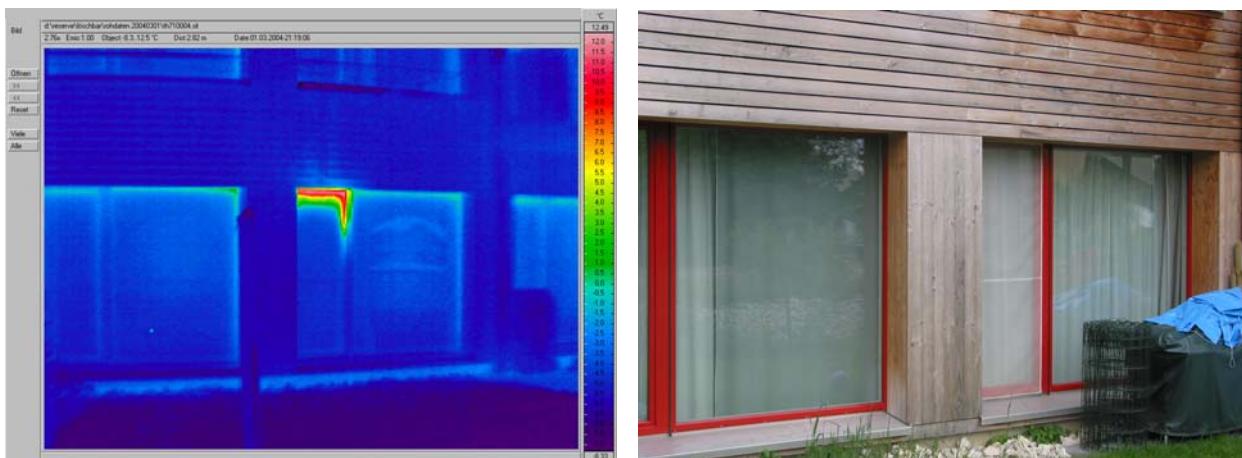


Abbildung 5-9 : Fehlerhaftes geschlossenes Fenster im EG (links) [Quelle HTA Luzern].

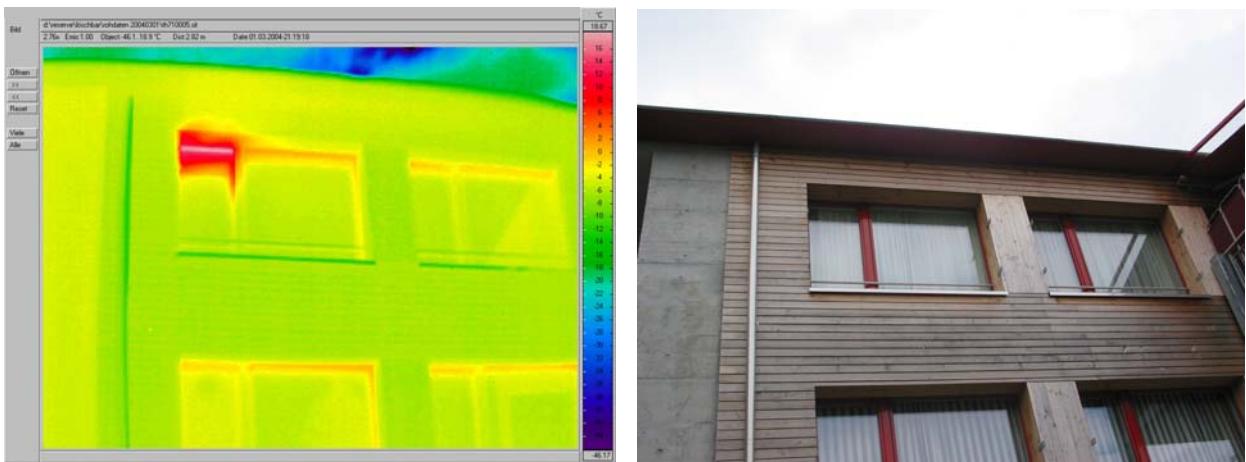


Abbildung 5-10 : Fehlerhaftes Fenster in geschlossenem Zustand in der Attikawohnung Ost [Quelle HTA Luzern].

Ein erster Verdacht auf gekippte Fensterflügel konnte nicht bestätigt werden. Die Fenster waren erwiesenermassen geschlossen. Die Fensterrahmen haben sich durchgehend als eigentliche Schwachstellen herausgestellt. Etwas überraschend lagen die kritischen Stellen bei den Fenstern gleichermaßen bei den Flügeln, welche sich öffnen lassen wie auch bei den nicht zu öffnenden Fenstern (Abbildung 5-11). Beim Übergang von der Wand des Erdgeschosses zum Boden des ersten Obergeschosses (Abbildung 5-12) wurde ebenfalls eine Wärmebrücke festgestellt. Die Aufnahme wurde vom unbeheizten - und gegen die Umgebung offenen - Treppenhaus aus gemacht.

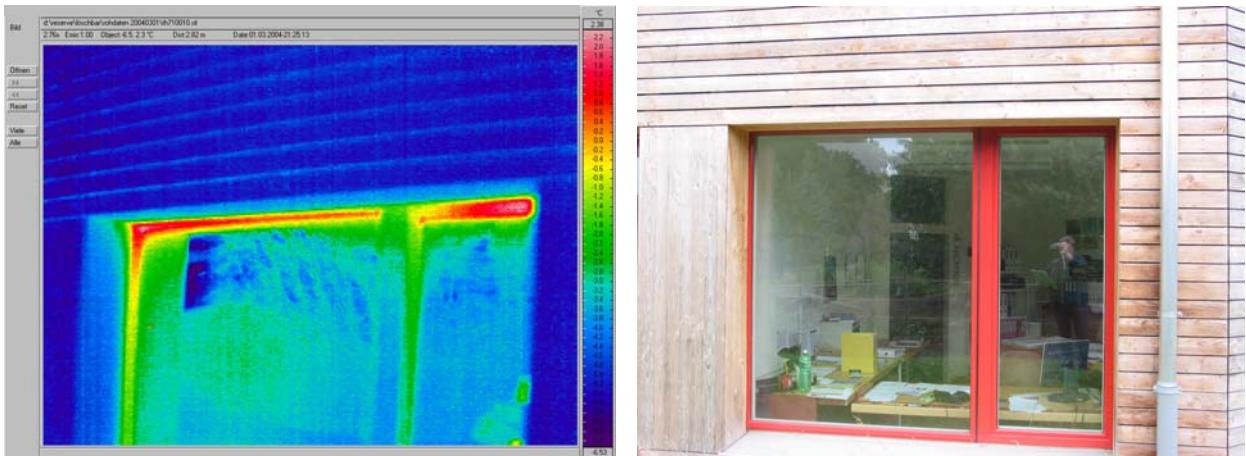


Abbildung 5-11: Fenster im Erdgeschoss (Büro links) [Quelle HTA Luzern].

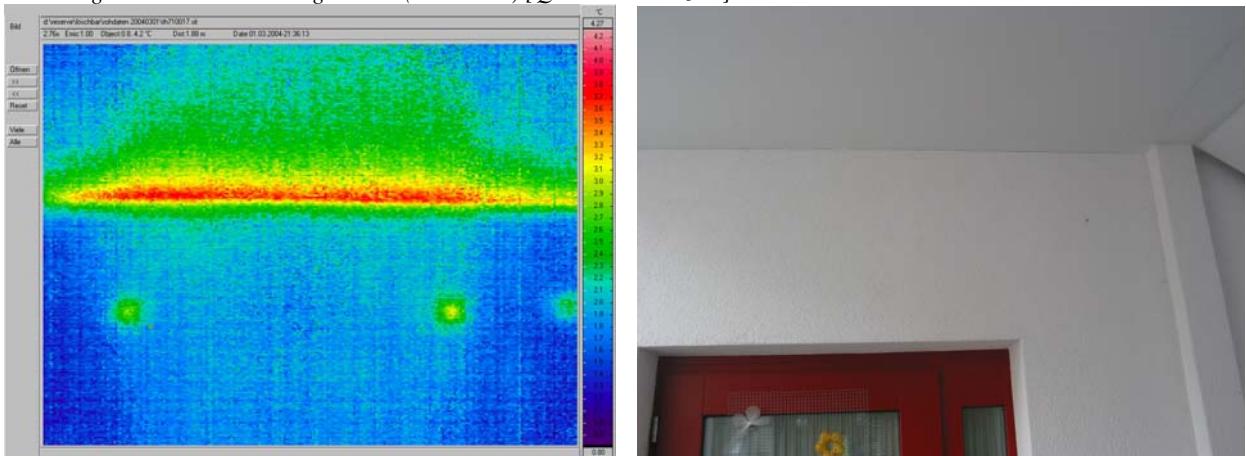


Abbildung 5-12: Übergang vom Boden der Wohnung 1.OG zur Wand EG in der Ansicht vom Treppenhaus (rechts) [Quelle HTA Luzern].

Im Büro des Erdgeschosses wurde das Augenmerk auf die Betonsäulen, welche sich ins unbeheizte Kellergeschoss fortführen, gelegt. Es hat sich gezeigt, dass durch dieses Säulen ebenfalls ein Wärmestrom in den unbeheizten Bereich gelangt (Abbildung 5-14). Ein ähnliches Bild hat sich auch bei den verglasten Eingangstüren zu den Büros (Abbildung 5-14) gezeigt. Die Türrahmen sind offensichtlich undicht.

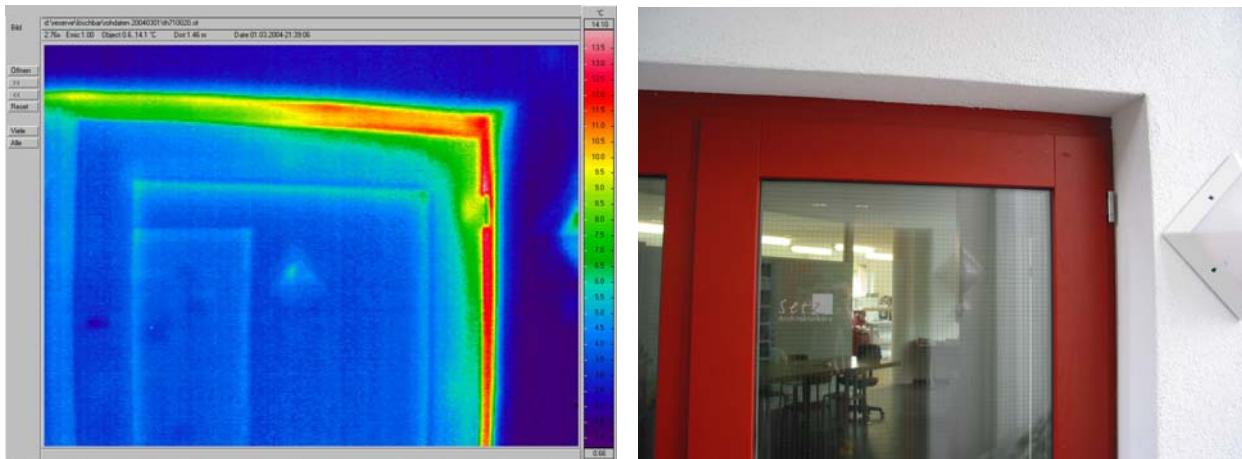


Abbildung 5-13: Rahmen der Eingangstür zum Büro im Erdgeschoss [Quelle HTA Luzern].

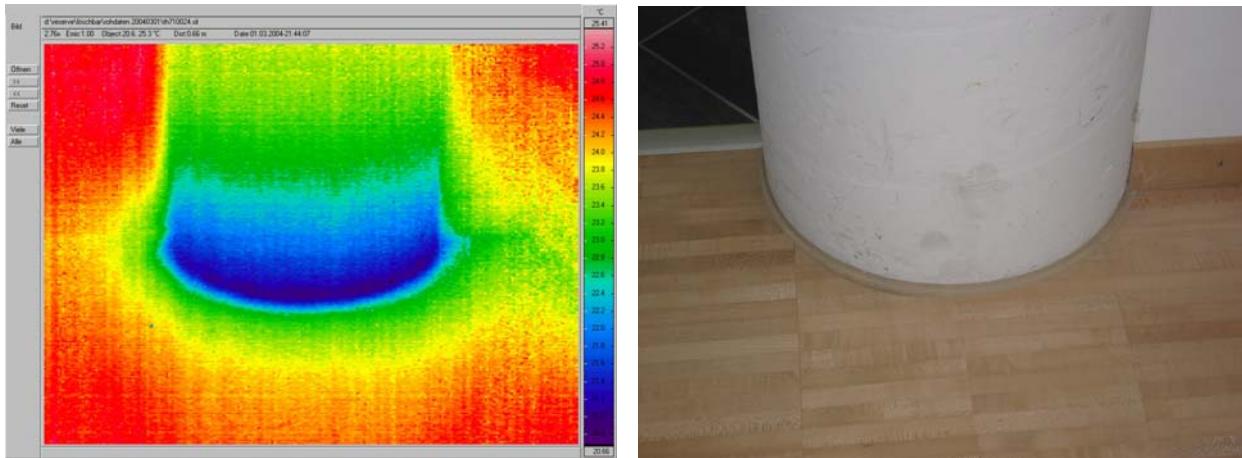


Abbildung 5-14 : Übergang der Betonsäule im Büro Erdgeschoss zum Boden [Quelle HTA Luzern]

Es konnten diverse mangelhafte Stellen ausgemacht werden, welche am erhöhten Heizwärmebedarf sicher beteiligt sind. Die Detektierung von Wärmebrücken kommt nicht ganz unerwartet. Dem Planer war bewusst, dass beispielsweise die erwähnten Betonsäulen keine ideale Lösung sind. Die Wärmeverluste wurden vor Baubeginn quantifiziert. Leider waren die Zahlenangaben auf Anfrage hin nicht erhältlich.

Passivhaus Unterägeri

Der Fokus bei den thermographischen Aufnahmen am Passivhaus Unterägeri, gemacht bei einer Aussenlufttemperatur von ca. -1°C, lag vor allem auf konstruktiv bedingten heiklen Stellen. Diese wurden bei unkonventionell ausgeführten Gebäudeteilen vermutet. Unkonventionelle Lösungen, zumindest im Passivhausbau, sind beispielsweise die eingeschobenen Garagen, die zurückversetzte Attika oder der Liftschacht innerhalb des Wärmedämmperimeters. Der Planer war sich dieser Problematik bewusst und hat daher das Erdgeschoss aus dem Passivhaus - Planungspaket ausgeklammert.

Bei der Terrassentür beim Ausgang vom Treppenhaus im obersten Stock (Abbildung 5-15) zeigten sich Schwachstellen im Türrahmen.

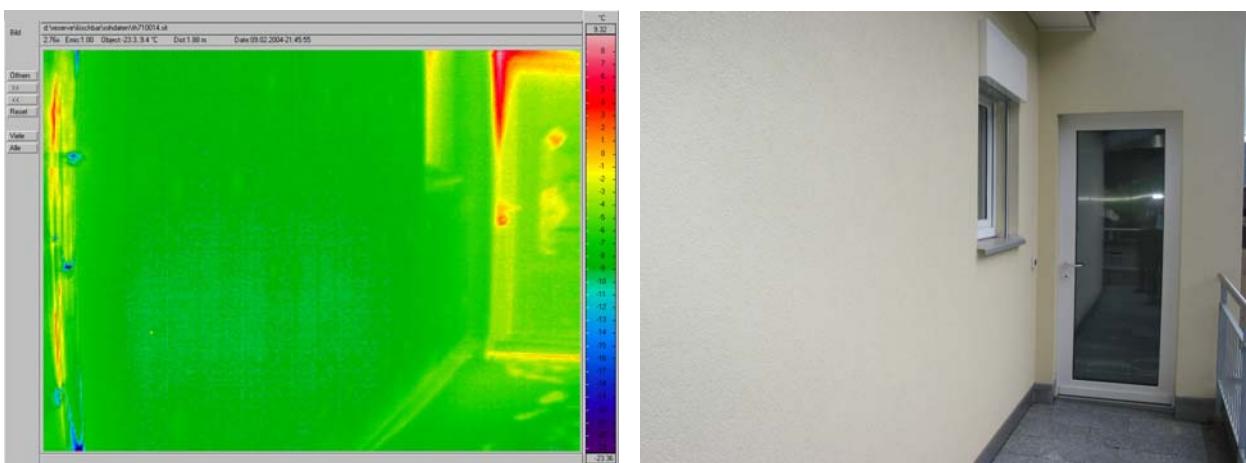


Abbildung 5-15 : Terrassentür beim Ausgang Treppenhaus im obersten Stock [Quelle HTA Luzern].

Weitere Schwachstellen wurden beim Rahmen der Terrassentür der Attikawohnung (Abbildung 5-16) festgestellt. Die Übergänge der zurückversetzten Attikawohnung sind gut ausgeführt und zeigen keine signifikanten Schwachstellen.

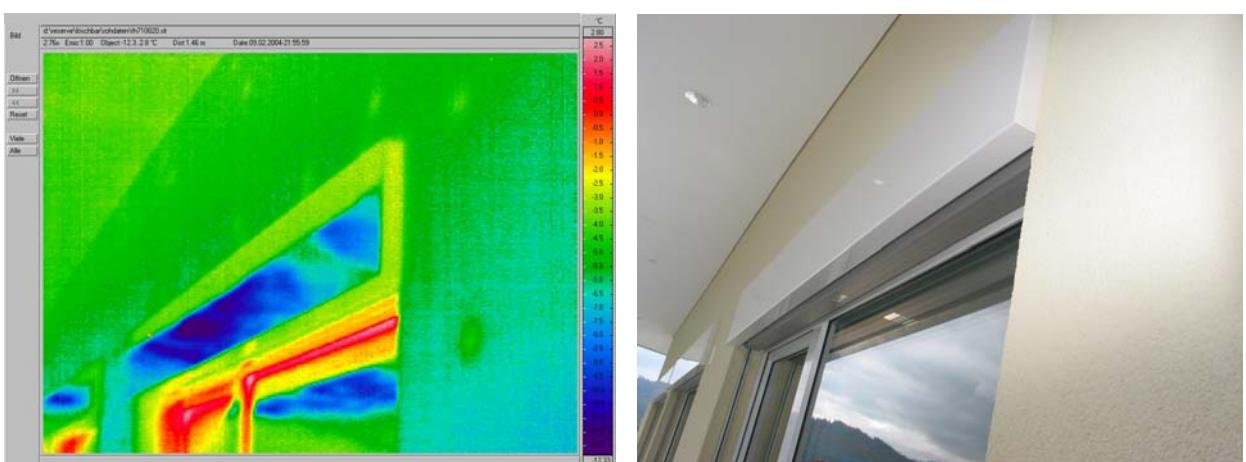


Abbildung 5-16: Rahmen der Terrassentür bei der Attikawohnung [Quelle HTA Luzern].

Am Boden vor der Terrassentür Ost (*Abbildung 5-17*) konnte eine problematische Region mit deutlich erkennbarem Wärmeverlust detektiert werden. Der Schnee, welcher zum Zeitpunkt der Messung auf dem Dach lag, war rund um die Attikawohnung bis zu einem Wandabstand von ca. einem Meter geschmolzen, was wahrscheinlich mit diesem Wärmeverlust in Zusammenhang steht. Es liegt die Vermutung nahe, dass eine oder mehrere der Vakuum-Dämmplatten beschädigt worden sind.

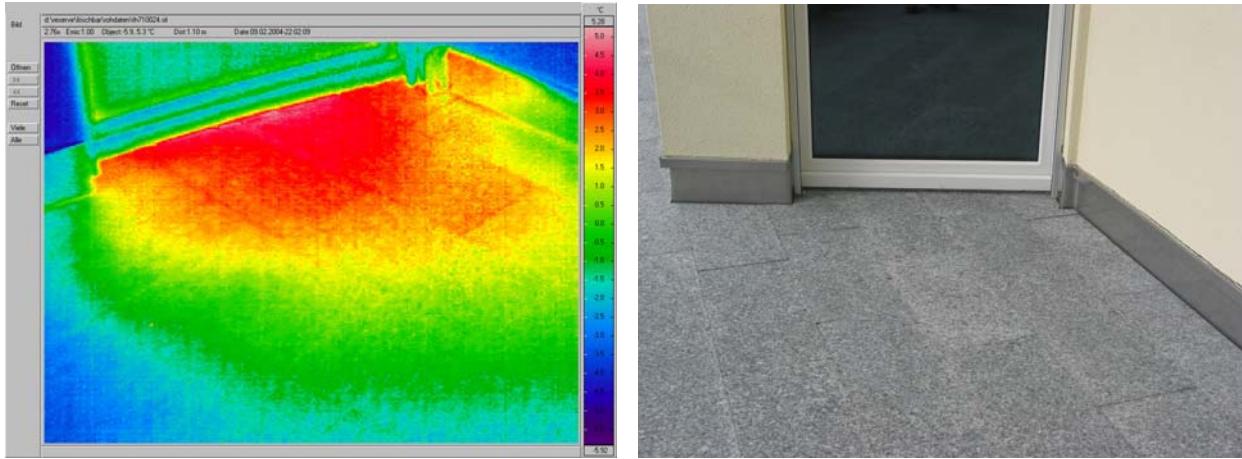


Abbildung 5-17: Boden im Bereich der Terrassentür der Attikawohnung [Quelle HTA Luzern].

An der Ecke, in der die Attikawohnung an den unbeheizten Liftschacht grenzt (*Abbildung 5-18*), zeigte sich eine weitere Wärmebrücke an einer Stelle, welche konstruktionsbedingt ist.

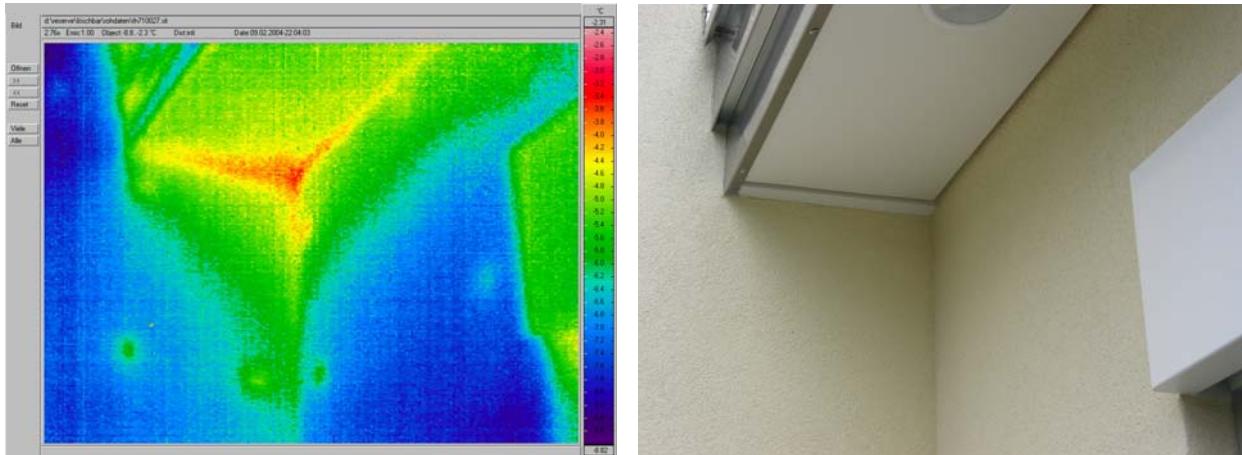


Abbildung 5-18: Dachvorsprung beim Liftschacht von Terrasse aus betrachtet [Quelle HTA Luzern]

Die Aufnahme in *Abbildung 5-19* macht deutlich, dass die eingeschobenen Garagen durchaus nicht ohne Folgen sind. Obwohl viel Aufwand zum Vermeiden von Wärmebrücken betrieben wurde, konnten diese nicht verhindert werden. Das speziell entwickelte Dämmelement aus Okumé-Holz bringt hier den erhofften Nutzen nur teilweise.

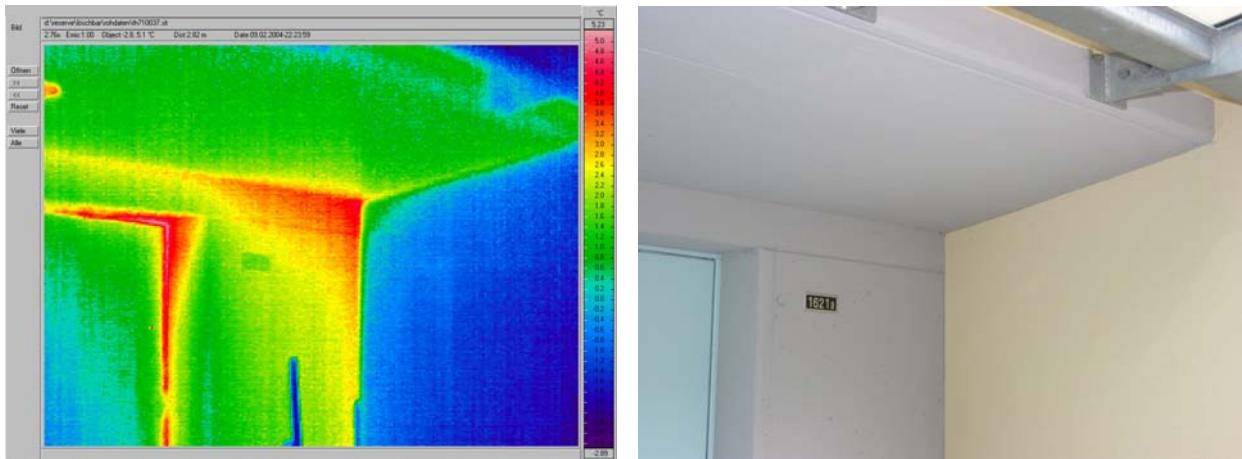


Abbildung 5-19: Ecke Garage und Treppenhaus [Quelle HTA Luzern].

Passivhaus im Umbau Magnusstrasse, Zürich

Die vorliegenden thermographischen Aufnahmen stammen aus dem Bericht der Luftdichtigkeitsmessung durch die EMPA [10] und zeigen daher eher Leckstellen als Wärmebrücken. Die Bilder sind mit dem Subtraktionsverfahren gemacht worden. Dabei werden zwei thermographische Aufnahmen gemacht. Eine bei „normalem“ Druck und eine bei Unterdruck im Raum. Per Software werden die beiden Bilder subtrahiert und damit die durch einströmende Luft abgekühlten Stellen hervorgehoben. Die Bilder zeigen deutliche Leckage im Bereich der Tür- und Fensterrahmen (*Abbildung 5-20 und 5-21*) sowie durch die Dosen der elektrischen Installationen (*Abbildung 5-22*). Diese Leckage hat natürlich auch einen Einfluss auf den Heizwärmebedarf. Da die Wohnungen mit einem Holzofen ausgestattet sind, wird die Lüftung mit Zuluftüberschuss - also Überdruck - betrieben. Die entweichende Luft geht quasi an der WRG „vorbei“ und die darin enthaltene sensible Wärme kann nicht genutzt resp. zurückgewonnen werden.

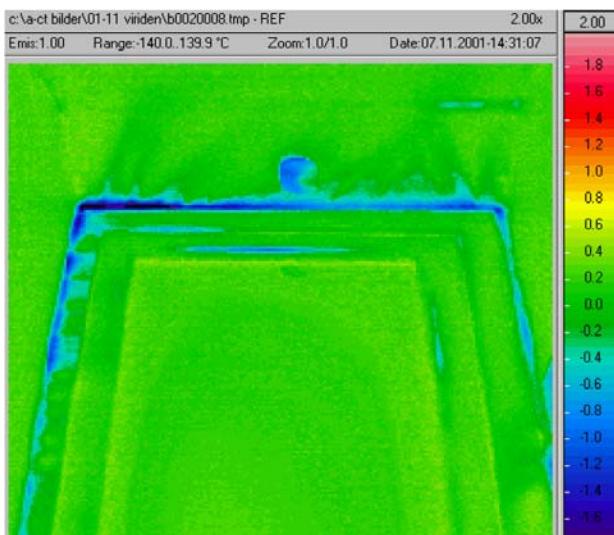


Abbildung 5-20: IR Subtraktion: Oberkante der Dachaufgangstür [10].

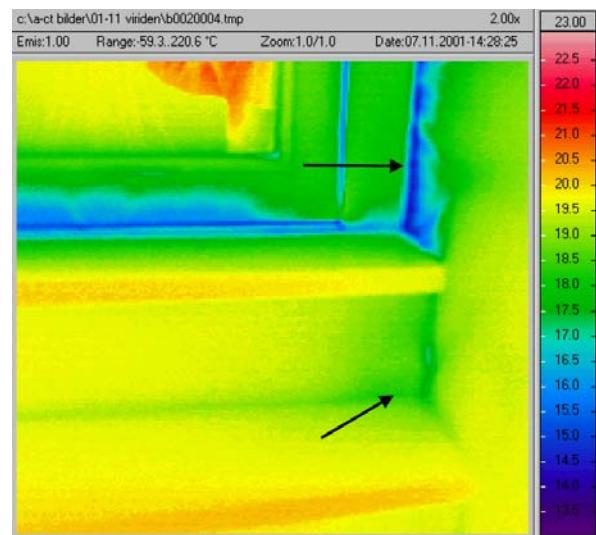


Abbildung 5-21: IR Normalbild: Untere Ecke der Dachaufgangstür [10].

Eine Wärmebrücke zeigt sich in der Südecke des Wohnzimmers (*Abbildung 5-23*) im 3. Obergeschoss. Diese Ecke grenzt an die strassenseitige Fassade, welche aus denkmalpflegerischen Gründen nur 2 bis 3 cm dick gedämmt werden konnte.

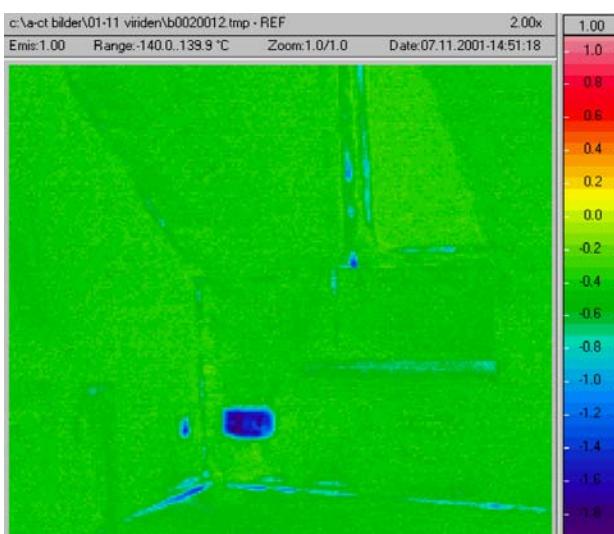


Abbildung 5-22 : IR Subtraktion: Steckdose bei Dachlukarne [10].

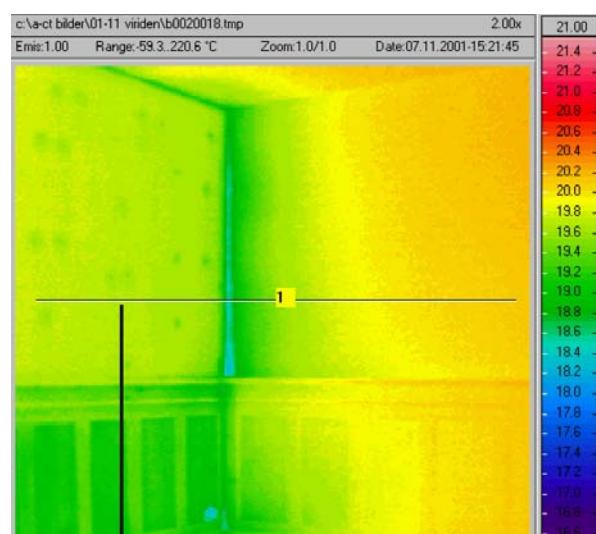


Abbildung 5-23 : Südecke Wohnzimmer 3.OG [10].

Passivhaus Sunny Woods, Zürich

Die vorliegenden thermographischen Aufnahmen, gemacht bei einer Aussenlufttemperatur von ca. 6°C, stammen aus dem Bericht der Luftdichtigkeitsmessung und zeigen daher eher Leckstellen als Wärmebrücken. Die Bilder wurden bei 50 Pa Unterdruck im Raum gemacht.

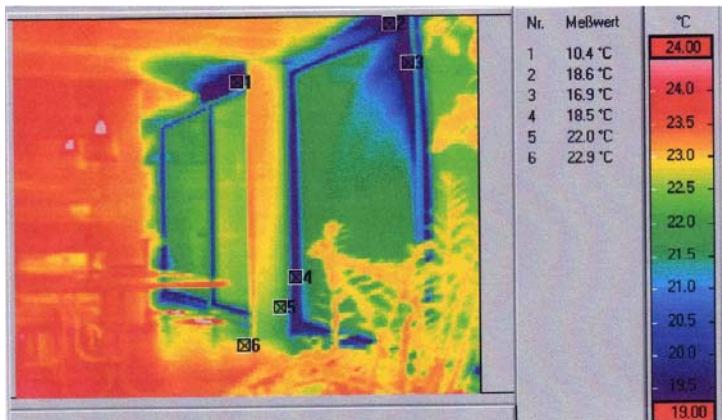


Abbildung 5-24 : Bild a, [8]

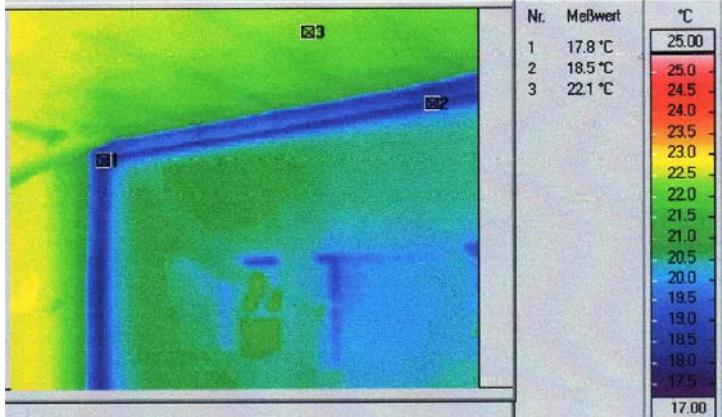


Abbildung 5-25 : Bild b, [8].

Als grosse Schwachstellen wurden die Fenster- und Türrahmen identifiziert. Die Undichtigkeiten der Fenster röhren von Verzug her und konnten laut Schlussbericht durch Richten der Rahmen eliminiert werden.

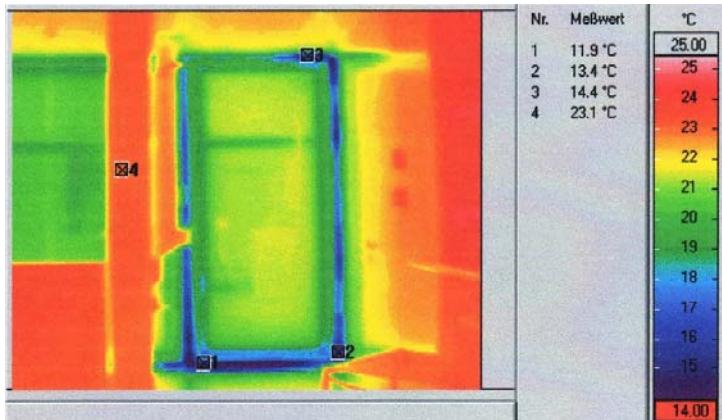


Abbildung 5-26 : Bild c, [8]

Erkenntnisse aus den thermographischen Aufnahmen

Das Passivhauskonzept stellt sehr hohe Anforderungen an die Luftdichtheit der Gebäudehülle. Das Passivhaus ist per Definition erst dann funktionsfähig, wenn die Gebäudehülle so dicht oder die Verluste so klein sind, dass das Haus nicht mehr aktiv geheizt werden muss. Signifikante Wärmebrücken, Leckagen etc. und die daraus resultierenden Verluste gefährden das Passivhauskonzept.

Grundsätzlich gehen grosse Verluste auf das Konto undichter Fenster- und Türrahmen. Die Rahmenanschläge werden mit ausgeklügelten Konstruktionen möglichst wärmebrückenfrei ausgeführt. Dieser Aufwand nützt jedoch nichts, wenn die Fenster an den eigentlichen Fugen undicht sind. Diese Undichtigkeiten sind teils bedingt durch ungeeignetes Material aber auch durch fehlerhafte Ausführung durch Handwerker. Die Folge solcher Mängel sind nebst dem erhöhten Energieverbrauch auch Einbussen im thermischen Komfort.

Der Vergleich der thermographischen Aufnahmen zeigt, dass die untersuchten Gebäude weitgehend frei von schwerwiegenden Wärmebrücken und gut wärmegedämmt gebaut worden sind. Diejenigen Objekte welche den Passivhaus- Grenzwert für den spezifischen Heizwärmeverbrauch überschreiten, haben meist auch Probleme mit Wärme- oder Lüftungsverlusten.

5.2 Thermischer Komfort und Behaglichkeit

Die erfassten Daten für die Raumlufttemperatur und die Raumluftfeuchte sagen einiges über das Benutzerverhalten aus. Nicht nur die Mittelwerte und Mediane sind von Bedeutung, sondern auch die Summenhäufigkeiten. Wenn der Mittelwert nahe beim Median liegt, deutet dies auf eine ausgeglichene Temperaturverteilung und wenige Ausreisser hin. Häufige Fensterlüftung im Winter oder Überhitzung der Räume im Sommer durch fehlende Beschattung der Fenster lassen sich anhand der Summenhäufigkeitsdiagramme erkennen.

Wenn angenommen wird, dass aus energetischen Gründen nicht aktiv befeuchtet wurde, können die Benutzer eigentlich nur die Raumlufttemperatur - nicht aber die Raumluftfeuchte und Raumluftqualität - nach ihren Wünschen einstellen. Als Folge der gewählten Raumlufttemperatur wird sich zwangsläufig eine bestimmte Raumluftfeuchte einstellen. Sie wird umso tiefer ausfallen, je höher die Raumlufttemperatur gewählt worden ist.

Ort	Zimmer	Mittelwert Raumluft-temperatur [°C]	Raumluft-temperaturen unter 20 °C [% der erfassten Stunden]	Mittelwert Rel. Raumluft-feuchtigkeit [%r.F.]	Rel. Raumluft-feuchtigkeit unter 30 % r.F. [% der erfassten Stunden]	Rel. Raumluft-feuchtigkeit bei 20°C (theor.) [%r.F.]
Rapperswil	Büro 1 - EG	24.5	0	24	90	32
Rapperswil	Büro 2 - 1.OG	23.5	0	19	100	24
Rapperswil	Wohnung 3 - 1.OG	25.0	0	25	86	34
Rapperswil	Wohnung 4 - 1.OG	24.6	0	28	68	37
Rapperswil	Wohnung 5 - Attika	23.8	0	32	37	40
Rapperswil	Wohnung 6 - Attika	25.5	0	24	88	34
Rapperswil	Mittelwert	24.5	0	25	78	33
Stans Wohnung 1	Wohnen - EG	20.9	9	44	0	47
Stans Wohnung 1	Eltern - OG	20.2	43	48	0	48
Stans Wohnung 1	Büro - EG	20.7	14	42	2	43
Stans Wohnung 1	Kind - OG	20.5	31	45	0	46
Stans Wohnung 1	Bad - OG	19.7	69	52	0	51
Stans Wohnung 1	Mittelwert	20.4	33	46	0	47
Unterägeri	Wohnung 1- 1.OG	24.8	0	31	49	42
Unterägeri	Wohnung 2 - 1.OG	24.2	0	36	31	46
Unterägeri	Wohnung 3 - 2.OG	22.6	0	28	56	33
Unterägeri	Wohnung 4 - 2.OG	23.3	0	35	21	42
Unterägeri	Wohnung 5 - Attika	22.3	25	27	54	31
Unterägeri	Mittelwert	23.4	5	31	42	39
Magnusstrasse	Wohnung 3 - 2.OG	22.5	1	34	42	40

Tabelle 5-2 : Zusammenstellung der Komfortwerte in der Heizperiode von Oktober 2003 bis März 2004 [Komfort Winter.xls].

Ort	Zimmer	Mittelwert Raumluft- temperatur [°C]	Raumluft- temperaturen über 26 °C [% der erfassten Stunden]	Mittelwert Rel. Raumluft- feuchtigkeit [%r.F.]	Rel. Raumluft- feuchtigkeit unter 30 % r.F. [% der erfassten Stunden]
Rapperswil	Büro 1 - EG	26.9	75	42	12
Rapperswil	Büro 2 - 1.OG	28.1	86	32	32
Rapperswil	Wohnung 3 - 1.OG	26.5	49	k.A.	k.A.
Rapperswil	Wohnung 4 - 1.OG	25.3	43	k.A.	k.A.
Rapperswil	Wohnung 5 - Attika	25.5	45	45	10
Rapperswil	Wohnung 6 - Attika	25.0	32	k.A.	k.A.
Rapperswil	Mittelwert	26.2	55	40	18
Stans Wohnung 1	Wohnen - EG	24.3	23	52	0
Stans Wohnung 1	Eltern - OG	23.8	10	50	0
Stans Wohnung 1	Büro - EG	24.4	29	49	0
Stans Wohnung 1	Kind - OG	23.7	10	50	0
Stans Wohnung 1	Bad - OG	23.6	7	54	0
Stans Wohnung 1	Mittelwert	24.0	16	51	0
Unterägeri	Wohnung 1- 1.OG	25.4	32	46	9
Unterägeri	Wohnung 2 - 1.OG	26.0	55	49	0
Unterägeri	Wohnung 3 - 2.OG	23.8	10	45	12
Unterägeri	Wohnung 4 - 2.OG	25.2	40	44	8
Unterägeri	Wohnung 5 - Attika	26.1	47	40	19
Unterägeri	Mittelwert	25.3	37	45	10
Magnusstrasse	Wohnung 3 - 2.OG	24.9	31	40	21

Tabelle 5-3 : Zusammenstellung der Komfortwerte im Sommerhalbjahr von April 2003 bis September 2003[Komfort Sommer.xls].

Betrachtet man den Sommerfall in Rapperswil, so fällt auf, dass die durchschnittlichen Raumlufttemperaturen durchwegs über 26°C liegen. Während mehr als 75 % aller erfassten Stunden lag die Raumlufttemperatur in den Büros über 26°C. Die Unterschiede im sommerlichen Lüftungsverhalten zwischen Büro 1 (zusätzlich Fensterlüftung nachts) und Büro 2 (nur mechanische Lüftung) sind quantifizierbar. Angesichts der grossen nordseitigen Fensterflächen müssten auch dort Beschattungsvorrichtungen installiert werden.

Die Raumlufttemperaturen in den untersuchten Objekten lagen mehrheitlich recht deutlich über 20°C. Das Benutzerverhalten in Stans hatte zur Folge, dass die durchschnittlichen winterlichen Raumlufttemperaturen bei 20°C und die sommerlichen Raumlufttemperaturen bei rund 24°C lagen.

Aus den Tabellenwerten lassen sich die folgenden drei Schlüsse ziehen:

In den untersuchten Objekten liegen die Raumlufttemperaturen im Winter deutlich über 20 °C, im Sommer liegen sie mehrheitlich unter 26 °C und die winterlichen relativen Raumluftfeuchten sind häufig unter 30 %.

Relative Raumluftheute

Unterschreitungen der kritischen relativen Raumluftheute waren vor allem im Winter zu erwarten. Trockene Luft begünstigt den Transport von Viren durch Staubpartikel. Durch das Schwinden von Holz können sich Probleme mit Parkettböden und Holzdecken ergeben. Bei relativen Feuchten von über 60 % r.F. ergeben sich Probleme mit dem Wachstum von Mikroorganismen (z.B. Milben) [22]. Längere Überschreitungen dieses Werts sind allerdings in keinem Objekt zu verzeichnen gewesen. Im Winter sind Werte für die relative Feuchte von unter 30 % r.F. während über 50 % der Zeit keine Seltenheit. Das Passivhaus in Stans beweist, dass es möglich ist, ein behagliches Klima ohne negativen Einfluss auf die Energiebilanz zu erzielen. Allerdings bleibt festzuhalten, dass ohne den Einsatz von Feuchtepolstern und dem Trocknen von Wäsche in der Wohnung auch hier niedrige relative Feuchte zu registrieren gewesen wäre. Dass an zu trockener Raumluftheute aber nicht nur zu hohe Luftwechsel schuld sind, zeigt ein Blick auf die durchschnittlichen Raumluftheutemperaturen der anderen Passivhäuser. Jene mit zu tiefer Luftfeuchtigkeit weisen durchgehend erhöhte Raumluftheutemperaturen auf. Eine Reduktion der Raumluftheutemperatur auf 20 °C zöge in praktisch allen Fällen eine Erhöhung der Raumluftheute auf Werte von über 30 % r.F. nach sich. Dadurch würde nicht nur das Raumklima, sondern auch die Energiebilanz verbessert.

Im Sommer wird der kritische Wert für die relative Feuchte von 30 % selbst bei den problematischen Objekten nur noch vereinzelt unterschritten. Hier könnte der Grund beim hohen Luftwechsel liegen (vgl. Unterkapitel Luftwechsel). Allgemein werden 30 % r.F. an weniger als 20 % der erfassten Stunden registriert. Die relative Feuchte erreicht im Winterhalbjahr keine Werte über 60 %, was aufgrund der kontrollierten Lüftung zu erwarten war.

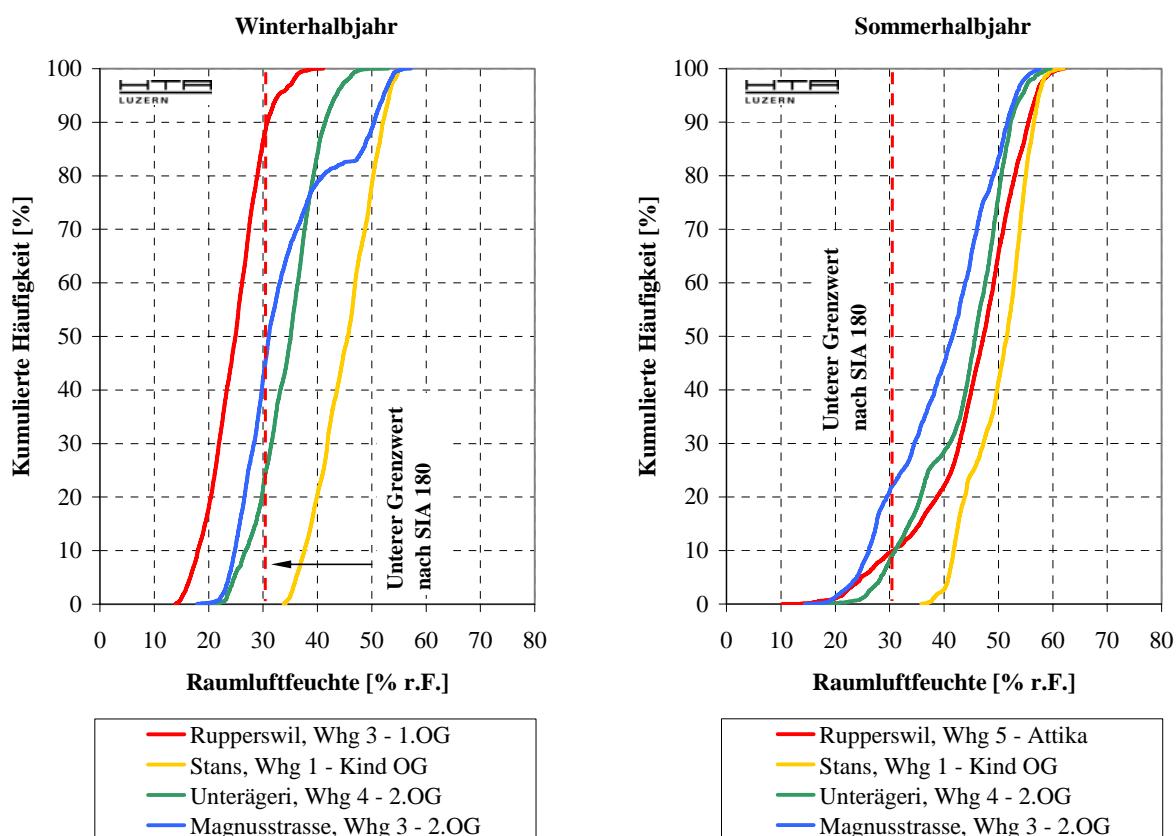


Abbildung 5-27 : Summenhäufigkeitsdiagramme der Temperatur [Komfort Winter.xls / Komfort Sommer.xls].

Rechnerische Korrektur der Raumluftfeuchte am Beispiel Rapperswil (Büro Obergeschoss)

Aufgrund der tiefen relativen Raumluftfeuchte und der hohen Raumlufttemperatur hat sich die Frage gestellt, welche Auswirkung eine tiefere realisierte Raumlufttemperatur haben würde. Hierzu wurde in der Heizsaison für jede Stunde die absolute Feuchte aus der Raumlufttemperatur, der Raumluftfeuchte und dem Luftdruck berechnet. Anschliessend wurde für eine definierte Raumlufttemperatur von 20 °C die resultierende Raumluftfeuchte berechnet. Diese Berechnungen wurden für zwei Heizsaisons durchgeführt und die erhaltenen Resultate in *Abbildung 5-28* in Form von Summenhäufigkeitsdiagrammen dargestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass die Stundenzahl mit relativer Feuchte unter 30 % reduziert werden kann. Es verbleiben aber immer noch 50 % aller Stunden mit Raumluftfeuchten unter 30 % r.F. - vor der Korrektur waren es 70 bis 80 %.

Infiltration oder aber ein zu hoher Luftwechsel können demzufolge in gleichem oder noch grösserem Mass dazu führen, dass die relative Raumluftfeuchte tiefe Werte annimmt. Leider wurde bis heute die Gebäudehülle nicht auf die Luftdichtheit getestet. Die Bilanz der Abluft- und Zuluft-Volumenströme ergibt, dass ein Überdruck resultiert, was eher für einen zu hohen Luftwechsel hindeuten würde. Etwas überraschend haben sich die Benutzer des Büros nicht über Diskomfort beklagt.

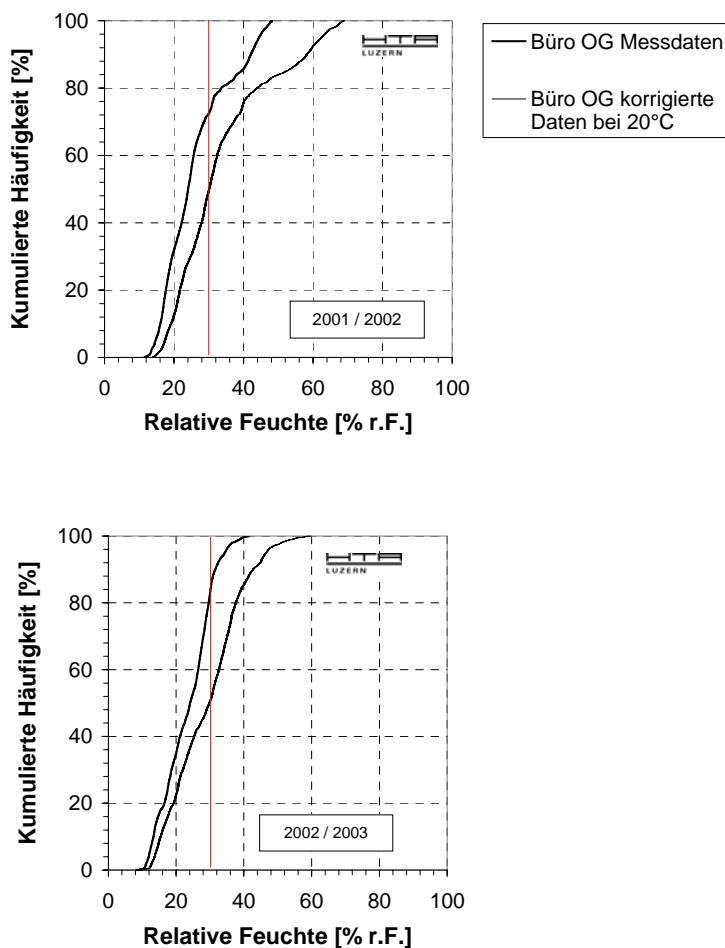


Abbildung 5-28 : Summenhäufigkeitsdiagramme der korrigierten Raumluftfeuchte [Korrektur relative Feuchte.xls].

Luftbefeuchtung mit Dampf

Der Problematik der tiefen Raumluftfeuchten muss gebührende Beachtung geschenkt werden. Die Bewohner können durchaus ein aktives Raumluftbefeuchtungssystem fordern oder installieren. Zur Befeuchtung bieten sich verschiedene Verfahren an. Verbreitet sind Dampflluftbefeuchter, adiabatische Befeuchter und Zerstäuber. Die Systeme sollen ökologisch als auch ökonomisch arbeiten. Zudem werden auch die hygienischen Aspekte immer wichtiger.

Anhand der erfassten raumluftklimatischen Daten wurde der energetische Aufwand einer aktiven Befeuchtung, die als Komponente des Lüftungssystems wirkt, abgeschätzt.

In Fachzeitschriften wird derzeit ein Dampflluftbefeuchter für den Einsatz in Passiv- und Niedrigenergiehäusern beworben. Er benutzt normales Leitungswasser und kann an das 230 V-Netz angeschlossen werden. Die Dampflluftbefeuchtung hat den Vorteil, dass der Dampf steril und somit hygienisch unbedenklich in den Raum eingebbracht werden kann. Nachteilig wirkt sich allerdings der Energieverbrauch durch die hohe Verdampfungsenthalpie des Wassers aus. Um 1 kg Wasser zu verdampfen muss eine Energie von 2250 kJ aufgewendet werden. Ein elektrischer Dampflluftbefeuchter weist bei einer Verdampferleistung von 1 kg pro Stunde also eine Leistungsaufnahme von rund 750 Watt auf.

Das zur rechnerischen Abschätzung betrachtete Gerät hat eine Befeuchterleistung von 2 kg/h bei einer elektrischen Anschlussleistung von 1.5 kW. Das Gerät ist mit einer Regelung ausgestattet, mit welcher sich die Raumluftfeuchte je nach Belieben in einem Bereich von 30 bis 70 % relativer Feuchte einstellen lässt.

	Energiebezugsfläche [m ²]	Median Raumlufttemperatur [°C]	Median Raumluftfeuchtigkeit [g/kg]	Zuluftmenge pro Gerät ¹⁾ [m ³ /h]
Im Wechsel, Stans	1250	20.3	7.2	1073
Im Bödeli, Unterägeri²⁾	91	22.6	4.9	150
Obermatt, Rapperswil	1068	24.5	5.1	1250
Magnusstrasse, Zürich³⁾	64.8	22.0	5.4	100

¹⁾ Bei dezentralen Lüftungsgeräten ist die Berechnung anhand der Daten eines Gerätes gemacht worden. Bei zentralen Geräten wurde die Berechnung über das ganze Gebäude gemacht

²⁾ Wohnung 2. OG rechts

³⁾ Wohnung 3. OG

Tabelle 5-4 : Ausgangsdaten zur Abschätzung des Energieaufwands zur Dampflluftbefeuchtung.

Als Berechnungsgrundlage dienen die Raumklimawerte von Stans, Unterägeri, Rapperswil und Zürich. Die Mediane der Raumlufttemperatur und der absoluten Raumluftfeuchte sind massgebend. Es wurde definiert, dass die Bewohner die eingestellte Raumlufttemperatur beibehalten wollen und die relative Raumluftfeuchte auf die Werte 30%, 45% und 60% erhöhen wollen. Da die Temperaturen teilweise deutlich über 20°C liegen, ergeben sich zwangsläufig sehr grosse Befeuchtungsmengen (Verdoppelung der absoluten Raumluftfeuchte). Die Berechnung mit dem Median nimmt Unterschreitungen von 50 % der Zeit in Kauf.

Raumluftkonditionierung 30% r.F.				
	Feuchtedifferenz für 30% r.F. [g/kg]	Dampfmenge für 30% r.F. [g/h]	Energieverbrauch extrapoliert ⁴⁾ [kWh]	Spezifischer Energieverbrauch [kWh/m ² EBF·a]
Im Wechsel, Stans	-2.6	Nicht nötig	Nicht nötig	Nicht nötig
Im Bödeli, Unterägeri ²⁾	0.5	80.2	286	3
Obermatt, Rapperswil	1.0	1345	4802	4
Magnusstrasse, Zürich ³⁾	-0.2	Nicht nötig	Nicht nötig	Nicht nötig

Raumluftkonditionierung 45% r.F.				
	Feuchtedifferenz für 45% r.F. [g/kg]	Dampfmenge für 45% r.F. [g/h]	Energieverbrauch extrapoliert ⁴⁾ [kWh]	Spezifischer Energieverbrauch [kWh/m ² EBF·a]
Im Wechsel, Stans	-0.2	Nicht nötig	Nicht nötig	Nicht nötig
Im Bödeli, Unterägeri ²⁾	3.2	539	1926	21
Obermatt, Rapperswil	4.0	5638	20129	19
Magnusstrasse, Zürich ³⁾	2.4	273	973	15

Raumluftkonditionierung 60% r.F.				
	Feuchtedifferenz für 60% r.F. [g/kg]	Dampfmenge für 60% r.F. [g/h]	Energieverbrauch extrapoliert ⁴⁾ [kWh]	Spezifischer Energieverbrauch [kWh/m ² EBF·a]
Im Wechsel, Stans	2.1	2619	9351	7
Im Bödeli, Unterägeri ²⁾	5.9	1003	3580	39
Obermatt, Rapperswil	7.1	9974	35606	33
Magnusstrasse, Zürich ³⁾	5.0	571	2039	31

⁴⁾ Der Energieverbrauch wurde berechnet aus der zur Einbringung der Dampfmenge benötigten elektrischen Leistung multipliziert mit der Halbjahresstundenzahl (4760h). Da zur Dampfmengeabschätzung der Median herangezogen wurde, und die Feuchteverteilung während der Heizsaison relativ gleichmäßig ist, ist dieses Vorgehen zulässig.

Tabelle 5-5 : Abschätzung des Energieaufwands für die Befeuchtung [Befeuchter.xls].

Die Abschätzung ergibt ein ernüchterndes Bild. Energetisch sind Dampfluftbefeuchter als ungünstig zu bewerten. Der spezifische Energieverbrauch bei Befeuchtung auf 60 % r.F. - bei gleicher Raumlufttemperatur - liegt bei drei von vier Objekten über dem spezifischen Energieverbrauch für die Heizung.

Aus der Perspektive der Primärenergie erhält dieser Umstand noch mehr Gewicht, da die Elektrizität mit dem Faktor 2 bis 3 gewichtet wird (vgl. Kapitel Primärenergie).

Definition von realitätsnahen Abluftzuständen für die Prüfung von Kompaktlüftungsgeräten

Die erhobenen Messdaten bezüglich Abluftfeuchte in Passivhäusern sind auch zur Definition der Prüfpunkte im Reglement zur Prüfung von Kompaktlüftungsgeräten herangezogen worden. An der HTA Luzern wird per Ende 2004 der Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte in Betrieb genommen. Damit Kompaktlüftungsgeräte bei möglichst realitätsnahen Bedingungen getestet werden können sollen die Abluftzustände von Passivhäusern in Funktion der herrschenden Aussenlufttemperatur eruiert werden.

Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) hat bereits eine Norm mit Prüfpunkten veröffentlicht. Nun hat sich aber gezeigt, dass diese Luftzustände für schweizerische Verhältnisse zu hoch gewählt sind, da eine Tendenz zu trockener Luft besteht. Die Raumluftfeuchte hängt sehr stark von den internen Feuchtequellen ab. In dicht belegten Wohnungen lagen die gemessenen absoluten Raumluftfeuchten 2 bis 3 g/kg höher als bei unterbelegten Wohnungen.

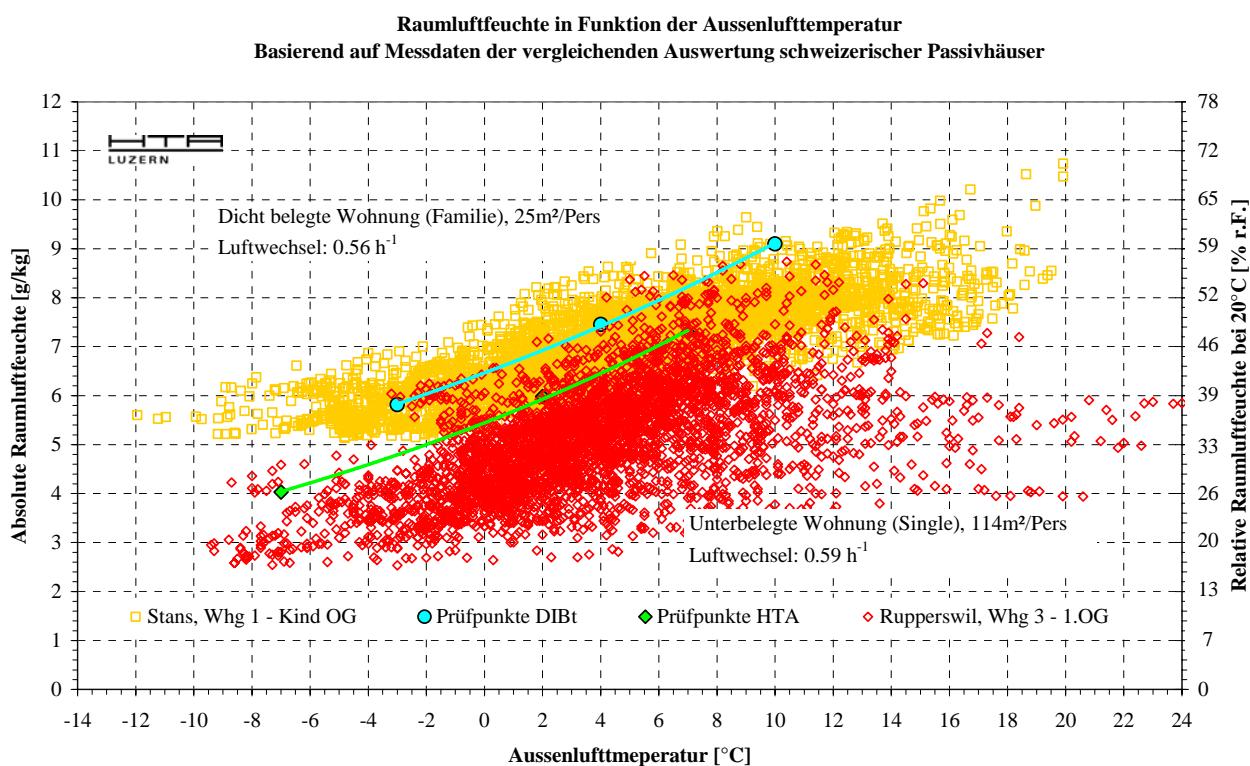


Abbildung 5-29 : Raumluftfeuchte in Funktion der Aussenlufttemperatur [Feuchtekorrelation.xls].

Die Messungen des Passivhausinstituts in Deutschland ergeben deutlich höhere relative Raumluftfeuchtigkeiten als in schweizerischen Passivhäusern. Unterschreitungen der 30 % r.F. Marke wurden in Deutschland nicht registriert. Aufgrund dieser Daten sind die Prüfpunkte des DIBt durchaus gerechtfertigt. Die relativen Raumluftfeuchten in den schweizerischen Passivhäusern sind - bedingt durch die Raumlufttemperaturen von über 20 °C - deutlich tiefer als in Deutschland. Ein Vergleich der Messresultate aus Deutschland und der Schweiz ist nicht ohne weiteres möglich, da die entsprechenden deutschen Raumlufttemperaturmesswerte nicht vorhanden sind. Eine Darstellung der absoluten Feuchte wie in Abbildung 5-29 würde diese Diskrepanz ausräumen.

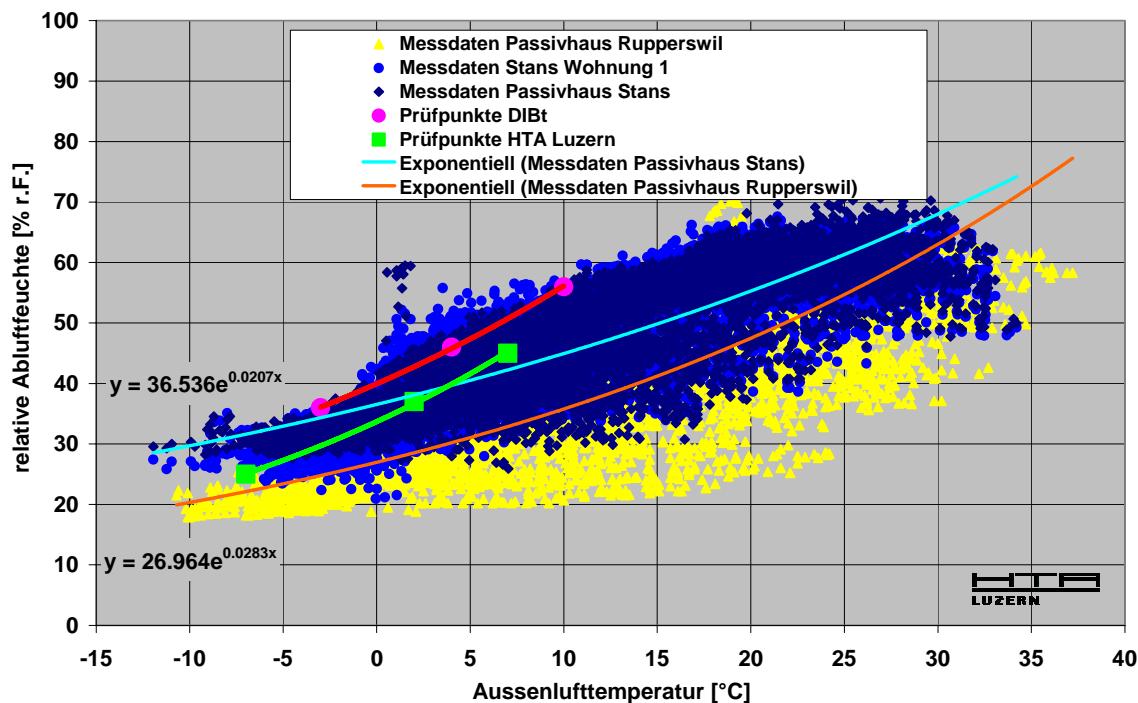


Abbildung 5-30 : Abluftfeuchte in Funktion der Aussenlufttemperatur aus Messungen HTA Luzern [Abluftfeuchten.xls].

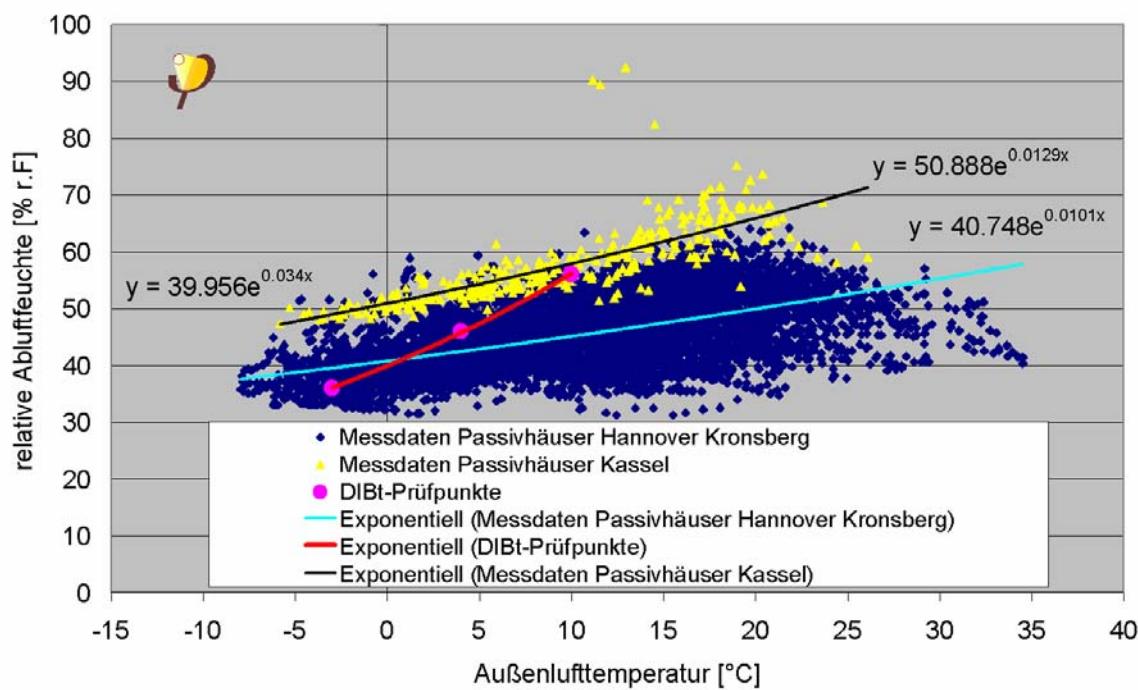


Abbildung 5-31 : Abluftfeuchte in Funktion der Aussenlufttemperatur aus Erhebungen des Passivhausinstitutes.

Raumlufttemperaturen

Die Raumlufttemperaturen sind im Winter, wie bereits erwähnt, meistens höher als 20 °C. Die Auslegungstemperatur der Heizung sowie die Standardtemperatur zur Berechnung des Heizwärmebedarfs liegen bei 20 °C. Erfahrungsgemäss wird diese Temperatur als kühl empfunden. Einzig das Gebäude in Stans erreicht Werte von ca. 20 °C. Dieser tiefe Wert bringt, aufgrund der zu erwartenden Temperaturschwankungen, Unterschreitungen der 20 °C Grenze mit sich. Diese Unterschreitungen können auch beabsichtigt sein. Sei es durch Temperaturabsenkung in der Nacht oder durch Stosslüften. Die anderen Gebäude weisen Durchschnittstemperaturen während der Heizsaison von 22.5 °C bis 24.5 °C auf. Diese Temperaturen werden gemäss der Theorie von *Fanger* während der Heizperiode als angenehm und angemessen betrachtet. Die Diskrepanz zwischen effektiver Raumlufttemperatur und in der Berechnung verwendeter Raumlufttemperatur schlägt sich in einem erhöhten Heizwärmeverbrauch nieder.

Im Sommerhalbjahr wurden in allen Gebäuden Raumlufttemperaturen von über 26 °C registriert. Die der Auswertung zu Grunde liegenden Daten stammen alle aus dem Jahrhundertsommer 2003. Da in diesem Sommer ungewöhnlich viele Hitzetage mit Aussenlufttemperaturen über 30 °C zu verzeichnen waren, sind diese Raumüberhitzungen nicht verwunderlich. Die Daten sind aufgrund der kumulierten Häufigkeit der Überschreitungen jedoch gut vergleichbar und überaus aufschlussreich. Dass sich hier grosse Unterschiede bemerkbar machen, ist dem stark unterschiedlichen Benutzerverhalten zuzuschreiben. Durch konsequentes Querlüften in der Nacht, sowie korrektes Betätigen des Sonnenschutzes - falls überhaupt vorhanden - lassen sich die Raumlufttemperaturen auch während eines heissen Sommers im erträglichen Rahmen halten. Die Möglichkeit der Benutzer, die Temperaturen durch diese Massnahmen zu beeinflussen, hängt natürlich wiederum direkt mit der Präsenz der Bewohner zusammen.

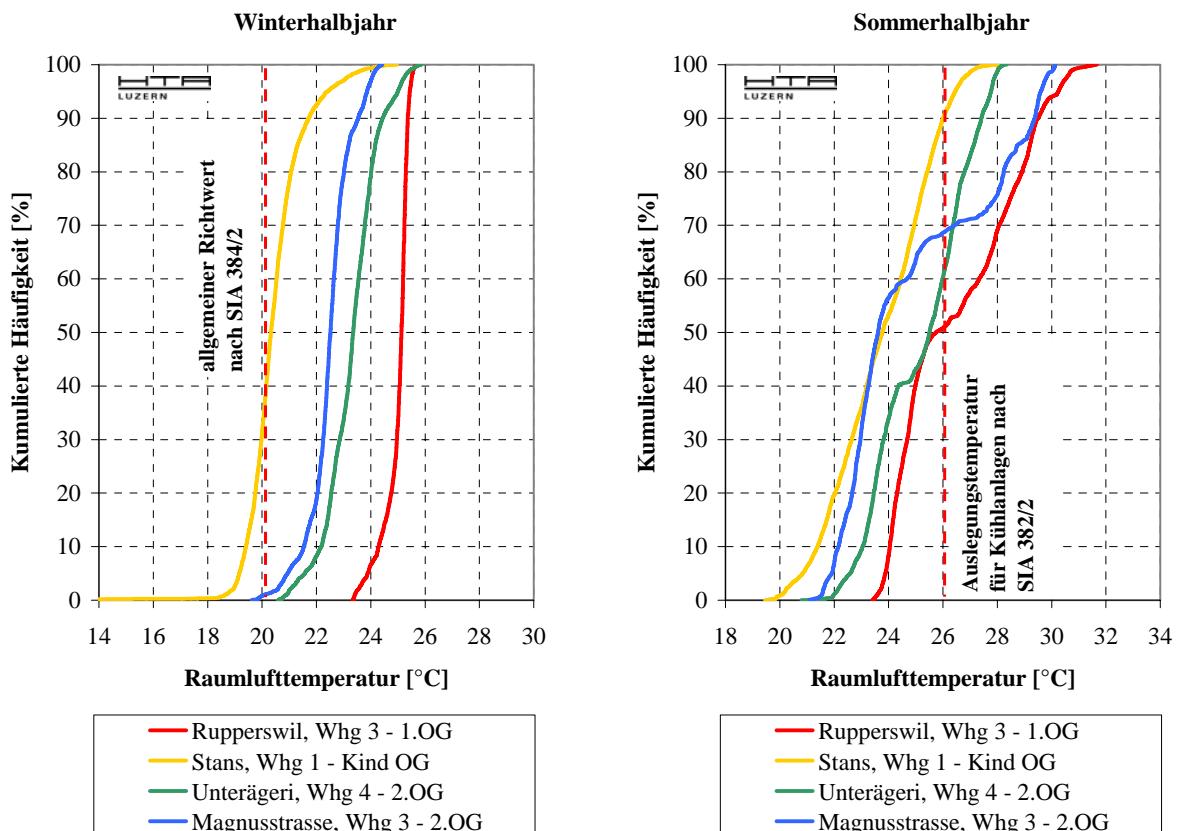


Abbildung 5-32 : Summenhäufigkeitsdiagramme der relativen Feuchte [Komfort Winter.xls / Komfort Sommer.xls].

Luftwechsel

Die Lüftungseinstellung steht wie bereits erwähnt im Zusammenhang mit der Raumluftfeuchte. Aus zu hohen Luftwechseln resultiert eine zu tiefe relative Raumluftfeuchte. Neben dem konventionellen Luftwechsel spielt auch die Belegung eine zentrale Rolle.

Objekt	Aussenluftrate pro Person geplant	Aussenluftrate pro Person effektiv	Abweichung Luftwechsel pro Person	Luftwechsel geplant	Luftwechsel effektiv	Abweichung Luftwechsel
	[(m ³ /h)/Person]	[(m ³ /h)/Person]	[%]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]	[%]
Stans 1	44	44	0	0.42	0.53	27
Stans 2 ¹⁾	36	36	0	0.42	0.43	2
Unterägeri ²⁾	40	59	50	0.41	0.45	10
Rapperswil	34	63	85	0.52	0.59	13

¹⁾ In Stans ist der Volumenstrom im Lauf der Messperiode reduziert worden (Stans 1 = 02.02 - 01.03, Stans 2 = 09.02 - 08.03)

²⁾ In Unterägeri wird der mittlere Luftwechsel aller Geräte berechnet

Tabelle 5-6 : Zusammenstellung der Lüftungseinstellungen [Lüftung Komfort.xls].

Dieser Zusammenhang lässt sich gut mit der Aussenluftrate pro Person aufzeigen. Je tiefer die Aussenluftrate pro Person, desto höher fällt die mittlere Raumluftfeuchte aus. Nach Pettenkoffer genügt je nach Tätigkeit eine Aussenluftrate zwischen 15 und 45 m³/h zur Gewährleistung der Lufthygiene. Ob allerdings die nötige Heizwärme bei sehr tiefen Volumenströmen noch in den Raum eingebracht werden kann, ist fraglich, da die Zulufttemperatur nicht beliebig erhöht werden kann.

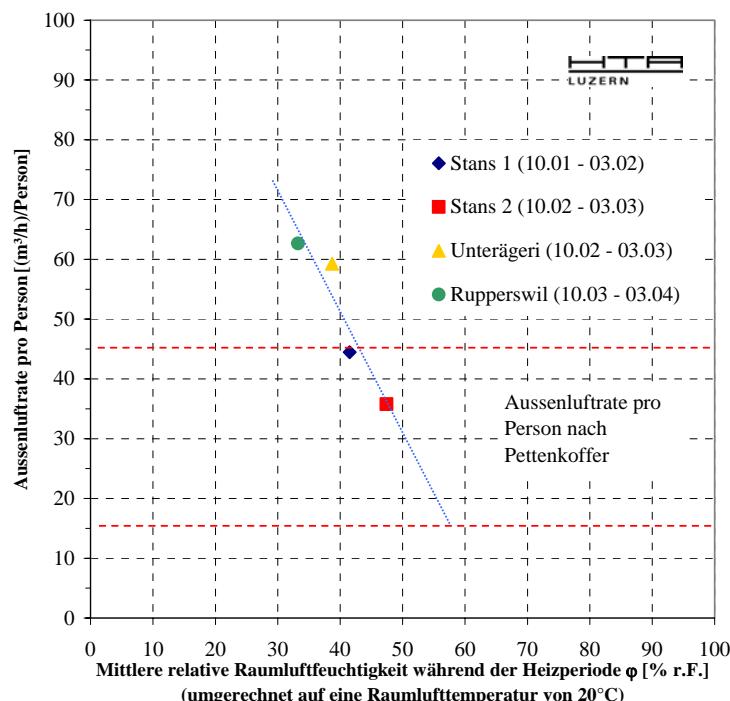


Abbildung 5-33 : Aussenluftrate pro Person in Funktion der mittleren Raumluftfeuchte [Lüftung Komfort.xls].

5.3 Gebäudetechnik

Heizungssysteme und Warmwasser

Objekt	Wärmeerzeugung	Zusattheizung	BWW System	Speicher	Solaranlage
Im Wechsel Stans	Pelletskessel Ökofen RE25 9...25 kW	Keine	Zentral mit Zirkulation	4500 l	Rüesch Terza 42 m ²
Im Bödeli Unterägeri	Flüssiggas- BHKW Ecopower 10 kW	Holzöfen* TWL AG Topolino	Zentral mit Zirkulation	3000 l	Schuppiser Cobra 15 m ²
Obermatt Rapperswil	Gastherme Elcotherm THR 5-21 kW	Keine	Zentral mit Zirkulation	800 l	Keine
Magnusstrasse Zürich	LW WP CTA Aeroheat 9a 9 kW	Holzöfen** TWL AG T-One	Zentral mit Zirkulation	2600 l	Soltop 16 m ²
Sunny Woods Zürich	LW WP Lexeta LW50N-I 3...5 kW	Keine	Zentral mit Zirkulation	1580 l	Swisspipe Modul 9 6 m ²
Rychenbergstrasse Winterthur	Pelletskessel Windhager PMX 150 5...10 kW	Keine	Zentral mit Zirkulation	1750 l	Solar- Fassade 59 m ²

Tabelle 5-7 : Übersicht der gebäudetechnischen Anlagen für Heizung und Warmwasser.

* Holzöfen müssen nicht zwingend betrieben werden

** Holzöfen müssen ab Temperaturen von -2°C betrieben werden

Lüftungssysteme und Photovoltaik

Objekt	Lüftung	Volumenstrom	WRG System	Lufterdregister	Photovoltaik
Im Wechsel Stans	Mehrwohnungs- anlage Seven Air Habitus	1380 m ³ /h (Zuluft)	2 x PWT	PE Rohr Ø 200 mm 4.25 m	Nein
Im Bödli Unterägeri	Einzelwohnungs- anlage Paul WRG 150 DC	150 m ³ /h (ca. pro Gerät)	PWT	PE Rohr Ø 200 mm 40 m	Nein
Obermatt Rapperswil	Mehrwohnungs- anlage Seven Air	1250 m ³ /h (Zuluft)	RWT	HDPE Rohr Ø 200 mm 5.60 m	Nein
Magnusstrasse Zürich	Einzelwohnungs- anlage Maico WRG 300 Plus	100 m ³ /h (ca. pro Gerät)	PWT	Nein	Nein
Sunny Woods Zürich	Einzelwohnungs- anlage Storkair G90-300	150 m ³ /h (ca. pro Gerät)	PWT	PE Rohr Ø 200 mm 20...25 m	Unisolar US32 6 2688 Wp
Rychenbergstrasse Winterthur	Mehrwohnungs- anlage Seven Air MKG 3.2	870 m ³ /h (Zuluft)	PWT	PE Wellrohr Ø 200 mm 3.30 m	Nein

Tabelle 5-8 : Übersicht der gebäudetechnischen Anlagen für Lüftung und Photovoltaik.

Erkenntnisse über die Haustechnik

Es wurden bei den abgeschlossenen Erfolgskontrollen bereits einige Aspekte erkannt, die für den Planungsprozess bei Passivhäusern relevant sind:

Wärmeerzeugung

Klein - Blockheizkraftwerke in Passivhäusern in Verbindung mit einer Solaranlage sind kritisch zu hinterfragen. Eine Fallstudie in der Erfolgskontrolle Unterägeri [3] hat gezeigt, dass ein Klein - BHKW durch einen kondensierenden Gaskessel ersetzt werden könnte, was auf den Primärenergieverbrauch keinen negativen Einfluss haben würde. Die durch einen besseren Wirkungsgrad eingesparte Gasmenge macht die ins Netz zurückgespiesene elektrische Energie wett. Eine kondensierende Gastherme würde zudem billiger und Platz sparer ausfallen.

Bei Wärmepumpen hat sich gezeigt, dass die Solarkollektoren die Wärmepumpen vor allem in der Übergangszeit stark konkurrenzieren. Aus dieser Tatsache resultiert eine unerwartet schlechte Jahresarbeitszahl von deutlich unter 3. Der Effekt der tiefen Jahresarbeitszahl wird zusätzlich verstärkt durch das relativ hohe Temperaturniveau des Heizungsvorlaufs. Dieses hohe Niveau ist bedingt durch die Luftheizung. Tiefere Vorlauftemperaturen würden höhere Luftwechsel erfordern, welche die bereits vorhandenen tiefen Raumluftfeuchten noch ausgeprägter ausfallen lassen würden.

Lüftung

Problematisch wirken sich Leckagen beim Lüftungssystem aus. Die Gründe liegen hier meist bei unsauberer Installation. Zudem wurde festgestellt, dass nicht wärmegedämmte Luftverteilleitungen kritisch sind. Bei Luftheizungen ist unbedingt darauf zu achten, dass die berechneten Zulufttemperaturen am Auslass auch erreicht werden. Die Luftheritzer wurden bei einem Passivhaus nicht auf das Temperaturniveau von Luftheizungen angepasst und waren strömungstechnisch ungünstig eingebaut worden. Erhöhte Leistungsaufnahmen - bedingt durch grösseren Druckverlust als geplant - sind bei Lüftungsgeräten nichts Ungewöhnliches. Zu tiefe relative Feuchte hat Auswirkungen auf den Komfort der Benutzer und den Betrieb von Abluft - Wärmepumpen. Das Haustechnikkonzept hat allerdings keinen grossen Einfluss auf die tiefen Werte. Die Gründe hierfür sind eher im Benutzerverhalten zu suchen.

Bei den zentralen Lüftungsgeräten sind allgemein schlechtere Werte für die spezifische Leistung zur Luftförderung zu verzeichnen. Teilweise liess sich das Problem durch bessere Ventilatormotoren beheben. Trotzdem liegt der Mittelwert für die spezifische Leistung zur Luftförderung bei den zentralen Geräten mit 0.6 Wh/m^3 über 15 Prozent höher als derjenige von dezentralen Geräten (0.5 Wh/m^3). Grundsätzlich liegen aber die Werte aller Geräte weit entfernt vom Zielwert von 0.2 Wh/m^3 den [13] definiert. Es muss aber auch festgehalten werden, dass sich die Planer an die damals geltenden Empfehlungen des Passivhausinstitutes von 0.4 Wh/m^3 gehalten haben. Im Vergleich zu den anderen Passivhäusern fallen die für Rapperswil registrierten Werte deutlich schlechter aus. Die gewählte Kombination von Frequenzumrichtern und Konstantvolumenstromreglern wird bei dieser Anlagengrösse als ungünstig erachtet. Der Wirkungsgrad des Frequenzumrichters ist bei dieser Leistungsgrösse schlecht und der Druckabfall über die Konstantvolumenstromregler zu gross. Hinzu kommt, dass die Ventilatoren Keilriemenantriebe haben.

5.4 Energieverbrauch

5.4.1 Elektrizität

Bei allen Passivhäusern standen Messdaten aus einer einjährigen Periode beginnend im Sommer 02 zur Verfügung. Die angegebenen Werte beinhalten auch die Lüftungsenergie.

Objekt	$E_{EL, \text{Wohnen}}$ [kWh/a]	$E_{EL, \text{Allgemein}}$ [kWh/a]	$E_{EL, \text{Haushalt}}$ [kWh/a]	$e_{EL, \text{Haushalt}}$ [kWh/m ² _{EBF} ·a]	$P_{P, \text{El. Haushalt}}$ [W/Pers]	Belegung [Pers/Whg.]
Im Wechsel, Stans	16036	11490	27527	22.0	105	3.8
Obermatt, Rupperswil	22435	9635	32070	29.7	183	2.0
Magnusstrasse, Zürich	6725	1404	8129	17.1	155	1.5
Im Bödli, Unterägeri	15462	2837	18299	26.3	174	2.4
Rychenbergstrasse, Winterthur	18205	4605	22810	25.6	260	1.7
Sunny Woods, Zürich	0	k.A.	k.A.	24.5	216	3.0

Tabelle 5-9 : Zusammenstellung des Elektrizitätsverbrauchs [Elektrische Energie.xls].

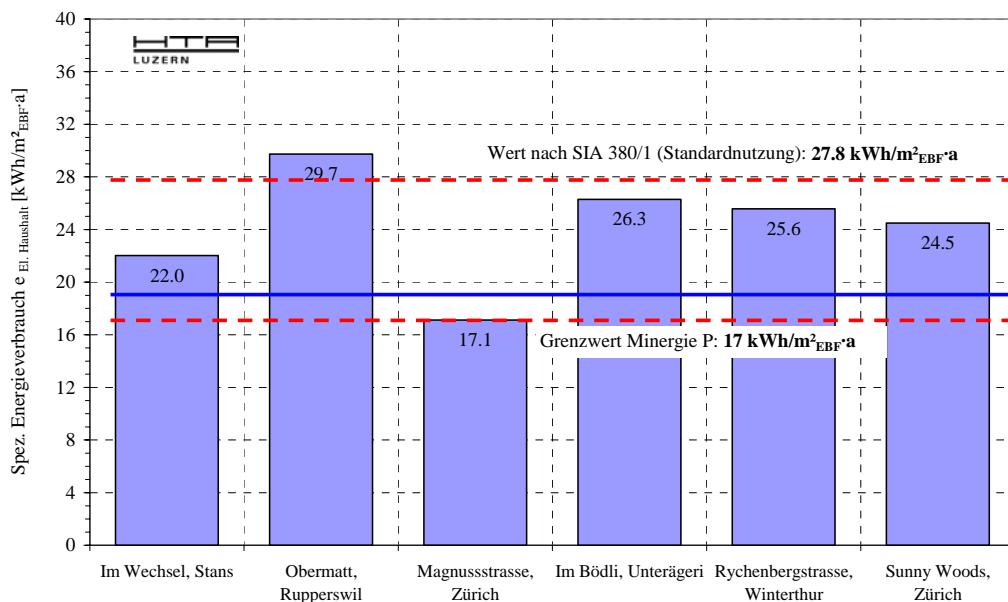


Abbildung 5-34 : Spezifischer Elektrizitätsverbrauch Haushalt [Elektrische Energie.xls].

Bezogen auf die Energiebezugsfläche liegt der Grenzwert für den Verbrauch an elektrischer Energie nach Minergie®-P bei 17 kWh/m²·a. Er beinhaltet den gesamten Elektrizitätsverbrauch innerhalb der Systemgrenzen des Gebäudes, also auch den allgemeinen Elektrizitätsverbrauch. Nicht mitgerechnet wird die Elektrizität zur Warmwassererzeugung, Heizung und Lüftung. Der Wert nach SIA 380/1 ist als Verbrauch bei Standardnutzung definiert.

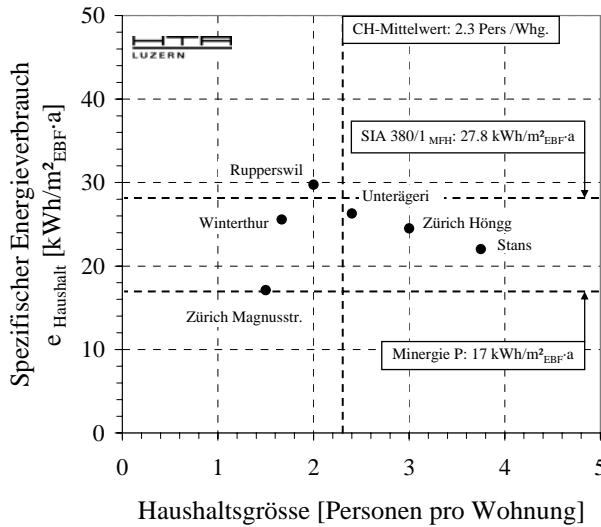


Abbildung 5-35: Energieverbrauch in Funktion der Belegungsdichte [Elektrische Energie.xls]

In allen untersuchten Objekten ist bezüglich des personenbezogenen Elektrizitätsverbrauchs für Wohnen die Differenz zwischen den grössten und dem kleinsten Werten innerhalb eines Objekts ausgeprägt und objektweise sehr verschieden (Tabelle 5-10).

Objekt	Faktor
Stans (Im Wechsel)	4.9
Winterthur (Rychenbergstrasse)	4
Rapperswil (Obermatt)	3.8
Zürich (Magnusstrasse)	2.9
Unterägeri (Im Bödli)	2.5
Zürich Höngg (Sunny Woods)	1.3

Tabelle 5-10: Faktor zwischen grösstem und kleinstem personenbezogenen Elektrizitätsverbrauch für Wohnen.

Hier zeigt sich wiederum, dass das Benutzerverhalten einen sehr grossen Einfluss auf den Elektrizitätsverbrauch hat. Es ist zu beachten, dass die Belegung in den Objekten unterschiedlich ist, wie dies aus Abbildung 5-35 hervorgeht.

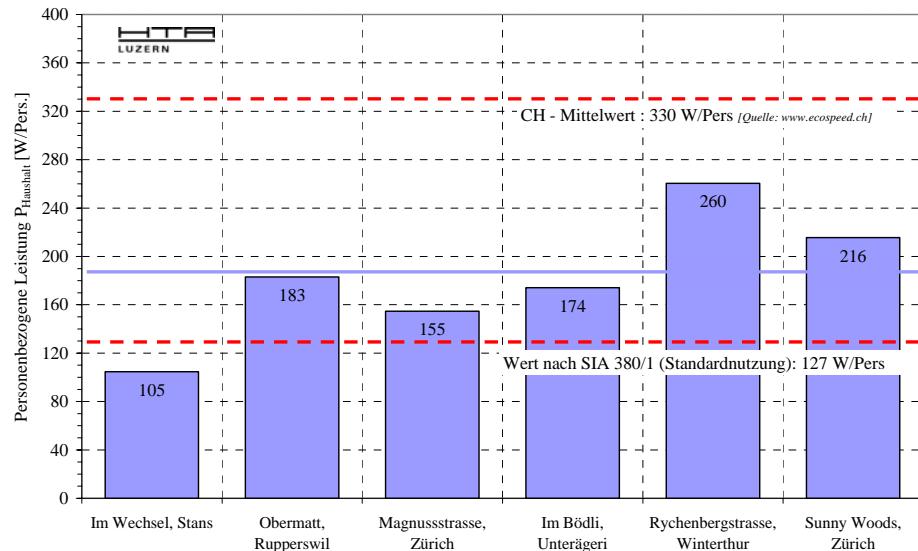


Abbildung 5-36 : Personenbezogene Leistung Haushalt [Elektrische Energie.xls].

Der aus dem Elektrizitätsverbrauch für das Wohnen berechnete personenbezogene Leistungsverbrauch fällt bei allen Passivhäusern deutlich tiefer aus als der schweizerische Durchschnitt. Die sehr tiefen Werte resultieren vermutlich aus dem konsequenten Einsatz von Haushaltsgeräten der Energieeffizienzklasse A oder A+. Zudem kann eine überdurchschnittliche Belegungsdichte den Wert stark reduzieren.

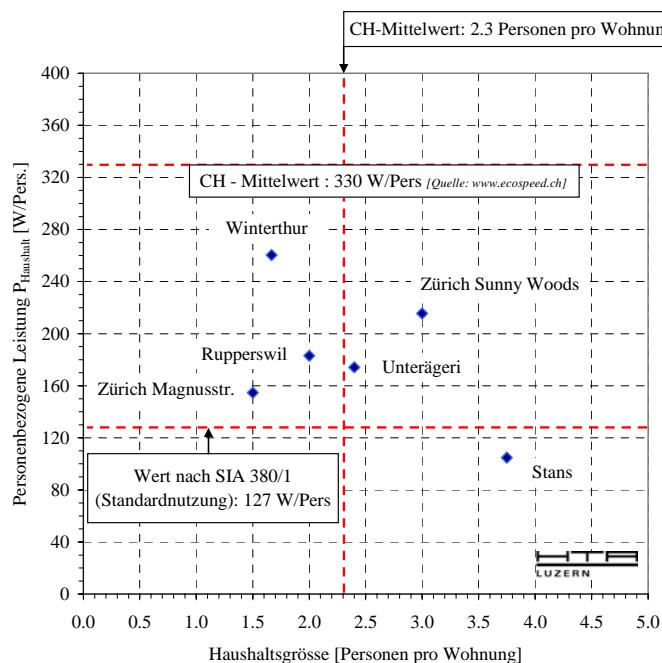


Abbildung 5-37 : Personenbezogene Leistung Haushalt in Abhängigkeit der Haushaltsgröße. [Elektrische Energie.xls]

5.4.2 Elektrizität für die Lüftung und für die Luftförderung

An den beiden zentralen Lüftungsgeräten der Passivhäuser Stans und Winterthur wurden im Laufe des Betriebs Optimierungen vorgenommen. Daher werden hier zwei Datensätze unterschieden. Beim Lüftungsgerät in Stans wurde der Volumenstrom vor der zweiten Messperiode (Stans 2) reduziert, was zu einer Verbesserung des Kennwerts „Elektrizität für die Lüftung“ geführt hat. Durch die Volumenstromreduktion hat sich der Kennwert „Elektrizität für die Luftförderung“ verschlechtert. In Winterthur wurde der Ventilatormotor ersetzt, was zu einer deutlichen Verbesserung beider Kennwerte geführt hat.

Objekt	Periode	Gerät	P_P Lüftung [W/Pers]	P_A Lüftung [W/m ² EBF]	$e_{Lüftung}$ [kWh/m ² EBF·a]
Stans 1	02.02 - 01.03	Zentral	21.4	0.52	4.5
Stans 2	09.02 - 08.03	Zentral	16.8	0.44	3.5
Winterthur 1	06.00 - 03.01	Zentral	84.0	0.94	8.2
Winterthur 2	04.01 - 08.01	Zentral	52.6	0.59	5.2
Rapperswil	11.01 - 10.02	Zentral	40.6	0.76	6.7
Zürich Magnusstr. 1	10.02 - 03.03	Dezentral	18.4	0.43	2.9
Zürich Magnusstr. 2	10.02 - 03.03	Dezentral	11.9	0.42	3.2
Zürich Magnusstr. 3	10.02 - 03.03	Dezentral	20.5	0.44	2.7
Zürich Magnusstr. 4	10.02 - 03.03	Dezentral	23.8	0.49	3.2
Unterägeri	07.02 - 06.03	Dezentral	22.7	0.75	6.5
Objekt	Periode	q_v Mittel [m ³ /h]	$P_{Lüftung}$ [W]	$E_{Lüftung}$ [kWh/a]	$P_{Lüftung}$ [Wh/m ³]
Stans 1	02.02 - 01.03	1334	646	5628	0.48
Stans 2	09.02 - 08.03	1073	556	4408	0.52
Winterthur 1	06.00 - 03.01	810	840	7358	1.04
Winterthur 2	04.01 - 08.01	810	526	4605	0.65
Rapperswil	11.01 - 10.02	1253	812	7109	0.65
Zürich Magnusstr. 1	10.02 - 03.03	62	24	162	0.38
Zürich Magnusstr. 2	10.02 - 03.03	68	28	208	0.40
Zürich Magnusstr. 3	10.02 - 03.03	65	29	179	0.44
Zürich Magnusstr. 4	10.02 - 03.03	85	32	208	0.38
Unterägeri	07.02 - 06.03	140	68	596	0.49

Tabelle 5-11: Zusammenstellung des Lüftungskennwerte [Lüftungsenergie.xls].

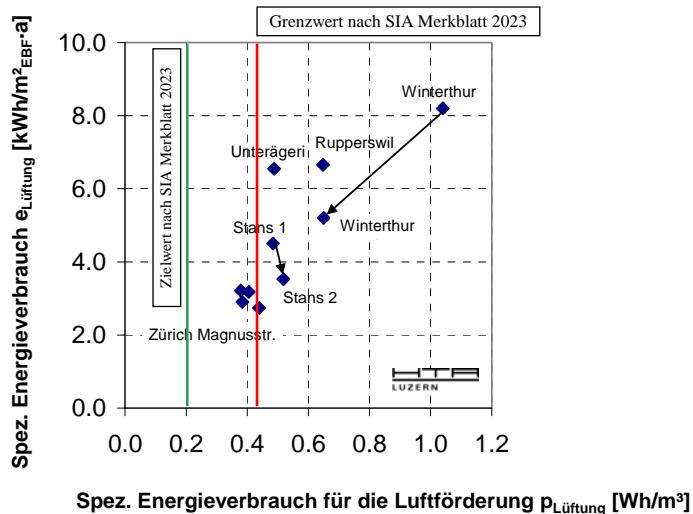


Abbildung 5-38: Kennzahlen für den spezifischen Energieverbrauch der Lüftung bzw. der Luftförderung [Lüftungsenergie.xls].

Die im SIA Merkblatt 2023 [13] definierten Ziel- und Grenzwerte für den spezifischen Energieverbrauch zur Luftförderung werden in den untersuchten Passivhäusern mehrheitlich nicht erreicht (Abbildung 5-38).

Sowohl in Stans als auch in Winterthur wurden nachträglich Verbesserungsmassnahmen zur Senkung des Lüftungsenergieverbrauches realisiert:

In Winterthur konnte durch Einsatz von besseren Motoren der Energieverbrauch für die Luftförderung um 38 % gesenkt werden. Deutliche Reduktionen des spezifischen Energieverbrauchs zur Luftförderung und des spezifischen Energieverbrauchs Lüftung konnten in der Folge registriert werden.

In Stans konnte der spezifische Energieverbrauch Elektrizität Lüftung durch die Reduktion des Luftvolumenstroms ebenfalls gesenkt werden. Der Energieverbrauch für die Lüftung konnte um 22 % gesenkt werden. Eine gleichzeitige leichte Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs zur Luftförderung wurde in der Folge registriert.

Bei Sunny Woods wurde der Energieverbrauch Elektrizität Lüftung nicht separat erfasst, somit lassen sich hierzu leider keine Aussagen machen.

Die besten Werte könnten im Passivhaus im Umbau an der Magnusstrasse verzeichnet werden. Hier wird zumindest der Grenzwert von 0.42 Wh/m³ erreicht.

In Unterägeri fällt der vergleichsweise hohe Wert für den spezifischen Energieverbrauch der Lüftung auf. Hingegen wurde ein im Quervergleich guter Wert für den spezifischen Energieverbrauch für die Luftförderung erzielt.

Im Vergleich zu den anderen Passivhäusern fallen die für Rapperswil registrierten Werte deutlich schlechter aus. Die gewählte Kombination von Frequenzumrichtern und Konstantvolumenstromreglern wird bei dieser Anlagengröße als ungünstig erachtet. Der Wirkungsgrad des Frequenzumrichters ist bei dieser Leistungs-

grösse schlecht und der Druckabfall über die Konstantvolumenstromregler zu gross. Hinzu kommt, dass die Ventilatoren Keilriemenantriebe haben.

Eine neuere Untersuchung [20] hat ergeben, dass bei 20 Bauten im Minergie®-Standard der Mittelwert für den spezifischen Elektrizitätsverbauch der Lüftung bei $3.2 \text{ kWh/m}^2_{\text{EBF}} * \text{a}$ liegt, dies bei einem Median-Wert von $2.3 \text{ kWh/m}^2_{\text{EBF}} * \text{a}$. Diese Werte liegen teilweise deutlich unter den in Abbildung 5-38 abgebildeten Messwerten aus den P+D Erfolgskontrollen. Es erscheint plausibel, dass in den untersuchten Passivhaus-Objekten die Druckverluste in den Luft-Verteilnetzen zu gross sind und dass der raumspezifische Aussenluftvolumenstrom von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ aus energetischer Sicht zu hoch ist. Da in Minergie®/Minergie® P- und Passivhaus-Gebäuden die gleichen Lüftungsgerätetypen zum Einsatz kommen, sind einerseits der Druckverlust des Luftheritzers und andererseits der höhere raumspezifische Aussenluftvolumenstrom letztendlich beim Elektrizitätsverbrauch für die Luftförderung spürbar.

Das Merkblatt des BFE [12] ordnet die Lüftungsgeräte je nach spezifischem Energieverbrauch einer von 5 Kategorien zu.

Kategorie	$p_{\text{Lüftung}}$ [Wh/m ³]
1	< 0.28
2	0.28 - 0.42
3	0.42 - 0.69
4	0.69 - 1.11
5	> 1.11

Tabelle 5-12 : Kategorien für Lüftungsgeräte nach [12]

Neue Anlagen sollen mindestens die Anforderung der Kategorie 2 erfüllen. Das SIA Merkblatt [13] erlaubt für Lüftungsgeräte ebenfalls ein Maximum von 0.42 Wh/m^3 . Der Grenzwert für den Wert von $p_{\text{Lüftung}}$ ist also in beiden Publikationen auf den gleichen Wert fixiert.

Von den untersuchten zehn Geräten, davon drei im Passivhaus im Umbau Zwinglistrasse Zürich, auf das in der vergleichenden Auswertung nicht eingegangen wird, da die P+D Erfolgskontrolle noch nicht abgeschlossen wurde, erreichten nur die Hälfte Leistungszahlen unterhalb des Grenzwerts. Bei den Geräten, welche den Grenzwert unterschreiten, handelt es sich ausschliesslich um dezentrale Geräte. Die Resultate der drei betrachteten zentralen Geräte sind ernüchternd. In allen Fällen konnte der Grenzwert klar nicht erreicht werden. Die Abweichung betrug jeweils mindestens 15 %. Keines der Geräte, ob zentral oder dezentral, konnte den Zielwert nach SIA respektive die Klasse 1 nach BFE erreichen

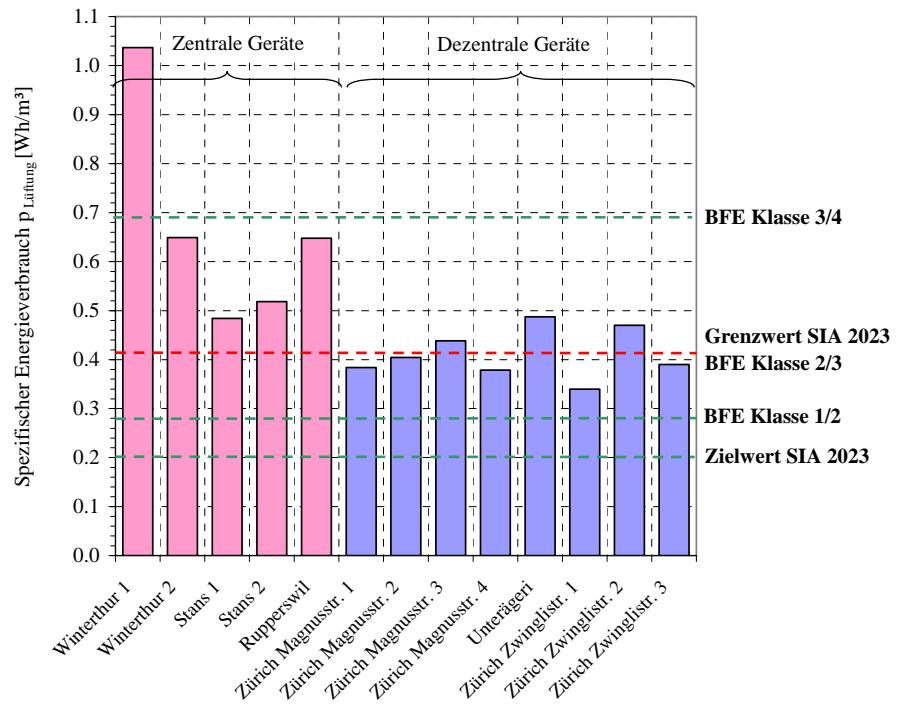


Abbildung 5-39 : Spezifischer Energieverbrauch für die Luftförderung [Luftungsenergie.xls].

5.4.3 Heizung und Warmwasser

Der Vergleich in *Tabelle 5-13* zeigt einerseits grosse Differenzen unter den einzelnen Gebäuden. Die Kennzahlen weichen um Faktoren grösser zwei voneinander ab. Andererseits unterbietet etwas überraschend kein einziges Objekt den Passivhaus-Grenzwert von 15 kWh/m²a. Die Abweichung beträgt überall mehr als 20 %. Eine Erklärung für den erhöhten Heizenergieverbrauch und den geringen Warmwasserverbrauch liefert die tiefe Belegung in den untersuchten Passivhäusern.

Objekt	q_h [kWh/m ² _{EBF} ·a]	q_{WW} [kWh/m ² _{EBF} ·a]	q_h/q_{WW} [-]	$P_{P\ h+WW}$ [W/Pers]	$q_{h\ P}$ [kWh/m ² _{EBF} ·a·P]
Im Wechsel, Stans	15.0	15.5	0.96	145.0	0.50
Im Bödeli, Unterägeri	20.1	10.1	1.98	200.2	1.68
Obermatt, Rapperswil	31.9	13.8	2.31	278.6	1.60
Magnusstrasse, Zürich	24.6	12.9	1.90	339.6	4.11
Sunny Woods, Zürich	27.5	13.8	2.00 *	363.0	1.53
Rychenbergstrasse, Winterthur	19.8	12.2	1.63	325.8	1.98

* Angenommener Wert $q_h = 2 \cdot q_{WW}$ (Wert aus Schlussbericht: $q_{h+WW} = 51.6 \text{ kWh/m}^2\text{EBF}\cdot\text{a}$)

Angenommener Wert für Speicher- und Verteilverluste = 20%

Tabelle 5-13 : Zusammenstellung der Energiekennzahlen für Heizung und Warmwasser [Heizen.xls].

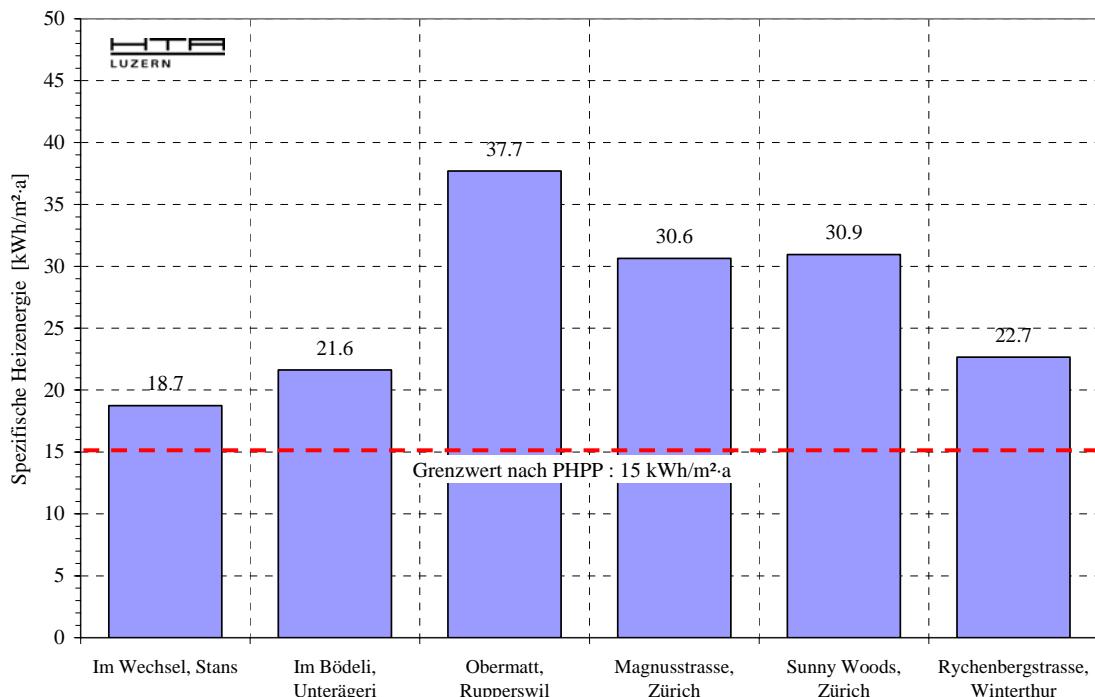


Abbildung 5-40 : Heizenergieverbrauch mit dem Grenzwert nach Passivhaus-Institut Darmstadt. [Heizen.xls].

Die Resultate führen zum Schluss, dass die Anforderungen des Passivhaus-Instituts hoch sind und das Benutzerverhalten einen sehr grossen Einfluss auf den Heizenergieverbrauch hat. Bei zu tiefer Belegung und zu geringer Präsenz fehlen die notwendigen internen Lasten. Diese müssen durch das Heizsystem kompensiert werden. Bei den untersuchten Passivhäusern konnte das Heizsystem infolge Überdimensionierung die fehlenden internen Lasten problemlos kompensieren. Einzig in Stans ergaben sich auf Grund von Planungs- und Installationsfehlern in vereinzelten Wohneinheiten Probleme. Schlussendlich wurden in den Passivhäusern die vorab erwähnten 22 bis 23 °C registriert. Die Diskrepanzen sind auf der Primärenergeseite nicht so deutlich ausgefallen oder waren gar nicht vorhanden.

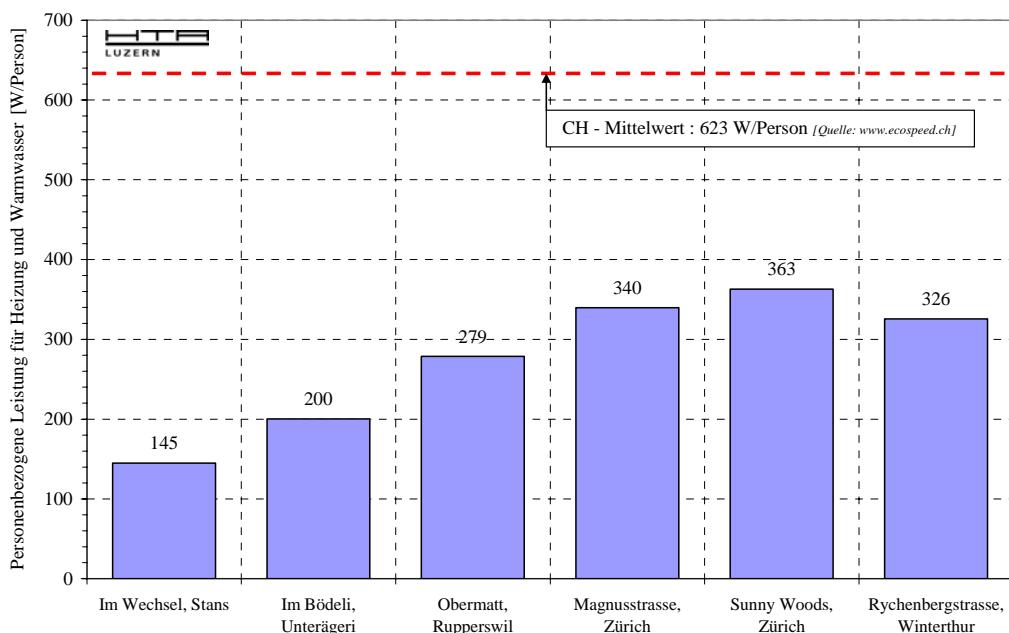


Abbildung 5-41 : Personenbezogene Leistung für Heizung und Warmwasser [Heizen.xls]

Der personenbezogene Leistungsverbrauch für Heizen und Warmwasser liegt im schweizerischen Durchschnitt bei 733 Watt [11]. Dieser Wert bezieht sich auf die verbrauchte Endenergie, die mit Wirkungsgraden behaftet ist. Um eine vergleichbare Grösse zu erhalten, wird zur Erzeugung von Heizwärme und Warmwasser ein Wirkungsgrad von 85 % angenommen. Der schweizerische Durchschnittswert reduziert sich mit dieser Korrektur auf 623 Watt pro Person und wird in allen Passivhäusern deutlich unterboten. Die persönliche Energiebilanz der Bewohner für Heizung und Warmwasser liegt damit - zumindest auf der Heizenergeseite- trotz des Nichteinhalts des Passivhausstandards 40 bis 80 % unter dem schweizerischen Durchschnitt.

Warmwasserspeicherung und Verteilung

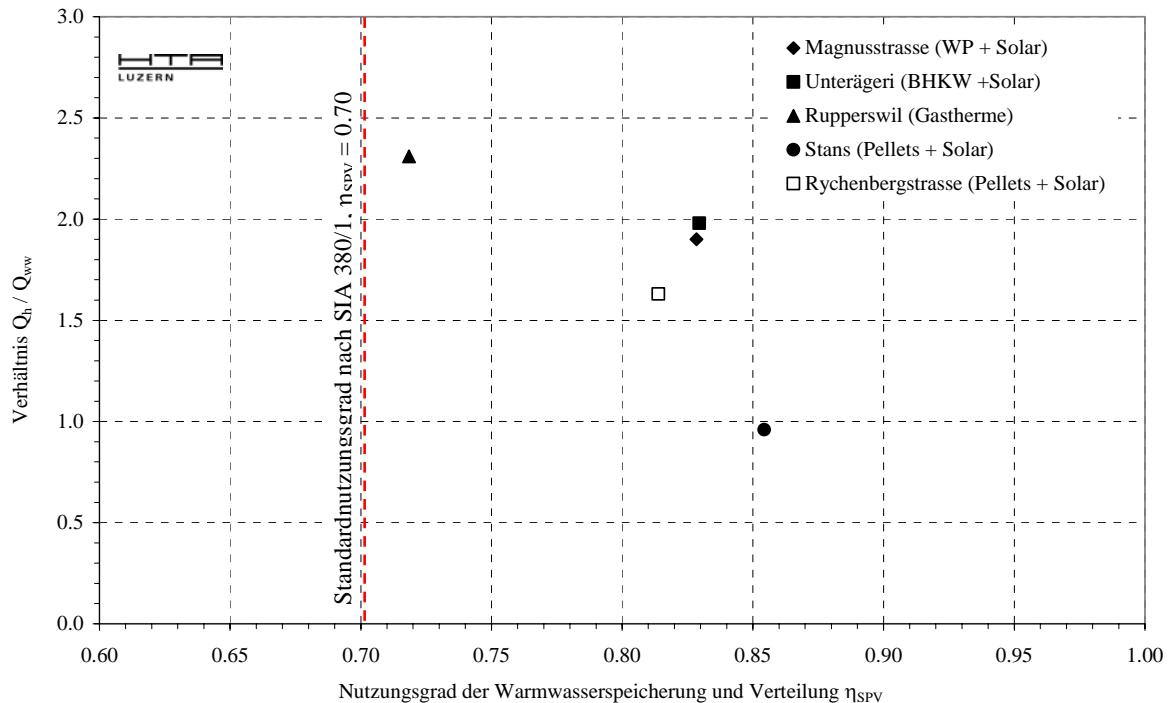


Abbildung 5-42 : Verhältnis Q_h/Q_{WW} in Funktion des Nutzungsgrads η_{SPV} [Warmwasserverhältnis.xls]

Die SIA-Norm 380/1 definiert einen Nutzungsgrad η_{hww} für kombinierte Heizungs- und Warmwasseranlagen. Dieser Nutzungsgrad ist abhängig vom Heiz- und Warmwasserenergieverbrauch (Q_h , Q_{WW}) sowie vom Nutzungsgrad der Warmwasserspeicherung und Verteilung (in der Norm durch den fixen numerischen Wert 0.70 dargestellt). Auch der Nutzungsgrad der Heizungsanlage η_h , welcher meistens durch Herstellerangaben bekannt ist, hat einen Einfluss.

$$\eta_{hww} = \frac{(Q_h + Q_{WW}) \cdot \eta_h}{Q_h + \frac{Q_{WW}}{0.70}} [-]$$

Formel 5-1 : Berechnung des kombinierten Nutzungsgrades nach SIA-Norm 380/1 (C.3)

Je nach Haustechniksystem (Pelletkessel, Wärmepumpe, Solarkollektoren etc.) finden sich in der Norm auch Werte für η_{hww} . Daraus lässt sich mit den gemessenen Energieverbrauchswerten Q_h und Q_{WW} ein Nutzungsgrad (η_{SPV}) für die Warmwasserspeicherung und Verteilung bestimmen.

Anforderung an die Nutzungsgrade der untersuchten Objekte ist ein Wert der mindestens höher ausfällt als der von der Norm als Standard vorgegebene Nutzungsgrad von 0.70. Diese Anforderung erfüllen alle Objekte. Beim Passivhaus Rapperswil konnte mit 0.72 jedoch nur ein knapp besserer Wert errechnet werden. Die Auswertung der Heizenergie bestätigt diesen tiefen Nutzungsgrad. Zwischen den gemessenen Energien bei der Erzeugung und beim Verbraucher konnten erhebliche Differenzen festgestellt werden. Diese Differenzen röhren wahrscheinlich vom schlechten Nutzungsgrad her.

5.4.4 Primärenergie

Der Grenzwert der gewichteten Primärenergie nach PHPP liegt bei 120 kWh/m²·a (bezogen auf die Netto-Energiebezugsfläche). Er wird nur vom Passivhaus Rapperswil – deutlich – überschritten, alle anderen Passivhäuser unterschreiten oder erreichen knapp den Grenzwert.

Objekt	e_p nach PHPP [kWh/m ² ·a] *	e_p nach Min. P [kWh/m ² _{EBF} ·a]	p_p nach PHPP [W/Pers.]	p_p nach Min. P [W/Pers.]
Im Wechsel, Stans	108.4	55.0	412	261
Im Bödeli, Unterägeri	116.7	84.5	719	560
Obermatt, Rapperswil	165.9	105.2	856	641
Magnusstrasse, Zürich	123.4	66.5	897	601
Sunny Woods, Zürich	109.7	65.7	858	578
Rychenbergstrasse, Winterthur	123.3	67.7	1099	689

* Bezogen auf die Nettofläche nach PHPP

Tabelle 5-14: Zusammenstellung des Primärenergieverbrauchs [Primärenergie.xls].

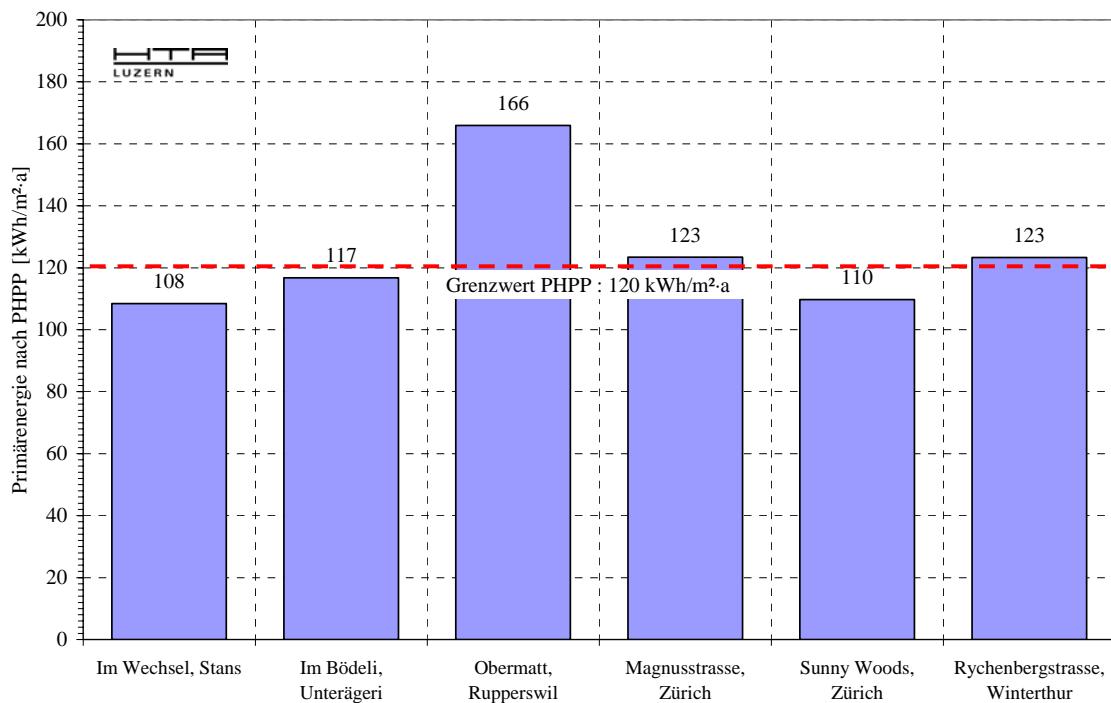


Abbildung 5-43 : Primärenergieverbrauch nach PHPP [Primärenergie.xls]

Wenn die Primärenergie auf eine personenbezogene Leistung umgerechnet wird, ergibt sich ein Kennwert der die gesamte Energie zum Wohnen und Heizen inklusive der grauen Energie für die Energieerzeugung etc. beinhaltet. Nach [11] liegt der schweizerische Durchschnitt dieses personenbezogenen Kennwerts bei 1440 Watt. Führt man sich das ehrgeizige Ziel einer 2000 Watt-Gesellschaft vor Augen, stellt dies einen sehr hohen Wert daher.

Die untersuchten Passivhäuser liegen durchgehend deutlich unter dem schweizerischen Durchschnittswert von 1440 Watt. Es zeigt sich in *Abbildung 5-44* jedoch erwartungsgemäss, dass die resultierenden Zahlen stark von den eingesetzten Gewichtungsfaktoren abhängen. Im Extremfall liegt der Wert nach PHPP um über 60 Prozent höher als derjenige nach Minergie®-P. Je nach Quelle [11] stehen weitere Gewichtungsfaktoren zur Verfügung. *Tabelle 5-15* zeigt eine Zusammenstellung von Gewichtungsfaktoren verschiedener Quellen. Die markanten Unterschiede treten sehr rasch zu Tage. Beim Vergleich von Primärenergiekennwerten muss demnach zuerst überprüft werden, welche Gewichtungsfaktoren überhaupt eingesetzt wurden. Heutzutage fehlt in diesem Bereich ein einheitlicher Massstab, der Quervergleiche überhaupt erst möglich macht.

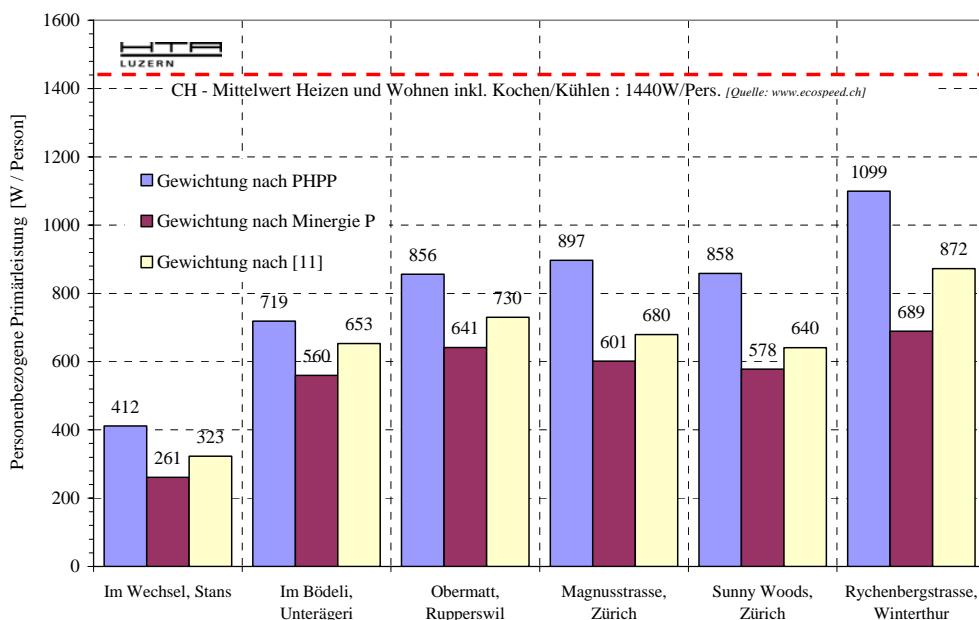


Abbildung 5-44 : Personenbezogene Primärleistung für Heizen und Wohnen [Primärenergie.xls]

	Erdgas	Flüssiggas	Strom	Pellets	Stückholz
PHPP (Gemis 4.13)	1.14	1.13	2.97	1.16	1.01
Minergie P	1.00	1.00	2.00	0.60	0.60
www.ecospeed.ch	1.18	1.18	2.22	1.05	1.05

Tabelle 5-15 : Zusammenfassung der verschiedenen Primärenergiefaktoren [Primärenergie.xls]

5.4.5 Vergleich von energetischen Planungs- und Messwerten

Objekt	Nutzwärme Heizung [kWh/m ² _{EBF} *a]	Nutzwärme Warmwasser [kWh/m ² _{EBF} *a]	Nutzenergie Elektrizität [kWh/m ² _{EBF} *a]
<i>Stans</i> <i>Im Wechsel</i>	15.0 (11.3)	15.5 (10.1)	22.0
<i>Winterthur</i> <i>Rychenbergstrasse</i>	18.9 (-)	11.2 (-)	26.7
<i>Rapperswil</i> <i>Obermatt</i>	31.9 (10.7)	13.8 (18.3)	29.7
<i>Unterägeri</i> <i>Im Bödli</i>	20.1 (10.3)	10.1 (14.1)	26.3
<i>Zürich Höngg</i> <i>Sunny Woods</i>	27.5 (6.3)	13.8 (8.4)	24.5
<i>Zürich</i> <i>Magnusstrasse</i>	24.6 (17.5)	12.9 (13.9)	17.1 (16.7)

Tabelle 5-16 : Energetische Kennzahlen der untersuchten Objekte mit den Planungswerten in Klammern.

Objekt	Endenergie Heizung [kWh/m ² _{EBF} *a]	Endenergie Warmwasser [kWh/m ² _{EBF} *a]	Endenergie Lüftung [kWh/m ² _{EBF} *a]	Produktion Elektrizität [kWh/m ² _{EBF} *a]	Gewichteter Gesamtenergie- verbrauch Minergie P [kWh/m ² _{EBF} *a] ¹
<i>Stans</i> <i>Im Wechsel</i>	17.6 (13.5)	18.2 (10.4)	3.5 (2.1)	-	28.5 (18.5)
<i>Winterthur</i> <i>Rychenbergstr.</i>	22.2 (-)	13.2 (-)	5.2 (-)	-	31.6 (-)
<i>Rapperswil</i> <i>Obermatt</i>	37.5 (12.3)	16.2 (30.2)	6.7 (3.6)	-	67.1 (49.7)
<i>Unterägeri</i> <i>Im Bödli</i>	30.9 (17.6)	18.6 (16.5)	6.5 (3.2)	8.4 (-)	45.7 (27.7) exkl. Prod. EL
<i>Zürich Höngg</i> <i>Sunny Woods</i>	11.6 (6.3)	5.8 (8.4)	n.e. (n.e.)	9.9 (11.6)	15.0 exkl. Lüftung (6.2) exkl. Lüftung
<i>Zürich</i> <i>Magnusstrasse</i>	10.5 (8.1)	5.3 (4.1)	3.0 (1.4)	-	37.6 27.2 (exkl. Lüftung)

Tabelle 5-17 : Kennzahlen für die Endenergie und den bewerteten Gesamtenergiebedarf der untersuchten Objekte.

¹Gewichtungsfaktoren Holzpellets 0.6, Gas 1.0, Elektrizität 2.0

Aus den Tabellen 5-16 und 5-17 geht hervor, dass in allen Passivhäusern die Planungswerte mehrheitlich überschritten werden. Die Differenzen betragen 30 bis 300 %. Vor allem Sunny Woods kann die Vorgaben bei weitem nicht erreichen. Der sehr tiefe geplante Heizenergiebedarf von 6.3 kWh/m²_{EBF}*a wird sehr deutlich übertroffen. Es muss allerdings erwähnt werden, dass aufgrund der fehlenden Aufschlüsselung in der P+D Erfolgskontrolle eine Aufteilung in Heizung und Warmwasser vorgenommen werden musste. Der daraus berechnete Wert für die Nutzwärme Heizung liegt im Quervergleich aber gut. Angesichts der hohen Lüftungsverluste erscheint der berechnete Wert plausibel. Ebenfalls auffällig ist die grosse Diskrepanz zwischen Planungs- und Messwerten im Passivhaus Rapperswil.

Gemäss Literatur [27] ist in einer grösseren Überbauung in Genf ebenfalls eine Diskrepanz zwischen geplanten und gemessenen Energieverbrauchsdaten von +50 % zu verzeichnen. Die Autoren bezeichnen Überschreitungen der Planungswerte als sehr häufig - im speziellen bei innovativen Niedrigenergiehäusern. .

5.5 Akustik

Passivhaus Rapperswil

Die Luftaufbereitung im Passivhaus Rapperswil erfolgt über ein zentrales Gerät. Da das Objekt direkt neben der Autobahn A1 steht, herrscht ein hoher Grundschallpegel. Aus diesem Grund sind orientierende Messungen des Aussenschalldruckpegels durchgeführt worden. Der gemessene Gesamtschalldruckpegel im Freien betrug zum Zeitpunkt der Messung (Mittags um 12.00 Uhr) je nach Etage zwischen 64 und 73 dB(A). Wenn es gelingt, in verkehrslärmbelasteten Gebieten eine Lüftung so zu bauen, dass der Lärmpegel des Verkehrs durch die Lüftung überhaupt nicht erhöht wird, spricht man von einem "Verdeckungseffekt". Dieser Effekt ist wünschenswert und führt dann dazu, dass die Lüftung vom Benutzer als "unhörbar" bezeichnet wird (falls die Drehklangfrequenz der Ventilatoren nicht hörbar ist).

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Etagen sind nicht sehr gross, aber mit rund 5 dB doch vorhanden. Bedingt durch das teilweise stark unterschiedliche Verkehrsaufkommen können die Pegel aber recht stark variieren. Dies zeigt sich deutlich in den Pegeln der Vergleichsmessung im Erdgeschoss. Diese Messreihe ist etwa vier Monate vor der etagenweisen Messung am Abend gegen 22:00 Uhr durchgeführt worden. Beim Gesamtschalldruckpegel beträgt der Unterschied jedoch nur 2 dB.

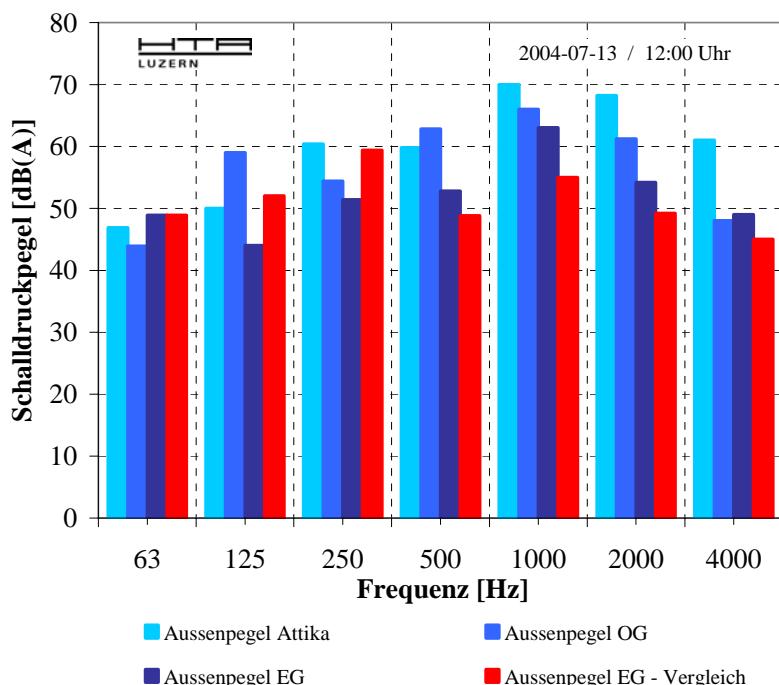


Abbildung 5-45 : Schalldruckpegel im Freien vor dem Passivhaus Rapperswil [Schallmessung.xls]

	A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	Gesamt
EG - Vergleich	49	52	59	49	55	49	45	62
EG	49	44	51	53	63	54	49	64
1. OG	44	59	54	63	66	61	48	69
Attika	47	50	60	60	70	68	61	73

Es wurden in den zwei Büros sowie in der Attika Wohnung jeweils ein Zuluftauslass sowie ein Abluftdurchlass bei normalem Lüftungsbetrieb und bei ausgeschalteter Lüftung gemessen.

Dank der sehr guten Wärmedämmung, welche das Bauen nach dem Passivhausstandard nötig macht, konnte innerhalb des Gebäudes auch eine recht gute Dämmung des Autobahnlärmes erreicht werden. Der Gesamtschalldruckpegel in den Räumen beträgt bei ausgeschalteter Lüftung zwischen 29 und 41 dB(A). Trotzdem ist die Autobahn, vor allem in den oberen Stockwerken, noch sehr gut hörbar. Es liegt also die Vermutung nahe, dass die Lärmbelastung überdurchschnittlich hoch ist und daher die durch die Lüftung verursachten Geräusche meist nicht signifikant sind.

Datum / Visum 2004-03-01 / Ref, Frb
 Messung Schalldruckpegelmessung der Lüftung
 Objekt PH Rapperswil

Raum	Etage	Luftmenge	A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]							Gesamt
			63	125	250	500	1000	2000	4000	
Essen	Attika Whg links	-50 m ³ /h	14	32	36	39	39	30	28	44
Essen	Attika Whg links	aus	14	17	16	17	28	25	14	31
Schlafen	Attika Whg links	28 m ³ /h	37	18	17	19	18	15	15	37
Schlafen	Attika Whg links	aus	11	19	17	13	33	17	14	33
Pausenecke	Büro EG	-50 m ³ /h	15	39	37	38	32	29	26	43
Pausenecke	Büro EG	aus	28	19	25	22	28	19	15	33
Grossraumbüro	Büro EG	25 m ³ /h	13	20	25	25	26	23	17	32
Grossraumbüro	Büro EG	aus	10	17	15	22	26	21	14	29
Pausenecke	Büro 1.OG	-70 m ³ /h	12	28	31	34	33	28	21	39
Pausenecke	Büro 1.OG	aus	11	21	24	32	31	25	17	36
Grossraumbüro	Büro 1.OG	33 m ³ /h	17	24	33	37	35	31	25	41
Grossraumbüro	Büro 1.OG	aus	18	24	32	38	36	32	25	41
Aussen	EG - Vergleich	-	49	52	59	49	55	49	45	62
Aussen	EG	-	49	44	51	53	63	54	49	64
Aussen	1.OG	-	44	59	54	63	66	61	48	69
Aussen	Attika	-	47	50	60	60	70	68	61	73

Tabelle 5-18 : Zusammenstellung der Messresultate im Passivhaus Rapperswil [Schallmessung.xls]

* Anmerkung zu obiger Tabelle: Negative Luftmengen bezeichnen Abluftdurchlässe.

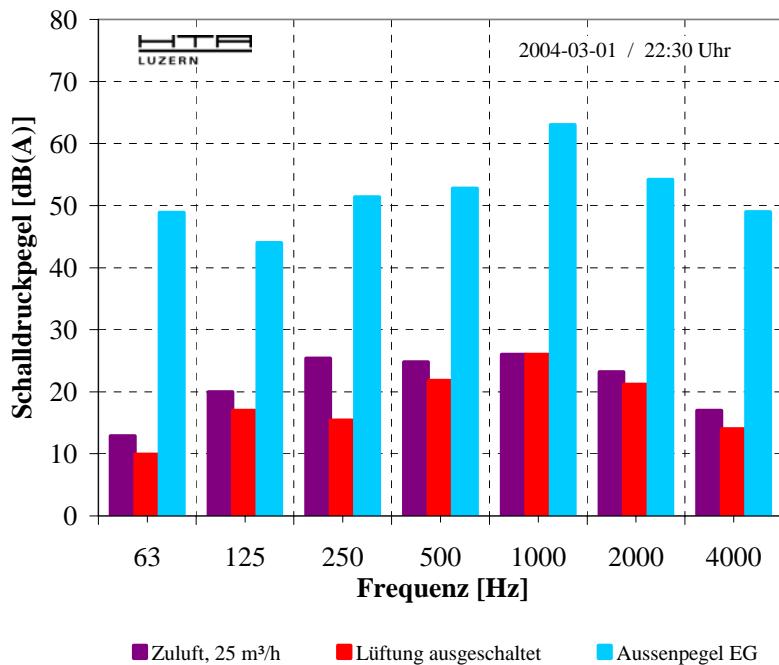


Abbildung 5-46 : Schalldruckpegel im Grossraumbüro EG des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls]

A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]								Gesamt
	63	125	250	500	1000	2000	4000	
25 m³/h	13	20	25	25	26	23	17	32
aus	10	17	15	22	26	21	14	29

Die Messungen im Büro Erdgeschoss waren jene mit den besten Erfolgsaussichten, da die Autobahn im Erdgeschoss am wenigsten gut hörbar ist. Die gemessenen Schalldruckpegel blieben sich aber sozusagen gleich, egal ob die Lüftung ausgeschaltet ist oder ob sie mit normalem Volumenstrom betrieben wird.

Die Messwerte beim Zuluftauslass wurden jedoch stark verfälscht. Die Gesamtpegeldifferenz zwischen ein- und ausgeschalteter Lüftungsanlage beträgt 3 dB. In einem Schrank des Büros befindet sich der Server für das Firmennetzwerk, der während der Messungen nicht abgestellt werden konnte und sehr deutlich wahrnehmbare Lüftergeräusche abgegeben hat. Demzufolge stammt der vermutete hohe Grundschalldruckpegels im Raum nicht von der Autobahn sondern vom Lüfter des Servers.

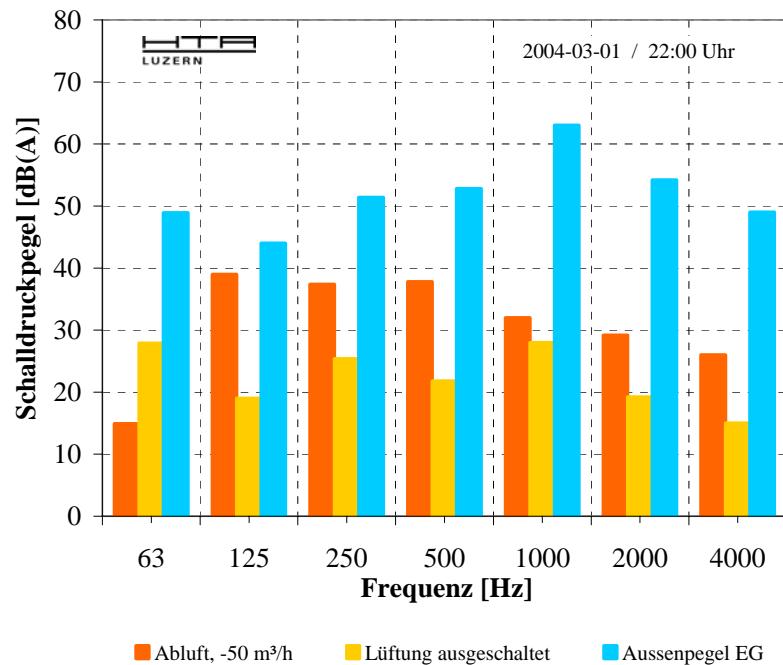


Abbildung 5-47 : Schalldruckpegel in der Pausenecke des Büro EG des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls]

	A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	Gesamt
-50 m³/h	15	39	37	38	32	29	26	43
aus	28	19	25	22	28	19	15	33

In der Pausenecke ergibt sich eine andere Situation. Die Pegeldifferenz erreicht fast durchgehend signifikante Werte. Die Gesamtpegeldifferenz liegt bei 10 dB. Der Unterschied zwischen ein- und ausgeschalteter Lüftung ist deutlich hörbar.

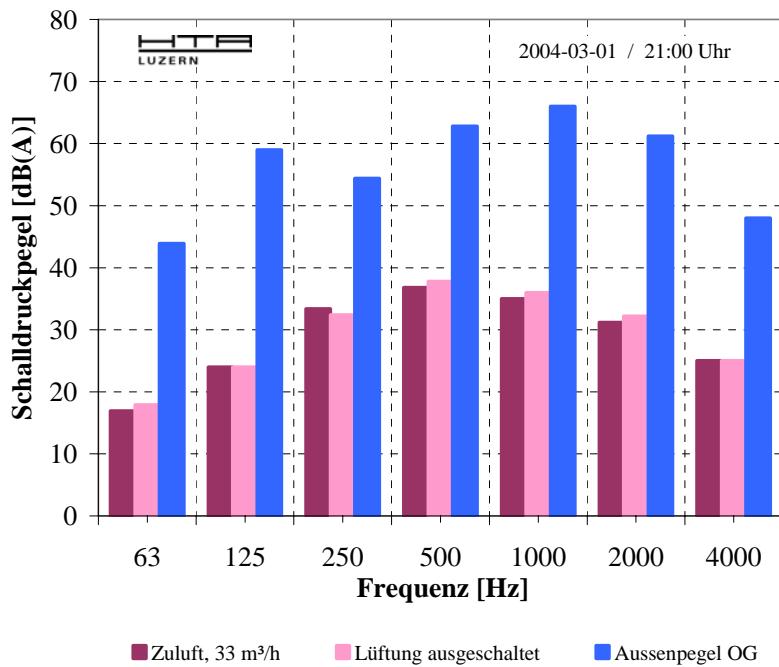


Abbildung 5-48 : Schalldruckpegel im Grossraumbüro im Obergeschoss des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls]

	A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	Gesamt
33 m³/h	17	24	33	37	35	31	25	41
aus	18	24	32	38	36	32	25	41

Die Schallmessungen im Büro des ersten Obergeschosses bestärkten die Vermutung, dass die Lärmbelastung überdurchschnittlich hoch ist und daher die durch die Lüftung verursachten Geräusche nicht signifikant sind. Hier lässt sich keine Pegelsenkung durch das Ausschalten der Lüftung erreichen. Obwohl hier der Server nicht für den hohen Grundschallpegel verantwortlich war, hat der Betrieb der Lüftung praktisch keinen Einfluss auf den Schalldruckpegel im Raum. Die Geräusche der Autobahn sind hier verantwortlich für einen Grundschallpegel, welcher das Lüftungsgeräusch überdeckt. Daher liess sich auch keine messbare Pegeldifferenz feststellen.

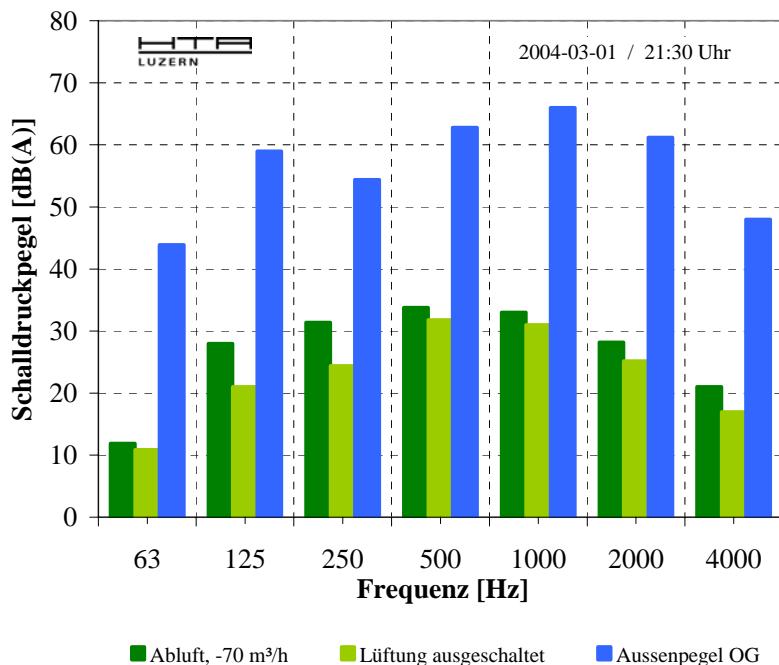


Abbildung 5-49 : Schalldruckpegel in der Pausenecke des Büros OG des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls]

	A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	Gesamt
-70 m³/h	12	28	31	34	33	28	21	39
aus	11	21	24	32	31	25	17	36

Wiederum eine andere Situation ergibt sich in der Pausenecke des Büros. Der Gesamtschalldruckpegel verringert sich durch das Abschalten des Ventilators um rund 3 dB, was nicht als signifikant zu betrachten ist. Beim Betrachten des Spektrums sind im Bereich von 100 bis 500 Hz leichte Pegelsenkungen mit Schallpegeldifferenzen > 6 dB feststellbar. Doch auch in der Pausenecke stellt die Lüftung keine zusätzlich belastende Schall- oder Lärmquelle dar.

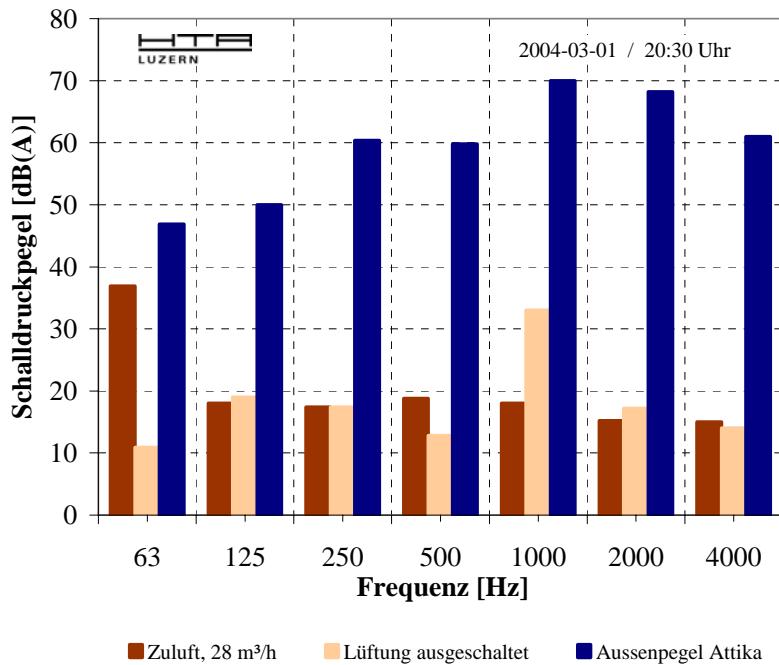


Abbildung 5-50 : Schalldruckpegel im Schlafzimmer der Attika des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls]

A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]								Gesamt
	63	125	250	500	1000	2000	4000	
28 m³/h	37	18	17	19	18	15	15	37
aus	11	19	17	13	33	17	14	33

Im Schlafzimmer der Attika zeigt sich wieder die bereits aus dem Erdgeschoss bekannte Situation. Rund die Hälfte der gemessenen Pegel fallen mit und ohne Lüftung gleich aus. Doch es gab auch einige unterschiedlich grosse und auch unterschiedlich gerichtete Differenzen. Aus der Messung resultiert eine Gesamtpegeldifferenz von etwa 4 dB. Da die Grundbelastung durch die Autobahn dominant ist, kann der Geräuschpegel aufgrund des starken Verkehrsaufkommens bei ausgeschalteter Lüftung trotzdem höher ausfallen als mit eingeschalteter Lüftung, was nichts mit der Lüftung zu tun hat. Die deutlich erkennbaren Schalldruckspitzen bei den Frequenzen 63Hz und 1000Hz sind durch die Autobahn bedingt. In diesem Zimmer ist die Autobahn sehr gut hörbar und daher eine korrekte Messung fast nicht durchführbar. Die Aussage, dass die Autobahn die Lüftungsgeräusche überdeckt, lässt sich aber auch ohne eine Pegelmessung machen.

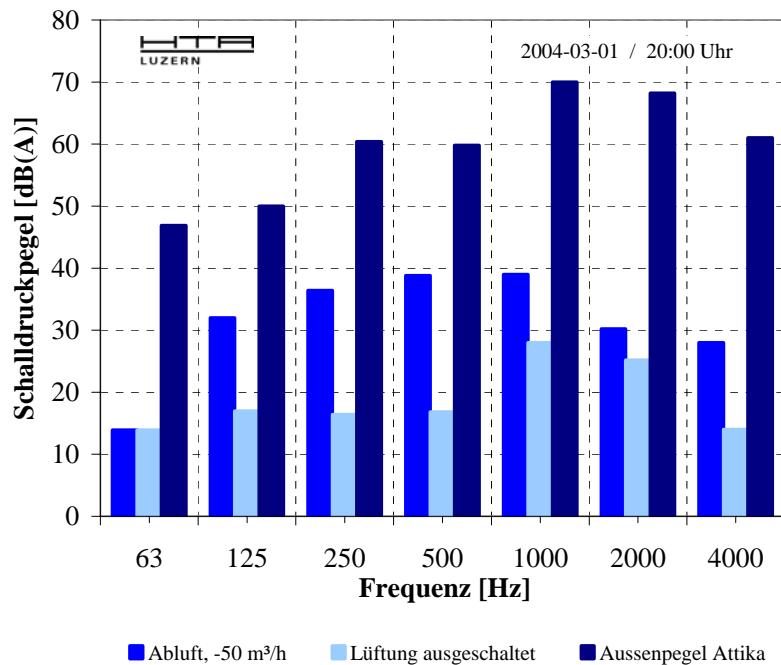


Abbildung 5-51 : Schalldruckpegel im Esszimmer in der Attika des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls]

A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	Gesamt
-50 m³/h	14	32	36	39	39	30	28	44
aus	14	17	16	17	28	25	14	31

Der Abluftdurchlass im Esszimmer der Attikawohnung zeigt ein anderes Bild. Trotz des starken Autobahnlärms glaubt man das Lüftungsgeräusch hier deutlich ausmachen zu können. Die Messungen bestätigen diesen Verdacht. Die Schalldruckpegel liegen bei ausgeschalteter Lüftung durchgehend signifikant tiefer, was sich in einem um 13 dB tieferen Gesamtpiegel bemerkbar macht.

Passivhaus Unterägeri

Die Luftaufbereitung in den Wohnungen des Passivhauses Unterägeri erfolgt über dezentrale Geräte. Da das Objekt in ruhiger Lage gelegen ist, stellt der herrschende Gesamtschalldruckpegel im Freien kein Problem dar und ist daher auch nicht gemessen worden.

In einer leerstehenden Wohnung wurden zwei Zuluftauslässe gemessen. Die Messungen wurden bei vier Lüftungsstufen durchgeführt. Die vier Stufen entsprechen den möglichen Betriebsmoden, welche das Steuergerät des Lüftungsgeräts standardmäßig einstellt. Nach Aussage des Vermieters sind alle im Haus verwendeten Geräte noch mit den Standardeinstellungen im Betrieb.

Stufe	Bedeutung
0%	Lüftung aus
50%	Normallüftung
85%	Erhöhte Lüftung
100%	Stosslüftung

0%	Lüftung aus
50%	Normallüftung
85%	Erhöhte Lüftung
100%	Stosslüftung

Tabelle 5-19 : Lüftungsstufen gemäss Bedienungsanleitung Paul WRG 150 DC.

Eine Volumenstrommessung hat gezeigt, dass sich die Stufen 85% und 100% nicht voneinander unterscheiden. Daher sind auch die bei diesen Stufen gemessenen Schalldruckpegel im Rahmen der Messunsicherheit identisch.

Datum / Visum 2004-02-09 / Ref, Frb
 Messung Schalldruckpegelmessung der Lüftung
 Objekt PH Unterägeri

Raum	Etage	Stufe	A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]							Gesamt
			63	125	250	500	1000	2000	4000	
Wohnzimmer (11)	2. OG	0%	9	13	14	12	11	12	12	21
Wohnzimmer (11)	2. OG	50%	9	14	19	20	13	12	12	24
Wohnzimmer (11)	2. OG	85%	11	17	21	25	20	14	12	28
Wohnzimmer (11)	2. OG	100%	14	18	21	26	19	14	12	29
Schlafen (03)	2. OG	0%	11	13	15	13	11	12	12	21
Schlafen (03)	2. OG	50%	13	13	18	26	21	13	12	28
Schlafen (03)	2. OG	85%	15	17	24	30	28	21	14	33
Schlafen (03)	2. OG	100%	15	15	23	31	29	22	14	34

Tabelle 5-20 : Zusammenstellung der Messresultate aus dem Passivhaus Unterägeri [Schallmessung.xls].

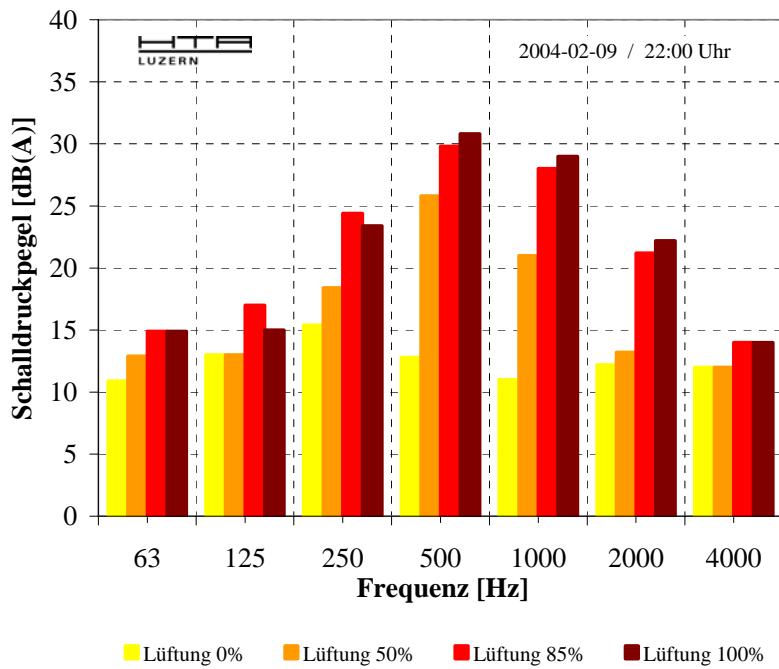


Abbildung 5-52 : Schalldruckpegel im Schlafzimmer 2. OG des Passivhaus Unterägeri [Schallmessung.xls]

	A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]							Gesamt
	63	125	250	500	1000	2000	4000	
0%	11	13	15	13	11	12	12	21
50%	13	13	18	26	21	13	12	28
85%	15	17	24	30	28	21	14	33
100%	15	15	23	31	29	22	14	34

Im Schlafzimmer sind die Lüftungsgeräusche deutlich hörbar. Die Gesamtschalldruckpegel unterscheiden sich um 13 dB, was als signifikant zu werten ist. Die Drehklangfrequenz des Ventilators scheint als Ursache für den Schallpegel im Vordergrund zu stehen. Dies konnte auch subjektiv festgestellt werden.

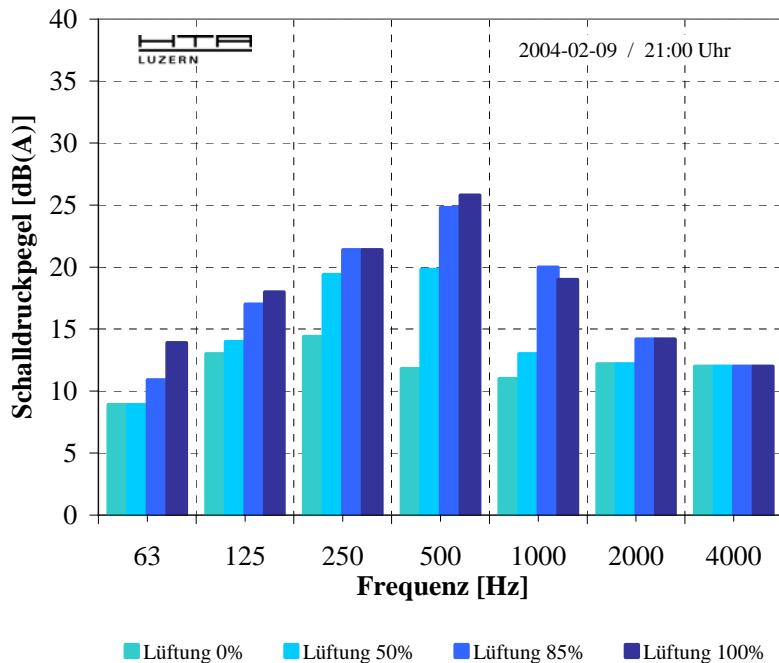


Abbildung 5-53 : Schalldruckpegel im Wohnzimmer 2. OG des Passivhaus Unterägeri [Schallmessung.xls]

	A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]							Gesamt
	63	125	250	500	1000	2000	4000	
0%	9	13	14	12	11	12	12	21
50%	9	14	19	20	13	12	12	24
85%	11	17	21	25	20	14	12	28
100%	14	18	21	26	19	14	12	29

Im Wohnzimmer liegt die Gesamtppegeldifferenz mit 8 dB ebenfalls noch im signifikanten Bereich. Die Lüftungsgeräusche sind hier jedoch nicht so deutlich hörbar wie im Schlafzimmer.

Es lässt sich aufgrund der beiden Messungen jedoch klar festhalten: Die kontrollierte Wohnungslüftung verursacht in Unterägeri eine zusätzliche Geräuschbelastung für die Bewohner.

Passivhaus im Umbau Magnusstrasse Zürich

Das Passivhaus im Umbau an der Magnusstrasse liegt im Kreis 4 der Stadt Zürich. Das Gebäude liegt zwar nicht direkt an einer stark frequentierten Strasse, die Gegend ist jedoch trotzdem als sehr belebt und eher laut zu betrachten. Der Gesamtschalldruckpegel der Umgebung, gemessen im geöffneten Fenster des 3. OG, von 59 dB(A) wird jedoch bei geschlossenen Fenstern erfolgreich abgeschirmt.

In der Magnusstrasse sind dezentrale Lüftungsgeräte installiert. Bereits während der Testmessphase haben sich die Mieter über die starke Geräuschentwicklung beim Umluftbetrieb beschwert.

In der Wohnung im 3. Obergeschoss wurden jeweils ein Zuluftauslass und ein Abluftdurchlass gemessen. Die Messungen wurden bei verschiedenen Stufen sowie mit und ohne Umluft gemessen. Auf Stufe 2 arbeitet das Lüftungsgerät dauernd mit Ventilatorstufe 1. Stufe 3 entspricht erhöhter Lüftung.

Datum / Visum 2004-09-06 / Ref
 Messung Schalldruckpegelmessung der Lüftung
 Objekt PH im Umbau Magnusstrasse

Raum	Einstellung	Luftmenge	A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	Gesamt
Schlafen 3.OG	Lüftung aus	0 m ³ /h	21	17	26	18	13	13	12	29
Schlafen 3.OG	Stufe 2 ohne Uml.	28 m ³ /h	20	22	25	19	15	13	12	29
Schlafen 3.OG	Stufe 2 mit Uml.	44/-32 m ³ /h	21	29	32	31	29	18	13	37
Schlafen 3.OG	Stufe 3 ohne Uml.	44 m ³ /h	27	33	31	26	29	20	15	37
Büro 3.OG	Lüftung aus	0 m ³ /h	21	17	26	18	13	13	12	29
Büro 3.OG	Stufe 2 ohne Uml.	-33 m ³ /h	21	24	32	32	28	25	19	37
Büro 3.OG	Stufe 3 ohne Uml.	-38 m ³ /h	28	33	38	39	44	37	33	47
Aussen	3.OG	-	47	51	46	49	55	48	51	59

Tabelle 5-21 : Zusammenstellung der Messresultate aus der Magnusstrasse in Zürich [Schallmessung.xls]

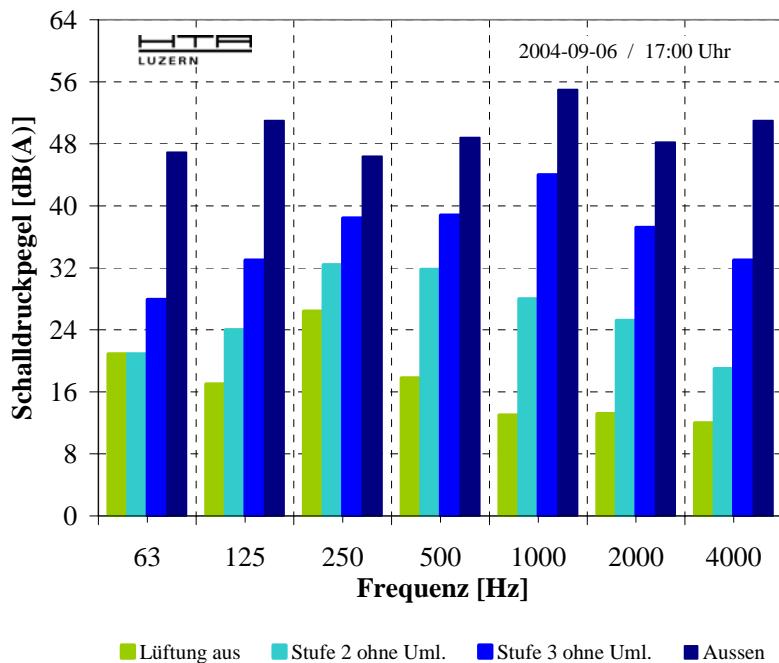


Abbildung 5-54 : Schalldruckpegel im Büro 3.OG des Passivhaus im Umbau Magnusstrasse Zürich [Schallmessung.xls]

Luftmenge	A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]							Gesamt
	63	125	250	500	1000	2000	4000	
0	21	17	26	18	13	13	12	29
-33	21	24	32	32	28	25	19	37
-38	28	33	38	39	44	37	33	47

Im Büro befindet sich etwas unkonventionell ein Abluftdurchlass anstelle eines Zuluftauslasses. Da sich die untersuchte Wohnung auf zwei Geschosse verteilt, ist in diesem Zimmer des 3. Obergeschosses anstatt einer Küche ein Büro entstanden. Daher ist im Büro auch kein Umluftbetrieb möglich.

Der Grundschallpegel ist trotz der lauten Umgebung sehr ruhig. Dies nicht zuletzt Dank der Ausrichtung des Zimmers in Richtung Innenhof. Die Lüftung verursacht jedoch im Büro deutlich wahrnehmbare Geräusche. Die Lüftung bewirkt auf Stufe 2 eine Gesamtschalldruckpegelerhöhung von 8 dB und bei erhöhter Lüftung nochmals 10 dB. Die Geräuschenentwicklung ist also deutlich signifikant und auf jeden Fall störend.

Gemäss Aussage des Architekten ist der Grund für die starke Geräuschenentwicklung des Abluftdurchlasses auf einen Kondensatwasserschlauch, welcher Luft ansaugt, zurückzuführen. In den anderen Wohnungen sind bei diesen Abluftdurchlässen keine Strömungsgeräusche auszumachen.

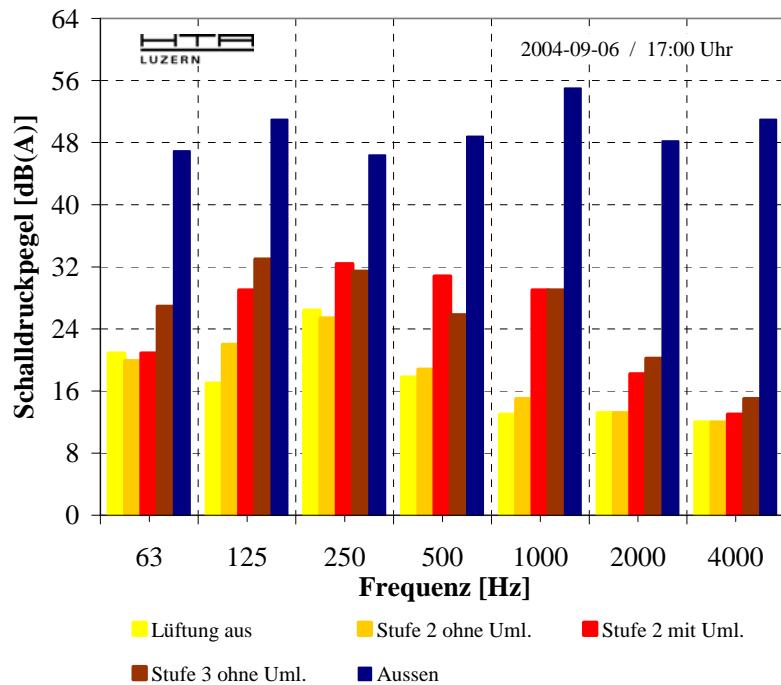


Abbildung 5-55 : Schalldruckpegel im Schlafzimmer 3.OG des Passivhaus im Umbau Magnusstrasse Zürich [Schallmessung.xls]

Luftmenge	A-Bewerteter Schalldruckpegel [dB(A)] bei Frequenz [Hz]							Gesamt
	63	125	250	500	1000	2000	4000	
0 m ³ /h	21	17	26	18	13	13	12	29
28 m ³ /h	20	22	25	19	15	13	12	29
44/-32 m ³ /h	21	29	32	31	29	18	13	37
44 m ³ /h	27	33	31	26	29	20	15	37

Im Schlafzimmer, welches in den anderen Wohnungen als Wohnzimmer dient, ist ein Umluftbetrieb der Lüftung möglich. Hier wurde eine Gesamtschalldruckpegelerhöhung von 8 dB gemessen. Bei erhöhter Lüftung wird die Lärmelastung gegenüber dem Umluftbetrieb nicht mehr messbar grösser. Hier ist anzumerken, dass sich die Luftansaugöffnung für die Umluft im Korridor befindet. Im Korridor ist es merkbar lauter als im Schlafzimmer. Die Messung wurde jedoch trotzdem im Schlafzimmer durchgeführt, da sich vermutlich kaum Leute über längere Zeit im Korridor aufhalten werden.

Erkenntnisse aus den Schallmessungen

Das Passivhauskonzept hat bezüglich der Akustik den Vorteil, dass durch den hohen Dämmgrad eine gute Abschirmung gegen Lärmquellen von aussen gewährleistet wird. Durch die kontrollierte Wohnungslüftung steigt jedoch das Risiko von störenden hausinternen Geräuschquellen.

Das SIA Merkblatt 2023 erlaubt einen maximalen, durch die Lüftungsanlage verursachten, Schalldruckpegel von 25 dB(A). Dieser Grenzwert konnte auf keiner Anlage eingehalten werden. Bei zwei der drei untersuchten Passivhäusern lag der Grundschatllpegel über dieser Grenze. Dadurch ist kein eindeutiger Nachweis möglich. Bei "Zürich Schlafen" (Magnusstrasse) wird der Grenzwert vermutlich eingehalten. Das Merkblatt verlangt des Weiteren, dass der Schalldruckpegel der Lüftungsanlage den Grundschatllpegel nicht überschreitet. Diese Bedingung wird nur in Zürich Schlafen (Magnusstrasse) und Rapperswil Büro eingehalten.

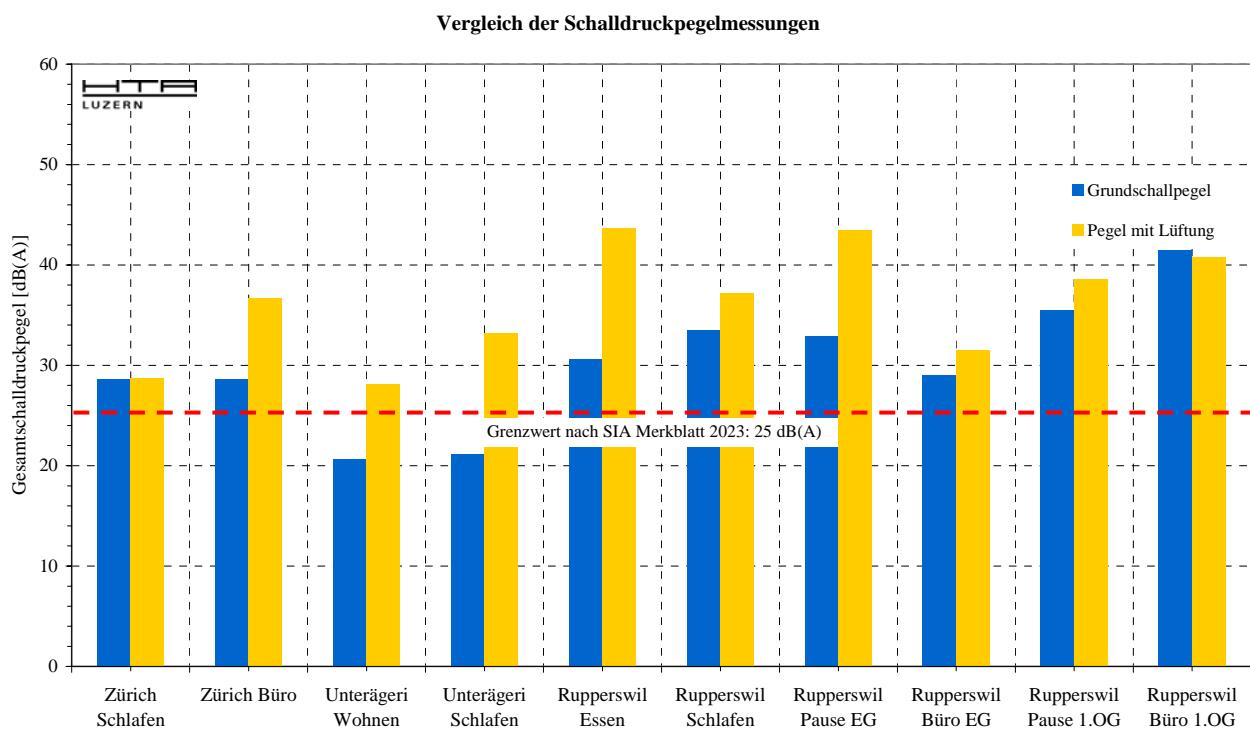


Abbildung 5-56 : Vergleich der Schalldruckpegelmessungen [Schallmessung.xls]

Die Bewohner haben die erwähnten Probleme, wie zu laute Umluft, Strömungsrauschen bei Ablufteinlässen etc. durchgehend auch subjektiv wahrgenommen und beanstandet. Grundsätzlich wird die Dämmung gegen aussen sowie die Trittschalldämmung als gut empfunden. Interne Geräusche zum Beispiel aus dem Treppenhaus werden durch die Nutzer wahrgenommen. An ein allfälliges Lüftungsgeräusch gewöhnen sich die Nutzer laut deren Aussage. Nach einiger Zeit werde das Geräusch nur noch durch Gäste wahrgenommen.

5.6 Belegung und Präsenz

Die Belegung hat einen grossen Einfluss auf den späteren Erfolg des Passivhauskonzepts. Jedoch sind nicht unbedingt nur die beiden üblichen Kenngrössen massgebend. Dies sind einerseits die absolute Belegungsdichte oder Haushaltsgrösse (Personen pro Wohnung) und die spezifische Wohnfläche (m^2 pro Person). Als Vergleichsgröße wird deshalb zusätzlich die so genannte relative Belegungsdichte herangezogen. Die relative Belegungsdichte ist der Quotient aus dem Planungswert und dem effektiven Wert der Belegungsdichte. Fällt dieser Quotient kleiner als eins aus, ist das Gebäude im Sinne der Planung unterbelegt. Analog dazu ist das Gebäude im Sinne der Planung überbelegt, wenn die relative Belegungsdichte grösser als eins ausfällt.

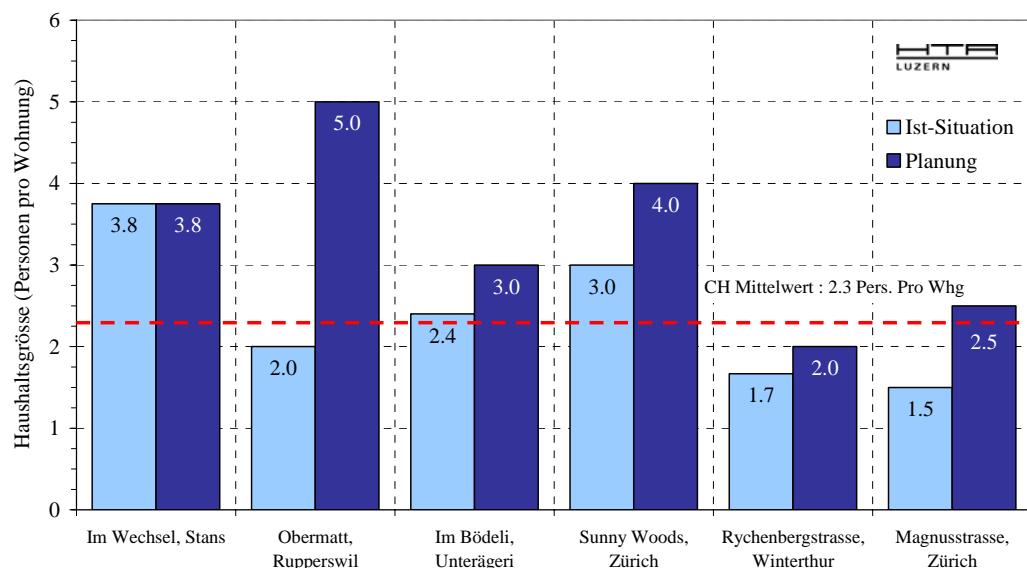


Abbildung 5-57 : Planungswerte für die Belegung im Vergleich zur effektiven Belegung [Belegung.xls]

Bei den untersuchten Passivhäusern wurde kein Wert von grösser als Eins registriert. Im Passivhaus Stans ist die relative Belegungsdichte genau eins. Hier war die spätere Belegung der Wohnungen aufgrund der Eigentumsverhältnisse zum Planungszeitpunkt bereits bekannt. Bei den meisten anderen Wohnungen handelt es sich um Mietwohnungen, welche praktisch durchgehend unter dem Planungswert belegt sind.

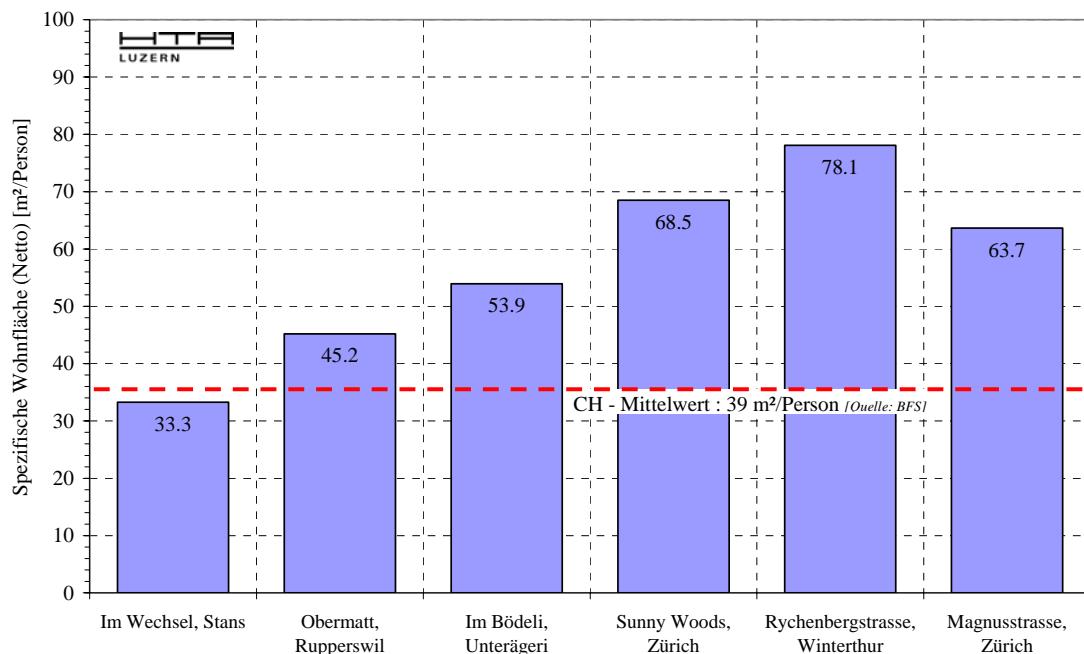


Abbildung 5-58 : Spezifische Netto-Wohnfläche pro Person in den untersuchten Passivhäusern [Belegung.xls].

Überbelegte Passivhäuser wären erstaunlich gewesen, liegt doch der schweizerische Durchschnitt der Belegungsdichte laut der letzten Volkszählung bei 2.3 Personen pro Wohnung. Dieser Tatsache stehen Planungswerte bei der Belegungsdichte von 3 oder noch höher gegenüber. Weiter ist zu beachten, dass eine landesweite Tendenz zu noch tieferer Belegung vorhanden ist. Dasselbe Bild bietet sich beim Vergleich der spezifischen Wohnfläche. In fünf von sechs Fällen wird der schweizerische Durchschnitt von 39 m² Nettowohnfläche pro Person überschritten.

Das Passivhauskonzept basiert auf höherer Belegung und entsprechenden internen Lasten. Die untersuchten Passivhäuser liegen bei der Belegung im schweizerischen Mittel und werden vorab von Mietern bewohnt, die im Winter Raumlufttemperaturen von 22 bis 23°C bei entsprechenden Platzverhältnissen wünschen.

Eine zu tiefe relative Belegungsdichte hat zu wenig interne Wärme- und Feuchtelasten zur Folge. Das bringt zwangsläufig das Passivhauskonzept in Bedrängnis. Vor allem auf der Seite des Heizwärmeverbrauchs wirken sich die fehlenden Wärmequellen sehr stark aus. Je grösser der Grad der Unterbelegung, desto grösser die Abweichung gegenüber dem vom Passivhaus-Institut festgelegten Grenzwert. Auf der Seite der Primärenergie fällt eine Unterbelegung nicht so stark ins Gewicht. Ein Grossteil des Energieverbrauchs in der Wohnung lässt sich quasi als Grundlast verstehen. Mehr Personen erhöhen beispielsweise den Elektrizitätsverbrauch nur unwesentlich. Ob man allein oder zu dritt kocht, fernsieht oder das Wohnzimmerlicht benötigt spielt praktisch keine Rolle. Durch den erhöhten Heizwärmeverbrauch steigt aber natürlich zwangsläufig der Primärenergieverbrauch zur Wärmeerzeugung.

Objekt	Relative Belegungsdichte [-]	Spez. Wohnfläche [m ² /Person]	Spez. Heizwärme nach PHPP [kWh/m ² ·a]	Abweichung vom Grenzwert [%]	Primärenergie nach PHPP [kWh/m ² ·a]	Abweichung vom Grenzwert [%]
Im Wechsel, Stans	1.00	33.3	18.7	25	108.4	-10
Im Bödeli, Unterägeri	0.80	53.9	21.6	44	116.7	-3
Obermatt, Rapperswil	0.40	45.2	37.7	151	165.9	38
Magnusstrasse, Zürich	0.60	63.7	30.6	104	123.4	3
Sunny Woods, Zürich	0.75	68.5	30.9	106	109.7	-9
Rychenbergstrasse, Winterthur	0.83	78.1	22.7	51	123.3	3

Tabelle 5-22 : Relative Belegungsdichte und Passivhaus Kennwerte [Belegung.xls]

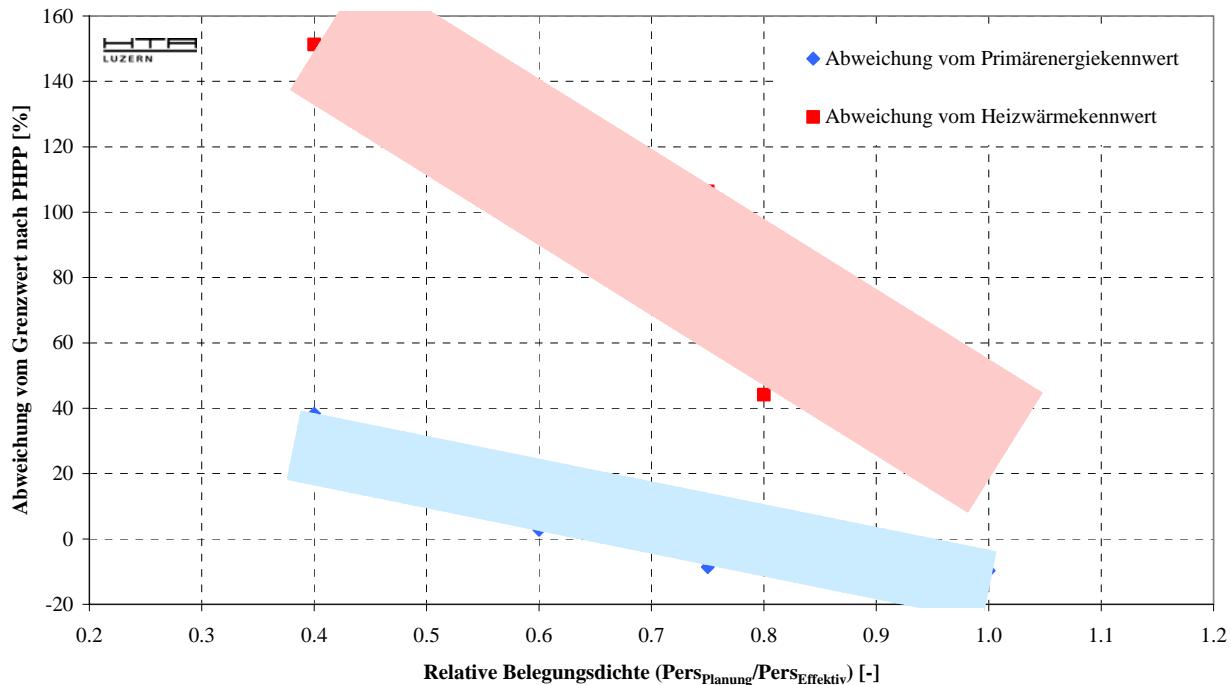


Abbildung 5-59: Abweichungen von den Passivhauskennwerten in Funktion der relativen Belegungsdichte [Belegung.xls]

5.7 Benutzerbefragung zur Zufriedenheit und Nutzung

Minergie® Praxistest

Der Minergie®-Standard hat in der Schweiz einen deutlich höheren Bekanntheits- und Verbreitungsgrad als Passivhausstandard. Durch die kontrollierte Wohnungslüftung und die Mehrkosten beim Bau sind die Probleme aber ähnlich gelagert. Die Auswertung der Umfrage im Minergie® Praxistest [20] ergab folgende Ergebnisse:

Kriterium Bewertung	Zufriedenheit Wohnkomfort	Zufriedenheit Lüftung	Erfüllung der Erwartungen	Verhältnis Kosten / Nutzen
Note 1	1	1	1	0
Note 2	0	4	2	4
Note 3	2	11	8	10
Note 4	4	31	20	62
Note 5	77	121	119	129
Note 6	207	122	135	73
Mittelwerte	5.7	5.2	5.3	4.9

Tabelle 5-23 : Zusammenstellung der Resultate aus der Umfrage im Minergie® Praxistest [20] [Umfrage.xls].

Die Auswertung zeigt ein durchgehend positives Echo. Auf einer Notenskala von 1 (sehr schlecht) bis 6 (sehr gut) erreicht der Wohnkomfort beinahe die Höchstnote. Das Verhältnis von Kosten zu Nutzen schneidet im Minergie® Praxistest mit einer knapp guten Note ab. Die Mehrheit der Bewohner erachten die nötigen Mehrinvestitionen also als nützlich. Die Erwartungen, welche von den Bewohnern an ein Niedrigenergiehaus nach Minergie®-Standard gestellt werden, können mehrheitlich erfüllt werden. 98 Prozent der Befragten würden Minergie® auch weiterempfehlen. Die häufigsten Gründe für die Weiterempfehlung sind die Wohnqualität gefolgt von umweltschützerischen Kriterien und einem tiefem Energieverbrauch.

Zudem wurden die Bewohner zur Lüftungsanlage befragt. 90 Prozent finden die Bedienbarkeit gut und einfach. Als Hauptargument, welches für die kontrollierte Wohnungslüftung spricht, wurde das schnelle Abführen von Gerüchen und von Feuchtigkeit genannt. Fast die Hälfte aller Bewohner verzeichnete jedoch auch Probleme mit der Lüftungsanlage; in den meisten Fällen wegen der Geräuschentwicklung oder zu trockener Luft.

Zu häufiges Fensterlüften stellt in Minergie®-Bauten praktisch kein Problem dar. Über 80 Prozent der Bewohner betreiben eher keine Fensterlüftung. Gegenüber der Situation vor dem Umzug in einen Minergie® Bau haben sich die Lüftungsgewohnheiten von jedem dritten Befragten verändert und jeder weitere Dritte verzichtet während der Heizsaison gänzlich auf Fensterlüftung.

Semesterarbeit HTA Luzern

Die Umfrage im Rahmen einer Semesterarbeit an der HTA Luzern [21] hat noch etwas detaillierter nachgefragt. Die Bewohner der Passivhäuser sind hier nicht nur zum Thema Komfort und Zufriedenheit, sondern auch zum Betrieb und Nutzung der Wohneinheit sowie der Information zur Passivhausthematik befragt worden.

Die vergleichbaren Werte wurden auch gleich gewichtet. Es sind dies der allgemeine Komforteindruck sowie die Zufriedenheit mit der Lüftung. Die Passivhausuntersuchung hat die Lüftungen noch etwas genauer unter die Lupe genommen - Themen wie die Einstellung der Lüftung und die Information über die Bedienung der Lüftungsgeräte wurden behandelt.

Kriterium Bewertung	Lüftungsge- räusche Tag	Lüftungsge- räusche Nacht	Gesamteindruck Raumkomfort	Lebensqualität im Passivhaus
Note 1	0	0	0	0
Note 2	0	3	0	0
Note 3	2	2	0	0
Note 4	2	2	2	3
Note 5	5	7	7	7
Note 6	10	5	10	9
Mittelwerte	5.2	4.5	5.4	5.3

Tabelle 5-24 : Zusammenstellung der Resultate Wohnkomfort aus der Befragung [21] , [Umfrage.xls]

Die Befragung zum Thema Wohnkomfort fiel ähnlich positiv aus wie bei den Minergie®-Bauten. Die Bewohner von Passivhäusern fühlen sich wie die Bewohner in Minergie®-Häusern grundsätzlich sehr wohl in ihren Wohnungen. Die Lebensqualität und der Raumkomfort werden als gut bis sehr gut bewertet. Für die Lüftungsanlage gibt es vor allem nachts nicht so gute Noten wie bei den Minergie®-Häusern. Hier wird die Geräuschbelastung durch die Lüftung zum Teil als schlecht bewertet.

Temperatur und Feuchte aus der Sicht der Bewohner

Kriterium Bewertung	Raumluft- temperatur Sommer	Raumluft- temperatur Winter	Raumluft- feuchtigkeit Sommer	Raumluft- feuchtigkeit Winter
1 zu tief	0	1	1	6
2	0	3	1	5
3	4	6	10	5
4	7	6	4	2
5	3	1	0	0
6 zu hoch	1	2	0	0
Mittelwerte	4.0	3.5	3.1	2.2

*) Die Summen können ungleich 19 ausfallen, da die Zahlen einen Mittelwert aus mehreren Fragen darstellen

Tabelle 5-25 : Zusammenstellung der Resultate Temperatur und Raumluftfeuchte aus der Befragung [21][Umfrage.xls].

Die Aufschlüsselung der Befragung nach Raumluftfeuchte und Raumlufttemperatur wurde sowohl für das Sommer- als auch für das Winterhalbjahr gemacht. Die Skala reicht hier von 1, was einen zu tiefen Wert, also zu kalt oder zu trocken, darstellt bis 6 (analog also zu heiss oder zu feucht). Ein Wert von 3.5 wird als optimal erachtet.

Die Raumlufttemperaturen wurden grundsätzlich als gut bewertet. Im Sommer wird die Raumlufttemperatur eher als etwas zu hoch eingestuft. Interessant ist die Tatsache, dass die winterlichen Raumlufttemperaturen als einzige die Bestnote erhalten haben. Dies obwohl beispielsweise im Passivhaus Rupperswil Raumlufttemperaturen von deutlich über 20 °C registriert wurden. Hier beginnt das Dilemma des erhöhten Heizwärmeverbrauchs. Die Bewohner empfinden erhöhte Temperaturen als optimal und stellen die Raumthermostaten dementsprechend ein. Zusammen mit einer tiefen Präsenz ist das Resultat vorprogrammiert. Die Planungswerte werden unter solchen Umständen deutlich verfehlt.

Die mit erhöhten Raumlufttemperaturen im Winter verbundenen tiefen relativen Raumluftfeuchten werden von den Bewohnern jedoch eindeutig als deutlich zu tief empfunden. Hier herrscht sicher noch Nachholbedarf bei der Information der Bewohner. Die Vermutung liegt nahe, dass vor allem Mieter sich nicht über den Zusammenhang von Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte im Klaren sind. Nebst den Miethen sollte aber auch der Vermieter Massnahmen ergreifen und so weit als möglich die Zuluftvolumenströme in den Wohnungen der effektiven Belegung anpassen.

Betrieb und Nutzung

Häufigkeit Fensterlüftung	Dauer Fensterlüftung	Häufigkeit Filterwechsel	Einstellung Raumtemperatur	Einstellung zum Energiesparen
12 (nie)	12 (nie)	0 (nie)	0 (18 °C)	0 (negativ)
3 (1/Tag)	5 (1 - 5 min)	2 (1/Jahr)	0 (19 °C)	0
3 (2/Tag)	1 (5 - 15 min)	2 (2/Jahr)	4 (20 °C)	0
0 (3/Tag)	1 (15 - 30 min)	2 (3/Jahr)	8 (21 °C)	6
0 (4/Tag)	0 (30 - 60 min)	2 (4/Jahr)	6 (22 °C)	4
0 (> 4/Tag)	0 (> 60 min)	2 (> 4/Jahr)	1 (23 °C)	9 (positiv)

Tabelle 5-26 : Zusammenstellung der Resultate Betrieb und Nutzung aus der Befragung [21], [Umfrage.xls]

Die Passivhausumfrage hat auch Fragen zum sehr individuellen und variablen Benutzerverhalten gestellt. Im Zusammenhang mit dem erhöhtem Heizenergieverbrauch wurden die Fragen auch gezielt in diese Richtung gestellt. So waren nebst der Einstellung des Raumthermostaten auch die Gewohnheiten, was die Fensterlüftung angeht, von Interesse. Außerdem wurden die Bewohner zu ihrer persönlichen Einstellung dem Energiesparen gegenüber befragt. Denn: Wer in einem Passivhaus wohnt, muss nicht zwingend ein Energiesparfanatiker sein. Dies hat sich auch bei der Auswertung gezeigt. Weniger als die Hälfte der Bewohner verteilte hier die höchste Note obwohl alle eine grundsätzlich gute Einstellung dem Energiesparen gegenüber haben. Im Zusammenhang mit kontrollierter Wohnungslüftung ist auch Hygiene ein Thema. Daher war die Intervallzeit zwischen zwei Filterwechseln (falls die Filter durch die Bewohner selbst ausgewechselt werden) anzugeben.

Die Umfrage hat ergeben, dass in Passivhäusern konsequent kurzzeitig gelüftet wird. Über längere Zeit gekippte oder gar geöffnete Fenster gibt es - zumindest bei den befragten Bewohnern - nicht. Es zeigt sich, dass Fensterlüftung wie auch in den Minergie®-Bauten keine Probleme verursacht. Die Bewohner haben, wenn die Komfortwerte stimmen, kein Bedürfnis nach offenen Fenstern. Nicht zuletzt die Dämmung gegen Aussenlärm wird hier als Argument für die kontrollierte Wohnungslüftung ins Feld geführt.

Die Akzeptanz der kontrollierten Wohnungslüftung ist also offensichtlich gross. Die Tendenz zu Raumlufttemperaturen über 20 °C wird auch durch die Umfrage untermauert. Über 75 % der Befragten haben den Raumthermostaten auf eine Temperatur von über 20°C eingestellt. Die gemessenen Durchschnittstemperaturen fallen teilweise noch einmal markant höher aus. In Rapperswil wurden während der Heizsaison sogar Mittelwerte von über 25°C gemessen.

Rund die Hälfte der Befragten muss oder will die Filter der Lüftungsanlage selber auswechseln. Die Intervalldauer zwischen zwei Filterwechseln schwankt sehr stark. Niemand wechselt die Filter grundsätzlich gar nicht. Ansonsten sind die Intervalle zwischen einem Jahr und über vier Jahren gleichmässig verteilt. Hier gibt es sicher Unterschiede im Hygienebewusstsein der einzelnen Bewohner. Jedoch dürften auch die Lasten stark variieren, was sich natürlich auf die Wartungsintervalle auswirkt.

Information

Kriterium Bewertung	Information über Lüftungsbedienung	Information über den PH Standard	Information über Benutzungsregeln
Note 1	0	0	0
Note 2	1	2	2
Note 3	1	1	2
Note 4	2	0	2
Note 5	7	4	4
Note 6	8	11	8
Mittelwerte	5.1	5.2	4.8

Tabelle 5-27 : Zusammenstellung der Resultate Information aus der Befragung [21], [Umfrage.xls]

Ein wichtiger Bestandteil des Passivhauskonzepts ist die Information der Benutzer. Die Benutzer sollten sich an gewisse „Spielregeln“ halten, um die Vorteile des Passivhauses voll ausnutzen zu können. Ein Beispiel für eine solche Regel ist das Vermeiden von offenen oder gekippten Fenstern über eine längere Dauer. Wie bereits bei der Auswertung der Nutzung aufgezeigt wurde, funktioniert das sehr gut. Auch die Bedienung des Lüftungsgerätes ist massgebend. Wenn sich beispielsweise Stufen manuell schalten lassen, ist es sinnvoll diese Funktion bei Bedarf auch zu benutzen.

Grundsätzlich wurden für die Information der Bewohner gute Noten vergeben. Die Erklärung des Passivhausstandards erzielte mehrheitlich die Bestnote. Wohnen in einem Passivhaus bringt meist Mehrkosten mit sich, sowohl für Eigentümer als auch für Mieter. Daher sind sich die Bewohner sehr wohl bewusst, wofür sie diesen Mehrpreis bezahlen. Dieser Mehrpreis könnte auch der Grund für die nicht in allen Fällen gute Benotung der Information über die Benutzungsregeln sein. Wenn man schon mehr bezahlt, will man sich nicht noch bevormunden lassen. An dieser Diskrepanz gibt es sicher noch zu arbeiten.

Vergleich der Bauherrenbefragung mit dem Praxistest Minergie®

Analog der Bauherrenbefragung im Praxistest Minergie® sind von der Autoren dieses Schlussberichts Interviews mit den Bauherren durchgeführt worden. Die Bauherren, welche bereits eine oder mehrere Befragungen ihrer Mieter oder Miteigentümer durchgeführt haben, äusserten sich aufgrund dieser Feedbacks im Namen der gesamten Bewohnerschaft zu Themen wie thermischer Komfort, Nutzung und Betrieb etc. Den Architekten sowie den Haustechnik Planern sind die Fragebogen des Praxistests zugestellt worden. Die wichtigsten Erkenntnisse und Gemeinsamkeiten mit dem Praxistest Minergie® sind auf den folgenden Seiten zusammengefasst.

Allgemein

Grundsätzlich wird der Passivhausstandard von allen Beteiligten weiterempfohlen. Auch Leute, die eher negative Erfahrungen gemacht haben, würden trotzdem wieder ein Passivhaus bauen. Die Gründe sind ähnlich gelagert wie bei Minergie®. Den Anstoss geben primär Überlegungen ökologischer Art, der Wohnkomfort sowie der Wille zu einer fortschrittlichen Bauweise. Auch der Wegfall eines statischen Heizsystems und die damit verbundenen Einsparungen sind als Motivation genannt worden.

Für die spezifischen Planungsunterlagen zum Passivhaus wurden durchwegs positive Noten verteilt. Genau wie die Formulare für den Minergie® Nachweis wird die Handhabung des Passivhaus-Planungspakets (PHPP) als einfach und gut empfunden. Der zeitliche Mehraufwand gegenüber der Berechnung nach SIA 380/1 wird von den meisten als klein eingestuft.

Was durch mehrere Planer und Architekten in Frage gestellt wurde, war die Art der Zertifizierung. Dies vor allem bedingt durch die teilweise massiven Diskrepanzen zwischen Planung und Messung. Eine Zertifizierung aufgrund des Ist-Zustands respektive der Messwerte aus der Erfolgskontrolle wurde angeregt. Zudem wurde der Wunsch nach einem Standard für Sanierungen laut.

Bauphase

Die entstandenen Probleme während der Bauphase der untersuchten Passivhäuser sind generell die gleichen wie sie durch den Praxistest Minergie® genannt werden. Auch die Lösungsansätze decken sich weitestgehend mit den Vorschlägen aus dem Praxistest.

Qualitätsprobleme und mangelnde Kontrolle bei der Ausführung durch die Handwerker sind praktisch immer genannt worden. Ebenfalls mehrfach erwähnt wurde der Kostendruck, welcher durch die Bauherren auf die Planer und natürlich letztlich auf die Handwerker ausgeübt wird. Hier entsteht zwangsläufig ein Teufelskreis. Der Preisdruck zwingt die Handwerker zu Einsparungen und dass darunter die Qualität zu leiden hat, ist nicht weiter verwunderlich. Häufig wurden Probleme mit der kontrollierten Wohnungslüftung verzeichnet. Teilweise aufgrund von unsauberer Arbeitsweise oder weil sich die Handwerker nicht gewohnt waren Lüftungssysteme im Wohnbereich zu installieren. Auf der Stufe Planung entstanden die meisten Probleme durch mangelnde Kommunikation.

Um die Probleme während der Bauphase in den Griff zu bekommen, wird eine verstärkte Sensibilisierung aller Beteiligten vorgeschlagen. Durch ein System zur Qualitätskontrolle, welches auch konsequent zur Anwendung kommt, gepaart mit korrekt und gut informierten Baubeteiligten, könnten viele Baumängel vermieden werden.

Komfort

Auch die Aussagen zum Komfort decken sich mit den Rückmeldungen aus der Minergie® Umfrage. Die Raumluftfeuchtigkeit wird häufig als zu tief empfunden. Die Raumlufttemperatur hingegen bezeichnen die meisten Nutzer als Optimal. Diese als optimal empfundenen Temperaturen betragen jedoch nicht selten über 23°C. Raumlufttemperaturen auf diesem Niveau gepaart mit der kontrollierten Wohnungslüftung führen häufig zu den erwähnten tiefen Raumluftfeuchten.

Die Lufthygiene wird durchgehend mit gut bis sehr gut bewertet. Eine Nutzerin empfindet die Lufthygiene bereits als zu gut. Die Wohnung rieche ihr zu neutral und nähme keinen individuellen Geruch an.

Betrieb, Nutzung und Information

Die Bewohner sind aus der Sicht der Planer zu schlecht in die optimale Nutzung der kontrollierten Wohnungslüftung eingeführt worden. Diese Aussage wird zum Teil auch von den Bauherren unterstützt. Die Bauherren geben an, die Nutzer gut zu informieren. Es muss jedoch eingeräumt werden, dass gerade bei häufigen Mieterwechseln die Qualität der Informationen abnimmt.

Dies zeigt sich auch in der Tatsache, dass die meisten Lüftungsanlagen während des ganzen Jahres auf der gleichen Stufe betrieben werden. Im Passivhaus Stans wird die zentrale Anlage während der Sommermonate abgeschaltet. Während dieser Zeit greifen die Benutzer bei Bedarf auf Fensterlüftung zurück, was aber energetisch kein Problem darstellt. Bei den dezentralen Lüftungsgeräten könnten die Nutzer die Anlage häufig nach ihren Bedürfnissen einstellen, tun dies aber nicht da, sie die Steuerung als schlecht oder schwer bedienbar empfinden. Diese Aussage lässt sich im Praxistest Minergie® nicht finden.

6 Schlussbemerkungen

Der Entwicklung eines Qualitätssicherungssystems für Passiv- und Minergie®-P-Bauten mit dem Endprodukt „Zertifizierung nach Inbetriebnahme“ sollte bei weiteren Aktivitäten im Programm „Rationale Energienutzung in Gebäuden“ Rechnung getragen werden. Die Erfahrungen mit ausgeführten schweizerischen Passivhäusern decken sich mit Erfahrungen von ausgeführten Niedrigenergiebauten im IEA Task 13 [28]. Auch dort waren winterliche Raumlufttemperaturen von 22 bis 23 °C zu verzeichnen und der Benutzereinfluss auf die energetischen Kennwerte wird als markant erachtet. Eine andere Publikation kommt zum Schluss, dass Differenzen von 50 % zwischen Planungs- und Messwerten weit verbreitet sind – im speziellen bei innovativen Niedrigenergiebauten [27].

Mittlerweile ist in der Schweiz der Minergie®-P Standard gut eingeführt, daher wird der Passivhausstandard für die Schweiz an Bedeutung verlieren. Im Sinne einer Vereinfachung sollte man sich inskünftig auf den Minergie®-P Standard beschränken, will man nicht für weitere Konfusion bei Bauherren sorgen. Die Zielvorgaben bleiben gleich: Nach einem definierten Energiestandard Niedrigenergiebauten zu realisieren, die diesem Anspruch gerecht werden und ihn auch halten können.

Dank

Mark Zimmermann und Hans Bertschinger danken wir für die Unterstützung und wertvollen Hinweise bei der Ausarbeitung des vorliegenden Schlussberichtes.

Dem Akustikexperten der SUVA und nebenamtlichen Dozenten der HTA Luzern, Walter Lips, danken wir für die geschätzten Kommentare zum Kapitel Akustik und die erhaltenen wertvollen Anmerkungen.

Miriam Rorato und Peter Voll von der Hochschule für soziale Arbeit in Luzern unterstützten uns bei der Benutzerbefragung, dafür gebührt ihnen unser Dank.

7 Anhang 1: Literaturquellen

- [1] H. Egger, S. Achermann: *Vergleichende Auswertung Schweizerischer Passivhäuser*, Semesterarbeit Studiengang HLKS, HTA Luzern, 2003.
- [2] H. Egger, S. Achermann: *Vergleichende Auswertung Schweizerischer Passivhäuser*, Diplomarbeit Studiengang HLKS, HTA Luzern, 2003.
- [3] B. Frei, F. Reichmuth, H. Huber: *Bericht Nr. 414788 Passiv - MFH Unterägeri*, WTT HLKS, HTA Luzern, 2003
- [4] B. Frei, H. Huber: *Bericht Nr. 414782 Passivhaus Rapperswil*, WTT HLKS, HTA Luzern; 2003
- [5] F. Reichmuth, B. Frei, H. Huber: *Bericht Nr. 414781 Passivhaus Stans*, WTT HLKS, HTA Luzern; 2003
- [6] F. Reichmuth, B. Frei, H. Huber: *Bericht Nr. 414783 Passivhaus im Umbau, Magnusstrasse, Zürich*, WTT HLKS, HTA Luzern; 2003
- [7] R. Naef, P. Widmer: *Wohnen in Sunny Woods, Zürich Höngg*, Bundesamt für Energie, Schlussbericht P+D, Projektnummer 80005, September 2003
- [8] A. Gütermann: *Mehrfamilien Passivhaus mit solarem Luftsyste, Rychenbergstrasse Winterthur*, Amena AG im Auftrag des Bundesamtes für Energie, April 2002
- [9] *Gebäudetechnik*, Ausgabe 1/02, AZ Fachverlage AG
- [10] Ch. Tanner, Th. Frank, *Bestimmung der Luftdichtigkeit (n_{L50}/v_{a,4} Wert) „Abnahmemessung“*, EMPA Dübendorf, Prüfbericht Nr. 421 180, Dezember 2001
- [11] *ECO2-Rechner*, www.ecospeed.ch
- [12] *Merkblatt Luftförderung mit kleinem Energiebedarf*, (2.97), Bundesamt für Energiewirtschaft
- [13] *SIA Merkblatt 2023* (2004), Lüftung im Wohnbau
- [14] *Gebäudetechnik*, Ausgabe 1/03, AZ Fachverlage AG
- [15] K. Viridén, et al: *P+D Projekt Passivhaus im Umbau*, Schlussbericht 2003, Bundesamt für Energie, Vertragsnummer 80845
- [16] W. Setz: *1. Schweizerischer Wohn- und Gewerbebau im Passivhausstandard*, Architekturbüro Setz im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Dezember 2003
- [17] Novatlantis, *Nachhaltigkeit im ETH Bereich*, www.novatlantis.ch
- [18] Ch. Tanner: *Messung und Beurteilung der Luftdichtigkeit von Niedrigenergiehäusern (MEBLUN)*, Bundesamt für Energie, Vertragsnummer 82467

- [19] Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme, Freiburg im Breisgau, **Monitoring Passivhäuser**, www.ise.fhg.de/german/fields/field1/mb5/projects/hp_passivhaeuser/index.html
- [20] S. Lenel et al.: **Praxistest Minergie® – Erfahrungen aus Planung, Realisierung und Nutzung von Minergie® Bauten**, Verein Minergie®, Schlussbericht Juni 2004
- [21] M. Gräppi, S. Künzli, R. Meyer: **Gebäudetechnik reagiert auf Energiestandards**, Semesterarbeit Studiengang HLKS, HTA Luzern, 2002
- [22] Lazzarin R., Nalini, **Just a drop of water**, Refrigeration world, (2004-6), 6-8.
- [23] Recknagel: **Taschenbuch für Heizung + Klima Technik**, 67. Auflage, Oldenbourg Verlag München, 1995
- [24] R. Emmenegger, A. Tschui: **Raumluftfeuchte im Wohnungsbau**, Diplomarbeit Studiengang HLKS, HTA Luzern, 2004.
- [25] R. Friedlin, **Warmwasser im Passivhaus**, Semesterarbeit Studiengang HLKS, HTA Luzern, 2004.
- [26] B. Frei, F. Reichmuth, H. Huber: **Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser**, 13. Schweizerisches Status-Seminar „Energie- und Umweltforschung im Umweltbereich“ ETH Zürich 9./10. September 2004
- [27] G. Branco et al.: **Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data**, Energy and Buildings 36 (2004) 543-555.
- [28] K. E. Thomsen et al.: **Measured performance of 12 demonstration projects—IEA Task 13 "advanced solar low energy buildings"**, Energy and Buildings 37 (2005) 111-119.
- [29] J. Nipkow, **Effiziente Stromnutzung in Gebäuden**, BFE Workshop Energieperspektiven 2035/2050, 29. Oktober 2004, Bern.

8 Anhang 2: Verzeichnisse

8.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 : Konstruktions- und Gebäudekenndaten Passivhaus im Umbau Magnusstrasse, Zürich [Objektübersicht.xls].	12
Tabelle 3-2 : Konstruktions- und Gebäudekenndaten im Passivhaus Stans [Objektübersicht.xls].	14
Tabelle 3-3 : Konstruktions- und Gebäudekenndaten im Passivhaus Obermatt in Rapperswil [Objektübersicht.xls].	16
Tabelle 3-4 : Konstruktions- und Gebäudekenndaten des Passivhauses im Bödli, Unterägeri [Objektübersicht.xls].	18
Tabelle 3-5: Konstruktions- und Gebäudekenndaten des Passivhauses an der Rychenbergstrasse in Winterthur [Objektübersicht.xls].	20
Tabelle 3-6 : Eckdaten des Passivhauses Sunny Woods in Zürich Höngg [Objektübersicht.xls].	22
Tabelle 5-1 : Zusammenstellung der n_{50} - Werte [Luftdichtigkeit.xls].	30
Tabelle 5-2 : Zusammenstellung der Komfortwerte in der Heizperiode von Oktober 2003 bis März 2004 [Komfort Winter.xls].	41
Tabelle 5-3 : Zusammenstellung der Komfortwerte im Sommerhalbjahr von April 2003 bis September 2003 [Komfort Sommer.xls].	42
Tabelle 5-4 : Ausgangsdaten zur Abschätzung des Energieaufwands zur Dampflluftbefeuchtung.	45
Tabelle 5-5 : Abschätzung des Energieaufwands für die Befeuchtung [Befeuchter.xls].	46
Tabelle 5-6 : Zusammenstellung der Lüftungseinstellungen [Lüftung Komfort.xls].	50
Tabelle 5-7 : Übersicht der gebäudetechnischen Anlagen für Heizung und Warmwasser.	51
Tabelle 5-8 : Übersicht der gebäudetechnischen Anlagen für Lüftung und Photovoltaik	52
Tabelle 5-9 : Zusammenstellung des Elektrizitätsverbrauchs [Elektrische Energie.xls].	54
Tabelle 5-10: Faktor zwischen grösstem und kleinstem personenbezogenen Elektrizitätsverbrauch für Wohnen.	55
Tabelle 5-11: Zusammenstellung des Lüftungskennwerte [Lüftungsenergie.xls].	57
Tabelle 5-12 : Kategorien für Lüftungsgeräte nach [12].	59
Tabelle 5-13 : Zusammenstellung der Energiekennzahlen für Heizung und Warmwasser [Heizen.xls].	61
Tabelle 5-14: Zusammenstellung des Primärenergieverbrauchs [Primärenergie.xls].	64
Tabelle 5-15 : Zusammenfassung der verschiedenen Primärenergiefaktoren [Primärenergie.xls].	65
Tabelle 5-16 : Energetische Kennzahlen der untersuchten Objekte mit den Planungswerten in Klammern.	66
Tabelle 5-17 : Kennzahlen für die Endenergie und den bewerteten Gesamtenergiebedarf der untersuchten Objekte.	66
Tabelle 5-18 : Zusammenstellung der Messresultate im Passivhaus Rapperswil [Schallmessung.xls].	68
Tabelle 5-19 : Lüftungsstufen gemäss Bedienungsanleitung Paul WRG 150 DC.	75
Tabelle 5-20 : Zusammenstellung der Messresultate aus dem Passivhaus Unterägeri [Schallmessung.xls].	75
Tabelle 5-21 : Zusammenstellung der Messresultate aus der Magnusstrasse in Zürich [Schallmessung.xls].	78
Tabelle 5-22 : Relative Belegungsdichte und Passivhaus Kennwerte [Belegung.xls]	84
Tabelle 5-23 : Zusammenstellung der Resultate aus der Umfrage im Minergie® Praxistest [20] [Umfrage.xls].	85
Tabelle 5-24 : Zusammenstellung der Resultate Wohnkomfort aus der Befragung [21] , [Umfrage.xls]	86
Tabelle 5-25 : Zusammenstellung der Resultate Temperatur und Raumluftfeuchte aus der Befragung [21][Umfrage.xls].	87
Tabelle 5-26 : Zusammenstellung der Resultate Betrieb und Nutzung aus der Befragung [21] , [Umfrage.xls]	88
Tabelle 5-27 : Zusammenstellung der Resultate Information aus der Befragung [21], [Umfrage.xls].	89

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1 : Der Passivhausumbau an der Magnusstrasse in Zürich nach der Sanierung [15].....	11
Abbildung 3-2 : Querschnitt durch den Passivhausumbau Magnusstrasse, rot die neu erstellten Gebäudeteile [15]	12
Abbildung 3-3 : Das Passivhaus im Wechsel, Stans in der Westansicht [9]	13
Abbildung 3-4 : Querschnitt durch das Passivhaus im Wechsel, Stans: links der Liftturm - rechts der gedämmte Wohnungsteil.....	14
Abbildung 3-5 : Das Passivhaus Obermatt in Rapperswil in der Nord-West Ansicht [9]	15
Abbildung 3-6 : Grundriss des Passivhaus Rapperswil mit unbeheiztem Treppenhaus in der Mitte [16].....	16
Abbildung 3-7 : Das Passivhaus im Bödli, Unterägeri in der Ostansicht [14]	17
Abbildung 3-8 : Querschnitt durch das Passivhaus Unterägeri, rechts sind die eingeschobenen Garagen im EG ersichtlich.	18
Abbildung 3-9 : Das Passivhaus an der Rychenbergstrasse in Winterthur [8]	19
Abbildung 3-10 : Grundriss des Erdgeschosses im Passivhaus Rychenbergstrasse in Winterthur mit integriertem Lüftungsschema [8]	20
Abbildung 3-11 : Das Passivhaus Sunny Woods in Zürich Höngg [7].....	21
Abbildung 3-12 : Querschnitt durch das Passivhaus Sunny Woods in Zürich Höngg [7]	22
Abbildung 5-1 : Konstruktionsschnitt beim Passivhaus Sunny Woods in Zürich.....	26
Abbildung 5-2 : Fensteranschläge im Passivhaus in Stans (links) und beim Passivhaus im Umbau Magnusstrasse in Zürich (rechts).....	27
Abbildung 5-3 : Grundrissdetail Stütze und Schnittdetail Deckenauflager im Passivhaus in Rapperswil	28
Abbildung 5-4 : Detailschnitte der Deckenauflager im Passivhaus Rychenbergstrasse in Winterthur.....	29
Abbildung 5-5 : Detailschnitt der Decke über der Garage im Passivhaus im Bödli in Unterägeri.	29
Abbildung 5-6 : Eingangstüre der Attikawohnung links im Passivhaus Stans [Quelle HTA Luzern].....	31
Abbildung 5-7: Kante der Wohnzimmerwand und der Decke der Attikawohnung [Quelle HTA Luzern]	31
Abbildung 5-8 : Wohnungsweiser spezifischer Heizenergieverbrauch im Passivhaus Stans.	32
Abbildung 5-9 : Fehlerhaftes geschlossenes Fenster im EG (links) [Quelle HTA Luzern]	32
Abbildung 5-10 : Fehlerhaftes Fenster in geschlossenem Zustand in der Attikawohnung Ost [Quelle HTA Luzern].	33
Abbildung 5-11: Fenster im Erdgeschoss (Büro links) [Quelle HTA Luzern].....	33
Abbildung 5-12: Übergang vom Boden der Wohnung 1.OG zur Wand EG in der Ansicht vom Treppenhaus (rechts) [Quelle HTA Luzern].....	33
Abbildung 5-13: Rahmen der Eingangstür zum Büro im Erdgeschoss [Quelle HTA Luzern].	34
Abbildung 5-14 : Übergang der Betonsäule im Büro Erdgeschoss zum Boden [Quelle HTA Luzern].....	34
Abbildung 5-15 : Terrassentür beim Ausgang Treppenhaus im obersten Stock [Quelle HTA Luzern].	35
Abbildung 5-16: Rahmen der Terrassentür bei der Attikawohnung [Quelle HTA Luzern].....	35
Abbildung 5-17: Boden im Bereich der Terrassentür der Attikawohnung [Quelle HTA Luzern].....	36
Abbildung 5-18: Dachvorsprung beim Liftschacht von Terrasse aus betrachtet [Quelle HTA Luzern].....	36
Abbildung 5-19: Ecke Garage und Treppenhaus [Quelle HTA Luzern].	37
Abbildung 5-20: IR Subtraktion: Oberkante der Dachaufgangstüre [10].....	38
Abbildung 5-21: IR Normalbild: Untere Ecke der Dachaufgangstüre [10].	38
Abbildung 5-22 : IR Subtraktion: Steckdose bei Dachlukarne [10].	38
Abbildung 5-23 : Südecke Wohnzimmer 3.OG [10].	38

Abbildung 5-24 : Bild a, [8].....	39
Abbildung 5-25 : Bild b, [8].	39
Abbildung 5-26 : Bild c, [8].....	39
Abbildung 5-27 : Summenhäufigkeitsdiagramme der Temperatur [Komfort Winter.xls / Komfort Sommer.xls].....	43
Abbildung 5-28 : Summenhäufigkeitsdiagramme der korrigierten Raumluftfeuchte [Korrektur relative Feuchte.xls].....	44
Abbildung 5-29 : Raumluftfeuchte in Funktion der Aussenlufttemperatur [Feuchtekorrelation.xls].....	47
Abbildung 5-30 : Abluftfeuchte in Funktion der Aussenlufttemperatur aus Messungen HTA Luzern [Abluftfeuchten.xls].....	48
Abbildung 5-31 : Abluftfeuchte in Funktion der Aussenlufttemperatur aus Erhebungen des Passivhausinstitutes.....	48
Abbildung 5-32 : Summenhäufigkeitsdiagramme der relativen Feuchte [Komfort Winter.xls / Komfort Sommer.xls]	49
Abbildung 5-33 : Aussenluftrate pro Person in Funktion der mittleren Raumluftfeuchte [Lüftung Komfort.xls].....	50
Abbildung 5-34 : Spezifischer Elektrizitätsverbrauch Haushalt [Elektrische Energie.xls].....	54
Abbildung 5-35: Energieverbrauch in Funktion der Belegungsdichte [Elektrische Energie.xls]	55
Abbildung 5-36 : Personenbezogene Leistung Haushalt [Elektrische Energie.xls]	56
Abbildung 5-37 : Personenbezogene Leistung Haushalt in Abhängigkeit der Haushaltsgrosse. [Elektrische Energie.xls].....	56
Abbildung 5-38: Kennzahlen für den spezifischen Energieverbrauch der Lüftung bzw. der Luftförderung [Lüftungsenergie.xls].....	58
Abbildung 5-39 : Spezifischer Energieverbrauch für die Luftförderung [Lüftungsenergie.xls].....	60
Abbildung 5-40 : Heizenergieverbrauch mit dem Grenzwert nach Passivhaus-Institut Darmstadt. [Heizen.xls]	61
Abbildung 5-41 : Personenbezogene Leistung für Heizung und Warmwasser [Heizen.xls]	62
Abbildung 5-42 : Verhältnis Q_h/Q_{WW} in Funktion des Nutzungsgrads η_{SPV} [Warmwasserverhältnis.xls]	63
Abbildung 5-43 : Primärenergieverbrauch nach PHPP [Primärenergie.xls]	64
Abbildung 5-44 : Personenbezogene Primärleistung für Heizen und Wohnen [Primärenergie.xls].....	65
Abbildung 5-45 : Schalldruckpegel im Freien vor dem Passivhaus Rapperswil [Schallmessung.xls]	67
Abbildung 5-46 : Schalldruckpegel im Grossraumbüro EG des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls]	69
Abbildung 5-47 : Schalldruckpegel in der Pausenecke des Büro EG des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls]	70
Abbildung 5-48 : Schalldruckpegel im Grossraumbüro im Obergeschoß des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls]	71
Abbildung 5-49 : Schalldruckpegel in der Pausenecke des Büros OG des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls]	72
Abbildung 5-50 : Schalldruckpegel im Schlafzimmer der Attika des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls]	73
Abbildung 5-51 : Schalldruckpegel im Esszimmer in der Attika des Passivhauses Rapperswil [Schallmessung.xls].....	74
Abbildung 5-52 : Schalldruckpegel im Schlafzimmer 2. OG des Passivhaus Unterägeri [Schallmessung.xls]	76
Abbildung 5-53 : Schalldruckpegel im Wohnzimmer 2. OG des Passivhaus Unterägeri [Schallmessung.xls].....	77
Abbildung 5-54 : Schalldruckpegel im Büro 3.OG des Passivhaus im Umbau Magnusstrasse Zürich [Schallmessung.xls]	79
Abbildung 5-55 : Schalldruckpegel im Schlafzimmer 3.OG des Passivhaus im Umbau Magnusstrasse Zürich [Schallmessung.xls].....	80
Abbildung 5-56 : Vergleich der Schalldruckpegelmessungen [Schallmessung.xls]	81
Abbildung 5-57 : Planungswerte für die Belegung im Vergleich zur effektiven Belegung [Belegung.xls].....	82
Abbildung 5-58 : Spezifische Netto-Wohnfläche pro Person in den untersuchten Passivhäusern [Belegung.xls]	83
Abbildung 5-59: Abweichungen von den Passivhauskennwerten in Funktion der relativen Belegungsdichte [Belegung.xls]	84

Notizen