

Optimierte Luftheizung für MINERGIE-P und Passivhäuser



Ausgearbeitet durch

Anne Haas und Viktor Dorer, EMPA Energiesysteme/Haustechnik

.....

Im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

April 2004

Auftraggeber:

Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden
Bundesamtes für Energie

Auftragnehmer:

EMPA Abt. Energiesysteme/Haustechnik, Dübendorf
Hochschule für Technik + Architektur Luzern, Abteilung Heizung – Lüftung – Klima, Horw

Autoren:

Viktor Dorer
Anne Haas

Begleitgruppe:

Peter Hartmann, Prof. Dr., Zürcher Hochschule Winterthur
Werner Hässig, Dr., Basler & Hofmann, Zürich
Thomas Scheiwiller, Planforum GmbH, Winterthur
Jürgen Schnieders, Passivhaus Institut, Darmstadt, Deutschland
Mark Zimmermann, BFE Programmleiter "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"

2004

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

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.admin.ch/bfe

Vertrieb: EMPA ZEN, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, www.empa-zen.ch
ENET, Egnacherstrasse 59, 9320 Arbon, enet@temas.ch, www.energieforschung.ch

Zusammenfassung

MINERGIE-P und Passivhaus

Der Standard MINERGIE-P [MINERGIE] wurde erst während der Projektlaufzeit eingeführt. Darum, und weil die Literatur zum Passivhaus schon viel umfangreicher ist, fokussierte dieses Projekt auf den Passivhausstandard. Wenn sich Aussagen in diesem Bericht auf "das Passivhaus" beziehen, so ist darunter immer auch ein Gebäude mit MINERGIE-P-Standard zu verstehen.

Ausgangslage

Im Passivhaus kann das mechanische Wohnungslüftungssystem auch zur Raumheizung eingesetzt werden. Die Luftmengen orientieren sich dabei am hygienischen Bedarf. Die Lüftungs- und die Heizungsfunktion stellen zum Teil gegensätzliche Anforderungen an Luftführung und Auslegung des Systems. Vermehrt werden Holzöfen im Wohnraum als Zusatzheizung eingebaut. Dabei können Probleme mit der Verteilung der Wärme auftreten.

Projektziel

Ziel des Projektes ist es, zu klären, wie stark das Luftverteilssystem vereinfacht werden kann, inwieweit eine "Lüftungsanlage mit Lufterwärmung"¹ auch für Nicht-Passivhäuser geeignet ist, wie die Gebäudemasse als Wärmeüberträger und Speicher zu nutzen ist, wie sich die Wärme eines Ofens im Raum verteilt, und welche Anforderungen an solche Öfen zu stellen sind.

Projektinhalt

Fragen des thermischen Komforts und der Effizienz der Luftverteilung im Raum wurden durch Labormessungen und durch Computational Fluid Dynamics (CFD)-Rechnungen evaluiert.

Die Luftführung in der Wohnung und die Möglichkeiten, die Gebäudemasse als Wärmeüberträger und Speicher zu nutzen, wurden im Hinblick auf Konsequenzen für die Zuluftzustände untersucht. Ebenso wurden Anforderungen bezüglich zeitlicher und räumlicher Verteilung von Zusatzwärme von Holzöfen bestimmt.

Die Erkenntnisse von Messungen in P+D-Gebäuden, in selbständigen Erfolgskontroll-Projekten durchgeführt, und ergänzende Aspekte wurden in die Auswertung mit einbezogen.

Wesentliche Erkenntnisse

Gemäss Passivhaus Institut "Passivhaus Qualitätsanforderungen" [PHQ] muss in einem Passivhaus (Wohnnutzung) ein behagliches Innenklima ohne separates Heizsystem und ohne Klimaanlage erreichbar sein. Diese zentrale Forderung definiert die Anforderungen an die Gebäudehülle, die letztlich in

¹ nach [SIA 2023] soll die Bezeichnung "Lüftungsanlage mit Lufterwärmung" statt "Luftheizung" für eine Lüftungsanlage mit Heizfunktion verwendet werden. Lüftungsanlagen ohne Heizfunktion heissen danach "einfache Lüftungsanlage".

dem allgemein bekannten Wert für den Heizwärmebedarf von $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (bezogen auf die Nettowohnfläche) zusammengeführt werden (siehe Abschnitt 1.2). Der notwendige Luftaustausch wird mindestens in der Heizsaison mit einer einfachen Lüftungsanlage (Zu- und Abluftanlage mit effizienter Wärmerückgewinnung (WRG)) bewerkstelligt.

Thermischer Komfort - Temperaturen

Raumtemperaturen

Raumtemperaturen in Passivhäusern bewegen sich in der üblichen Streubreite, die auch in konventionellen Wohnungen auftreten [CEPHEUS].

Im Gegensatz zur Situation in konventionellen Bauten unterscheiden sich in Passivhäusern Luft- und Strahlungstemperatur kaum. Die Oberflächentemperaturen an der Innenseite der Außenwände liegen in der Regel weniger als 0.5 K unter der Raumlufttemperatur. Auch die inneren Oberflächen der Fenster weisen bei -10°C Außentemperatur Temperaturen von maximal 3 K unter der Raumlufttemperatur auf.

Asymmetrien der Strahlungstemperatur

Asymmetrien der Strahlungstemperatur bleiben damit auch ohne kompensierende Heizflächen weit unter den zulässigen Werten (10 K zwischen zwei Seiten).

Lufttemperaturgradienten

Vertikale Lufttemperaturgradienten sind praktisch oft kaum messbar, sowohl in Messungen in der Luftströmkammer, als auch in bewohnten Wohnungen.

Im Passivhaus werden auch bei Warmluftzufuhr im oberen Raumbereich oft über die gesamte Höhe des Aufenthaltsbereichs kaum 1 K erreicht. Selbst bei zweigeschossiger offener Bauweise treten keine grösseren Gradienten auf (siehe Abschnitt 4.6). Nach [SIA 180] sind zwischen 0.1 m und 1.1 m Höhe Lufttemperaturgradienten von 3 K/m zulässig.

Über- und Unterschreitung des Komfortbereichs der Raumtemperatur

Im Sommer sind in Passivhäusern die auch sonst üblichen Massnahmen gegen Überhitzung zu treffen. In der Übergangszeit und im Winter kann es ohne ausreichenden Sonnenschutz schneller als in konventionellen Gebäuden zu Überhitzung durch solare Gewinne kommen (siehe auch Heizlast). Zu bedenken ist jedoch, dass das solare Angebot besser genutzt werden kann, wenn leichte Übertemperaturen (in einzelnen Bereichen der Wohnung) zugelassen werden.

Thermischer Komfort - Zugluftrisiko

Die oben dargelegten hohen Oberflächentemperaturen der Außenbauteile, die erforderliche wärmebrückenfreie Konstruktion und die erforderliche Dichtigkeit der Gebäudehülle verhindern das Auftreten von Zuglufterscheinungen durch Kaltluftabfall an Außenwänden. Lediglich bei Verglasungen über mehr als eine Geschosshöhe sind eventuell (konstruktive) Gegenmassnahmen notwendig.

Auch die Einbringung der Zuluft in den Raum verursacht keine inakzeptablen Zugluftrisiken. Wesentlich hierfür ist die im Passivhaus übliche Begren-

zung der Luftmengen auf das hygienisch notwendige Minimum. Die Auswahl des Typs und der Position des Zuluftdurchlasses (ZLD) im Raum ist durch Komfortbedingungen kaum eingeschränkt. Andere Aspekte können bei der Entscheidung Priorität haben: Minimierung der Kanallänge, Akustik, Ästhetik etc. (siehe Abschnitte 4.4 und 4.7).

Luftaustauschwirkungsgrad

Auch für den Luftaustauschwirkungsgrad im Raum sind Typ und Position des ZLD von untergeordneter Bedeutung. Kurzschlussströmungen sollten jedoch vermieden werden. Die Anordnung von ZLD und Überströmöffnung bzw. Abluftdurchlass (ALD) an gegenüber liegenden Wänden auf gleicher Höhe ist dabei kritischer als die Anordnung nahe beieinander an der gleichen Wand.

Die Luftaustauschwirkungsgrade liegen praktisch immer im Bereich von 0.45 bis 0.55, was auf eine weitgehende Durchmischung der Raumluft hinweist (siehe Abschnitte 4.5 und 4.7).

Zonierung / Nachtabsenkung

In einem Passivhaus gibt es in der Regel kaum Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Räumen. Auf Änderungen der Heizleistung reagiert das Gebäude nur sehr langsam. Infolge dessen kann durch Zonierung oder Nachtabsenkung praktisch keine Energieeinsparung mehr bewirkt werden. Tiefere Temperaturen im Schlafzimmer sind physiologisch nicht notwendig, werden manchmal aber gewünscht. Wie dieser Wunsch oder der nach einer höheren Badezimmertemperatur erfüllt werden kann, wird in Abschnitt 3.5 kurz dargestellt.

Luftraten und Luftheizung

Die Anforderungen an ein Passivhaus sind so festgelegt, dass in der Regel der kleine Heizleistungsbedarf durch eine Erwärmung der Zuluft (max. 50°C Vorlauftemperatur im Heizregister) bei Luftraten entsprechend den Luftqualitätsanforderungen gedeckt werden kann.

Luftmengen

Luftmengen werden nach dem hygienischen Bedarf (24 bis 30 m³/h.Person) festgelegt. Kann die erforderliche Heizleistung nicht mit dieser Luftrate zur Verfügung gestellt werden, so ist eine Ergänzungsheizung vorzusehen (z.B. ein Heizkörper im Bad). Zu bedenken ist auch, dass unter Umständen die notwendige Heizleistung nicht mehr eingebbracht werden kann, wenn aus Gründen zu trockener Luft die Luftrate reduziert wird.

Die gegensätzlichen Anforderungen – höhere Luftrate für Heizleistung, kleinere gegen tiefe Feuchte – können im nicht zu trockenen Winterklima (Mittelgebirge) im Passivhaus gerade erfüllt werden. Gebäude mit tieferem Dämmstandard benötigen eine Zusatzheizung. Auch eine Anlage mit Rezirkulation ist denkbar. Diese ist aber aufwendiger, und es können Luftqualitätsprobleme durch die Verteilwirkung auftreten (siehe Abschnitt 2.2 und Kapitel 7).

Eine Zusatzheizung kann auch im Passivhaus nötig sein, wenn die Heizenergie nur auf einem tieferen Temperaturniveau als 50°C zur Verfügung steht (Solaranlage, Wärmepumpe).

Feuchte

Taupunktsunterschreitungen sind bei Oberflächentemperaturen, die so nahe an der Raumlufttemperatur liegen, und bei kontinuierlichem Luftwechsel über die Lüftungsanlage praktisch nicht mehr möglich. Somit ist auch eine wesentliche Quelle von Bauschäden ausgeschaltet.

Im Winter weist die zugeführte Frischluft einen sehr geringen Feuchtegehalt auf. Um zu trockene Raumluft zu vermeiden, müssen die Luftraten auf das hygienisch notwendige Mass begrenzt werden (siehe oben). Die Luftraten sollten wenn möglich der aktuellen Belegung angepasst werden. Im Bedarfsfall sollten die NutzerInnen die Luftraten weiter reduzieren können, bei Anwesenheit bis auf $18 \text{ m}^3/\text{h.Person}$, bei Abwesenheit auf Grundlüftung (siehe Abschnitt 2.3).

Heizlast

Solare (und interne) Gewinne sind bei der Ermittlung der Heizlast in einem Passivhaus nicht vernachlässigbar. Das Passivhaus-Projektierungspaket [PHPP 02/03] enthält ein validiertes Verfahren zur Berechnung der Heizlast und der verfügbaren Heizleistung der Zuluft. Die Schweizer Norm "Wärmeleistungsbedarf von Gebäuden" [SIA 384/2] wird überarbeitet, sodass zurzeit noch keine auf Schweizerische Randbedingungen abgestimmte Berechnungsmethode für Gebäude mit sehr niedrigem Leistungsbedarf zur Verfügung steht.

Im Baubeschrieb sollte deshalb die Anwendung der SIA 384/2 bis zum Vorliegen der neuen Fassung ausgeschlossen werden.

Da die Heizleistung der Zuluft nur bedingt zum (Wieder-)Aufheizen eines ausgekühlten Gebäudes ausreicht, sollten Passivhäuser im Winter auch bei (längerer) Abwesenheit durchgeheizt werden. Energieeinsparungen sind durch eine Reduktion der Heizleistung kaum noch zu erzielen, und das Wiederaufheizen dauert entweder sehr lange, oder erfordert grössere Heizleistungen.

Ein Ausfall des Heizsystems für einen Tag ist im Passivhaus unkritisch, da die Temperatur aufgrund der geringen Verluste nur sehr langsam abnimmt.

Im Notfall können Zusatzgeräte zur Aufheizung verwendet werden: meist reicht es, z.B. den Herd einige Zeit in Betrieb zu nehmen. Beim Aufheizen vor dem Erstbezug und zur Unterstützung der Bauaustrocknung können mobile Heizgeräte eingesetzt werden (siehe Abschnitt 2.2).

Wärmeabgabe von Luftkanälen

Zwischen dem Zuluftkanal und seiner Umgebung treten bei Lüftungen mit Heizungsfunktion zeitweise auch innerhalb des Dämmperimeters eines Gebäudes erhebliche Temperaturdifferenzen auf, und damit, je nach Dämmstärke, u. U. auch erhebliche Wärmeströme über die Kanalwände.

Ungedämmte Kanäle können auf 5 m ca. 1/3 des Wärmeinhalts der warmen Zuluft an die Umgebung abgeben. 1 cm Isolation reduziert diese Abgabe um die Hälfte. Bei offen oder in abgehängten Decken verlegten Kanälen reagiert die Zulufttemperatur am ZLD aber nach wie vor flink auf Änderungen der Heizleistung. Ohne Isolation in Beton verlegt, wird ein Temperatursprung

sowohl am ZLD verzögert, als auch in der Wärmeabgabe der Bauteiloberfläche an den Raum. Die Heizung über die Zuluft reagiert bei geringer Dämmung des Luftkanals im Bauteil also unerwartet träge, eine Entkopplung kann aber durch gezielte Dämmung bewirkt werden. Wird der Zuluftkanal ins Schlafzimmer unisoliert und offen durch das Bad geleitet, kann im Schlafzimmer die Raumtemperatur gesenkt, und im Bad erhöht werden (siehe Abschnitt 3.3).

Wärmeverteilung in der Wohnung, Temperaturzonierung

Von einem Raum mit nur Zuluft zum nächsten Raum wird Wärme etwa zu gleichen Teilen durch die trennende Innenwand und durch überströmende Luft transportiert. Bei offenen Grundrissen, und generell wenn die Innen türen offen sind, wird die Wärme hingegen hauptsächlich durch natürliche konvektive Strömungen ausgetauscht. Dieser Wärmestrom kann eine Größenordnung grösser sein als die beiden erstgenannten. Damit findet rasch ein Ausgleich der Temperaturen in der Wohnung statt (siehe Abschnitt 3.4).

Auf ein aufwendiges Verteilsystem für die Heizwärme kann unter daher verzichtet werden. Ein "einfaches" Heizsystem genügt. Umgekehrt bedeutet dies, dass besondere Vorkehrungen getroffen werden müssen, wenn Räume einer Wohnung unterschiedliche Temperaturen haben sollen (siehe Abschnitt 3.5).

Regelung und Einstellmöglichkeiten

Luftmenge und Solltemperatur müssen unabhängig voneinander eingestellt werden können. Die Regelung der Wärmezufuhr erfolgt über die Zulufttemperatur. Der zugehörige Raumtemperaturfühler wird zentral in der Wohnung angebracht.

Die Luftmenge, und in der Regel auch die Raumtemperatur, müssen auch in Mehrfamilienhäusern individuell pro Wohnung eingestellt werden können. Die Lüftung sollte mindestens die Stufen Aus, Grundlüftung, Normal, Bedarf aufweisen (siehe Abschnitt 3.6).

Holzofen

Die minimale Feuerleistung von Holzöfen ist begrenzt durch die Notwendigkeit, eine effiziente und saubere Verbrennung zu gewährleisten. Die Wärmeabgabeleistung hängt von der Feuerleistung und dem Wärmespeicher vermögen des Ofens ab. Selbst die kleinsten verfügbaren Öfen sind zur Beheizung von Wohnungen in einem Passivhaus an und für sich überdimensioniert. Öfen, die einen Teil der Wärme über einen Wärmetauscher an den Warmwasserspeicher abgeben können, haben hier Vorteile.

Die Konvektion bei offenen Innen türen ermöglicht, dass sich die Wärme eines im Wohnraum aufgestellten Holzofens in der Wohnung verteilt. Wird ein Passivhaus über längere Zeit ausschliesslich mit einem im Wohnraum aufgestellten Holzofen beheizt, stellen sich Temperaturdifferenzen von 2 bis 4 K zwischen den Räumen ein. Allerdings sind für Holzspeicheröfen sehr kleine Abgabekapazitäten nötig, um eine kurzzeitige Überhitzung im Wohnraum zu verhindern. Das Maximum der Abgabekapazität sollte 2 kW (in einer Wohnung von 130 m²) nicht übersteigen. Bei Stückholzöfen muss entweder

die Speichermasse so gross gewählt werden, dass die Wärmeabgabe über (mindestens) 24 h erfolgt, oder das Heizen muss im Tagesverlauf aufgeteilt werden auf mindestens zweimal Einfeuern. Pelletöfen verfügen zwar über bessere Regelungsmöglichkeiten, aber auch hier ist das Problem der kleinen Leistungsbedarf (siehe Kapitel 5).

Lüftungssystem

Ventilatoren / Balance

Eingesetzt werden vorzugsweise elektrisch kommutierte Gleichstrommotoren. Diese weisen einen sehr niedrigen Energiebedarf auf. Zuluft- und Abluftarten sollen in allen Betriebszuständen gleich sein (balancierte Anlage). Dazu ist im Prinzip eine Massenstromregelung erforderlich, die aber erst von wenigen Herstellern angeboten wird. Meist erfolgt eine Volumenstromregelung. Damit ist aber der Massenstrom temperaturabhängig: bei einer Temperaturdifferenz von 10 K ergeben sich Abweichungen von etwa 3 bis 4%.

Leckagen

Von Bedeutung sind vor allem Leckagen im Wärmetauscher, da sie den tatsächlichen Rückgewinnungsgrad verringern, und da sie die Luftqualität beeinträchtigen können.

Erhöhter Lüftungsbedarf

Wegen der hohen Abluftarten und der stark verschmutzten Abluft ist es nicht sinnvoll, Küchenabzugshauben an das Lüftungssystem anzuschliessen. Küchenabzugshauben sollten in Umluft betrieben werden.

Abzugshauben mit separater Fortluftführung und separater Nachströmöffnung kommen ebenfalls in Frage, sind aber bezüglich Betrieb und Dichtigkeit der Gebäudehülle kritischer.

Kurzes Stosslüften (ca. 10 Minuten, am besten Querlüftung) ist auch im Passivhaus geeignet, um kurzfristige hohe Belastungen der Luft effizient abzutransportieren. (siehe Abschnitt 6.1).

Inbetriebnahme, Abnahme

Für Lüftungen mit Heizfunktion geben die verfügbaren Unterlagen keine speziellen Hinweise. Das planungsgemäße Funktionieren der Lüftungsanlage mit Lufterwärmung setzt zunächst eine einwandfreie Funktion der Lüftungsanlage voraus.

Wichtige Punkte bei der Überprüfung der Heizfunktion sind insbesondere (siehe Abschnitt 6.8):

- Wärmeübertragung und Luftraten am Wärmetauscher
- Leistung des Heizregisters
- Einblastemperaturen an den ZLD
- Raumtemperaturen in einer kalten Periode

Abstract

MINERGIE-P and Passivhaus

The standard MINERGIE-P [MINERGIE], which translates the idea of the German Passive House standard to Swiss boundary conditions, has been introduced while the present project was already running. Therefore, and because there exists much more literature concerning Passive Houses, this project focused on the Passive House standard. However, statements in this report addressing "the Passive House" are valid for MINERGIE-P buildings, too.

Situation

In Passive Houses, the mechanical ventilation system can as well be used as the heating system. Air flow rates are chosen according to hygienic needs. Ventilation and heating have some contradictory requirements for the design and layout of the system. Wood stoves get more and more popular as additional heating system. Problems with heat distribution may result.

Goals

The purpose of the project is to show how a good system would look like, in how far heating by ventilation is suited for houses which only are close to comply with the Passive House standard, how the building mass is to be used for heat transmission and storage, how heat from a wood stove is distributed in the rooms, and which requirements the stoves have to fulfil.

Topics

Aspects of thermal comfort and of the efficiency of air distribution within the room have been evaluated by measurements in the air flow test chamber and by Computational Fluid Dynamics (CFD).

The impact of the air distribution within the dwelling and possibilities to use the building mass for heat transmission and storage have been evaluated with respect to supply air conditions. Requirements for the temporal and spatial distribution of supplementary heat from wood stoves have been determined.

Findings from measurements in P+D-buildings conducted in independent projects, and complementary aspects have been taken into account.

Findings

According to "Passivhaus Qualitätsanforderungen" [PHQ] published by the Passivhaus Institut, a comfortable indoor climate must be realizable in a Passive House (residential use) without separate heating system, and without air conditioning. This essential condition defines requirements which the building envelope has to fulfil, and which in the end are summed up into the well-known limit of 15 kWh/(m².a) (related to net living area) for the heating demand of a Passive House (see section 1.2). The necessary air exchange is guaranteed - at least during the heating season - via a balanced mechanical ventilation system with efficient heat recovery.

Thermal comfort - temperatures

Room temperature

Room temperatures in Passive Houses are in the usual range and show a distribution similar to the one found in conventional dwellings [CEPHEUS].

In contrast to conventional buildings, air and radiative temperature in Passive Houses are almost the same. Surface temperatures on the inner side of external walls are about 0.5 K below room air temperature. The inner surfaces of windows are no more than 3 K below room air temperature if the ambient temperature is around -10°C.

Asymmetries of the radiative temperature

Asymmetries of the radiative temperature need not be compensated for by heating surfaces and are well below the limits (10 K between two walls).

Gradient of the air temperature

The vertical gradient of the air temperature often is hardly measurable, both in the air flow test chamber and in occupied dwellings. Even with heated air supply in the upper part of a room, gradients are often less than 1 K over the entire height of the occupied zone in Passive Houses. Even in two-storey open rooms, no large gradients occur (see section 4.6). According to [SIA 180] between 0.1 m und 1.1 m height above floor a gradient of 3 K/m would be tolerable.

Room temperatures exceeding the comfort range

During summer, the usual measures to avoid overheating have to be taken in Passive Houses, too. In spring and autumn, overheating in Passive Houses without appropriate sunshade is more likely to occur than in conventional buildings (see heating load). However, if modest overheating is permitted (in some parts of the dwelling), better use can be made of passive solar gains.

Thermal comfort – draught risk

High surface temperatures of external walls, together with the required thermal bridge-free construction and the high airtightness of the building envelope, prevent cold air downdraught at external walls. However, if glazings extend over more than one storey, there might be a need for countermeasures.

The air supply to the room does not cause unacceptable draught risks. This is mainly due to the restriction of the air flow rates to hygienic requirements. Type and position of the supply air terminal device (supply ATD) within the room is not restricted by comfort requirements. Other aspects like minimizing the duct length, acoustics or aesthetics etc. may have priority (see sections 4.4 und 4.7).

Air exchange efficiency

The air exchange efficiency, too, is only weakly influenced by type and position oft the supply ATD. However, short-circuiting flow paths should be avoided. Placing supply and transfer ATDs on opposite walls in the same height is more critical than placing them close together on the same wall.

Air exchange efficiencies generally are found to be in the range 0.45 to 0.55, indicating a well mixed room air (see section 4.5 und 4.7).

Temperature zones and night time temperature set-point reduction

Generally, only minor temperature differences are found between the rooms in a Passive House dwelling. The building responds slowly on changes in heating power. Therefore no further energy savings can be achieved by temperature zoning and by reduction of the temperature set-point during night time. A lower temperature in the sleeping room is not necessary from a physiological point of view, either, but sometimes tenants want to have lower temperatures. Section 3.5 explains how intentional temperature differences can be established in a Passive House dwelling.

Air flow rates and air heating

The requirements for a Passive House have been defined so that generally the heating load can be covered by preheating the supply air (max. 50°C flow temperature after heating coils) and with air flow rates according to IAQ requirements.

Air flow rates

Air flow rates are chosen according to IAQ requirements (24 to 30 m³/h.person). If the necessary heating power cannot be supplied with these flow rates, a supplementary heating source has to be provided (e.g. a small radiator in the bathroom). Possibly, the available heating power is too low if flow rates are reduced to avoid low relative humidity.

Contradictory requirements – higher flow rates to provide enough heating power, lower flow rates to avoid low relative humidity – can be met in Passive Houses in a moderate winter climate (Mittelland). Buildings with less insulation need an additional heating. Systems with recirculation are also possible. However, these systems are more complicated and expensive, and IAQ is more critical because pollution loads may be redistributed (see section 2.2 and chapter 7).

An auxiliary heating may be necessary in a Passive House if heat is delivered with less than 50°C (solar system, heat pump).

Humidity

Surface temperatures below dew point temperature are practically impossible in Passive Houses due to the very small temperature differences between surfaces and room air, and due to the continuous air change provided by the mechanical ventilation. Therefore the main reason for building damages is eliminated.

Outdoor air has usually low humidity content in winter. To avoid uncomfortable dry room air, air exchange rates have to be restricted to the minimum required by IAQ (see above). Air flow rates should be adapted to the actual occupancy. If required, the occupants should be able to further reduce the flow rate, if persons are present to 18 m³/h.person, if unoccupied to the basic air flow rate (see section 2.3).

Heating load

Solar (and internal) gains cannot be neglected when the heating load of a Passive House is determined. In the "Passivhaus-Projektierungspaket" [PHPP 02/03] a new method has been implemented to calculate the heating load and the available heating power via supply air. The Swiss code "Wärmeleistungsbedarf von Gebäuden" [SIA 384/2] is being revised. This means that at the time being no method compatible with Swiss boundary conditions is available to calculate the heating load of buildings with a very low heating demand.

Therefore the building specifications should explicitly exclude the application of SIA 384/2 until the revised version is available.

During (longer) periods of absence, the heating in a Passive House should not be reduced, because the heating power of the supply air is limited. Energy savings are hardly to achieve by reducing the heating power, and regaining the set-point temperature takes either a long time or requires a larger heating power.

A breakdown of the heating system for about one day constitutes no problem as the room temperature decreases very slowly due to largely reduced losses.

If necessary, auxiliary heating devices may be used to (re)gain the set-point temperature: in most cases it is sufficient to put on the oven for a while. Mobile heating appliances may be used to heat a dwelling before the first occupants move in, or to support drying out a newly erected building (see section 2.2).

Heat transfer (losses) from ducts

Large temperature differences occur frequently between supply air ducts and their surroundings within the thermal envelope with heating by ventilation.

Ducts without insulation may deliver about 1/3 of the heat content of the supply air to the surroundings along the first 5 m. Applying 1 cm of insulation reduces the heat flow to the surroundings by 50%. Nevertheless, the supply air temperature at the supply ATD adapts quickly to changes in the heating power if ducts are mounted on the surface or in hollow ceilings. Imbedding ducts into concrete without insulation results in a delay and a dampening of a temperature step at the air heater both at the supply ATD and at the concrete surface. The air heating system shows a surprisingly high inertia. A decoupling from the building mass can be achieved by applying insulation. The supply temperature in the sleeping room can be lowered and at the same time the bathroom temperature can be risen by leading the respective supply air duct through the bathroom with no insulation (see section 3.3).

Heat distribution in the dwelling, temperature zones

Heat from a room in the supply zone is transferred to a neighbouring room in roughly equal shares via the separating wall and via the transferred air (closed door). Open doors or more general open floor plans allow for natural convection. The heat transfer via natural convection is about one order of

magnitude larger than that via transmission or mechanically forced ventilation (see section 3.4).

Under these circumstances, a sophisticated heat distribution system is not necessary. A "simple" heating system will work. On the other hand this means that special measures are necessary to keep rooms at different temperatures if this is required (see section 3.5).

Settings and control

It must be possible to choose air flow rates and set-point temperature independently. Heat supply is adjusted by varying the supply air temperature. The sensor for the room temperature is placed in the central part of the dwelling.

In multifamily houses it must be possible to set the air flow rate, and mostly the room temperature, too, individually per dwelling. The ventilation should have at least the settings "off", "basic", "normal", and "high" (see section 3.6).

Wood stove

The lower limit for the combustion capacity of a wood stove is given by the demand for an efficient combustion with low pollutant emissions. The capacity of heat delivery to the room depends on the combustion capacity and on the heat capacity of the stove. Even the smallest available stoves actually are oversized for dwellings in a Passive House. Stoves which can deliver part of the heat to e.g. the hot water storage with an additional heat exchanger are better suited.

The convection through open doors is essential to distribute the heat from a wood stove placed in the living room. If a Passive House is heated solely by a wood stove for a longer period, temperature differences of 2 to 4 K are established between the rooms. However, to avoid overheating of the living room, a very low capacity is required. The maximum heating power delivered to the room should not exceed 2 kW (in a dwelling with 130 m² floor area). Stoves using firewood must either have a very large heat capacity, allowing for a heat delivery for 24 h (or more), or the heat release has to be split into two firing periods per day. Pellet stoves are easier to control, but the small heating load remains a problem (see chapter 5).

Ventilation system

Fans / balance

Fans with speed controlled electronically commutated DC motors are used, which are very efficient. Supply and extract flow rates should be balanced under all operating conditions. This requires mass flow control, which up to now is offered only by few manufacturers. Mostly volume flow control is used. Then the mass flow is temperature dependent: a temperature difference of 10 K gives rise to 3 to 4% deviation in mass flow.

Leakage

Most important are leakages in the heat exchanger, because the actual efficiency of the heat recovery is reduced, and extract air may be recirculated unintentionally.

Increased air exchange rates

Kitchen hoods are not coupled to the ventilation system because they have much higher extract rates and because the extract air has a high pollution load. Kitchen hoods should be operated in recirculation mode.

Hoods with own extract air and own outdoor air supply may be installed, but are not recommended because of the additional leakage introduced into the building envelope.

Intense airing during short intervals (ca. 10 minutes, cross ventilation if possible) is well suited also for Passive Houses if short-term pollution loads are to be removed efficiently (see section 6.1).

Commissioning

There are no special guidelines for ventilation systems with air heating in the existing literature. Basically, the prerequisite for a good performance of the air heating is that the ventilation system itself works properly.

It is especially important to check:

- heat transfer and flow rates at the heat exchanger
- capacity of the air heater
- supply air temperatures at the supply ATDs
- room temperatures in a cold period

(see section 6.8).

Résumé

MINERGIE-P et maison passive

Le standard MINERGIE-P [MINERGIE] a été introduit alors que ce projet était déjà en cours. C'est pour cette raison et parce que la bibliographie sur les maisons passives est beaucoup plus vaste que ce projet se concentre sur le standard maison passive. Ainsi lorsque ce rapport fait mention de faits se rapportant à la «maison passive» (Passivhaus), ces faits se rapportent aussi toujours à un bâtiment «MINERGIE-P».

Situation initiale

Dans une maison passive, le système de ventilation mécanique peut aussi s'utiliser pour le chauffage. Les quantités d'air sont déterminées par les exigences en matière d'hygiène de l'air. Les fonctions de ventilation et de chauffage posent en partie des exigences contraires pour ce qui est de la distribution de l'air et du dimensionnement du système. De plus en plus souvent des chauffages au bois sont installés comme chauffage d'appoint dans les locaux de séjour, ce qui peut conduire à ces problèmes dans la distribution de la chaleur.

But du projet

Le but de ce projet était d'éclaircir dans quelle mesure il est possible de simplifier les systèmes de distribution d'air, si les installations de ventilation avec chauffage à air sont aussi adaptées aux maisons non passives, comment la masse du bâtiment peut s'utiliser comme échangeur et accumulateur de chaleur, comment la chaleur émise par un poêle se distribue dans une pièce et quelles sont les exigences posées à un tel poêle.

Contenu du projet

Les questions du confort thermique et de l'efficacité de la distribution de l'air dans les pièces ont été évaluées par des mesures en laboratoire et par calcul de dynamique des fluides.

On a étudié les conséquences sur l'amenée d'air soufflé des modalités de la distribution de l'air dans les pièces et de l'utilisation de la masse du bâtiment comme échangeur et accumulateur de chaleur. On a également déterminé quelles sont les exigences que pose la distribution spatiale et temporelle de la chaleur d'appoint fournie par les poêles à bois.

Les résultats de mesures sur des bâtiments P+D obtenues dans des projets de contrôle d'efficacité réalisés en régie propre et certains aspects complémentaires sont encore été pris en compte dans l'évaluation

Principaux résultats

Selon les exigences de qualité pour maison passive du «Passivhaus Institut», dans une maison passive, un climat confortable doit pouvoir être atteint sans système de chauffage séparé et sans installation de climatisation. Cette exigence essentielle définit les performances requises de l'enveloppe du bâtiment qui s'expriment finalement dans la valeur bien connue des be-

soins de chaleur pour le chauffage demandée de 15 kWh/m².a (rapportée à la surface d'habitation nette) (voir aussi paragraphe 1.2). Le renouvellement d'air nécessaire est assuré, au moins durant la saison froide, par une installation de ventilation simple (installation de ventilation mécanique avec aménée et extraction d'air et récupération de chaleur).

Confort thermique – températures

Température ambiante

Dans les maisons passives, les températures des pièces varient avec la même dispersion que dans les habitations conventionnelles [CEPHEUS].

Au contraire de ce qui se passe dans les bâtiments conventionnels, dans les maisons passives la température de l'air et la température de rayonnement ne diffèrent guère entre elles. Les températures superficielles de la face intérieure des murs extérieurs sont en règle générale inférieures de moins de 0.5 K à celle de l'air ambiant intérieur. Sur les surfaces intérieures des fenêtres elles aussi, à des températures extérieures de -10°C, la température est inférieure d'au maximum 3 K à celle de l'air ambiant intérieur.

Asymétrie des températures radiante

Les asymétries de la température radiante demeurent bien inférieures aux valeurs admissibles (10 K entre deux faces) cela même sans surfaces de chauffage compensatrices.

Gradients de température de l'air

Des gradients verticaux de température de l'air ne sont souvent pratiquement pas mesurables, cela aussi bien lors des mesures dans une chambre de mesure des écoulements d'air que dans des logements habités. Dans les maisons passives, même en cas d'apport de chaleur dans la partie supérieure, la différence atteint souvent à peine de 1 K sur la totalité de la hauteur de la zone occupée. Même avec des constructions ouvertes sur deux étages il n'apparaît pas de gradients plus importants (cf. paragraphe 4.6). Selon la norme [SIA 180] entre 0.1 et 1.1 m de hauteur des gradients de température de l'air de 3 K/m sont admissibles.

Sur- et sous-dépassement des tolérances de confort de la température ambiante

En été, il faut prendre dans les maisons passives elles aussi les mesures usuelles contre une surchauffe. Durant la période de transition et en hiver, sans protection solaire suffisante, les gains solaires peuvent conduire plus rapidement à une surchauffe que dans les bâtiments conventionnels (voir aussi puissance de chauffage nécessaire). On relèvera encore qu'il est possible de mieux tirer profit de l'énergie solaire si l'on admet de légères sur-températures dans certaines zones de l'habitation.

Confort thermique – risques de courants d'air

Les températures superficielles élevées des éléments de construction donnant sur l'extérieur, l'exigence d'une construction exempte de ponts thermiques et étanche à l'air préviennent l'apparition de phénomènes de courants d'air dus à des courants d'air froid le long des murs extérieurs. Ce n'est que

sur les vitrages d'une hauteur supérieure à un étage que des mesures de prévention (au niveau de la construction) sont éventuellement nécessaires.

Même l'apport d'air soufflé dans les pièces ne provoque pas de risques de courants d'air inacceptables. Sur ce point la limitation usuelle dans les maisons passives de l'apport d'air au minimum exigé sur le plan de l'hygiène joue un rôle important. Les exigences de confort n'imposent quasiment aucune limite au type et à l'emplacement des bouches d'air soufflé dans la pièce. D'autres aspects peuvent avoir une priorité dans la décision: minimisation de la longueur des gaines, acoustique, esthétique, etc. (cf. paragraphes 4.4 et 4.7).

Rendement de renouvellement d'air

Le type et la position des diffuseurs n'exercent pas non plus d'influence importante sur le rendement de renouvellement d'air dans la pièce. Il est toutefois nécessaire d'éviter les écoulements «en court-circuit». La disposition des bouches d'air soufflé et évacué à une même hauteur sur des parois opposées est plus critique qu'une disposition côté à côté sur la même paroi.

Les rendements de renouvellement d'air se situent pratiquement toujours dans le domaine de 0.45 à 0.55, ce qui est le signe d'un mélange complet de l'air ambiant (cf. paragraphes 4.5 et 4.7).

Zonage / réduction du chauffage durant la nuit

Dans une maison passive il n'y a pratiquement pas de différences de température entre les différentes pièces. Le bâtiment ne réagit que très lentement aux variations de la puissance thermique. De ce fait, un zonage ou une réduction du chauffage durant la nuit ne permet pratiquement plus de réaliser des économies d'énergie. Bien que cela ne soit physiologiquement pas nécessaire, certaines personnes désirent une température plus basse dans leur chambre à coucher. Le paragraphe 3.5 décrit comment y parvenir et aussi comment obtenir une température plus élevée dans les salles de bain.

Débits d'air et chauffage à air

Les exigences posées à une maison passive sont fixées de telle manière que, en règle générale, la faible puissance thermique nécessaire peut être assurée par un réchauffement de l'air soufflé (température aller max. 50°C sur le registre de chauffage) avec les débits d'air correspondant aux exigences de qualité de l'air.

Débits d'air

Le débit d'air est déterminé par les exigences d'hygiène (24 à 30 m³/h.personne). Si la puissance thermique nécessaire ne peut pas être assurée avec ces débits d'air, il faut prévoir un chauffage d'appoint (p. ex. un radiateur dans la salle de bain). Il faut aussi relever que, suivant les circonstances, le chauffage nécessaire ne peut pas être assuré si l'on réduit de débit d'air lorsque l'air est trop sec.

Ces exigences contraires – débits d'air élevés pour assurer la puissance thermique nécessaire, faibles débits d'air pour lutter contre un taux d'humidité trop bas – peuvent encore être juste respectées dans une maison

passive avec un climat hivernal pas trop sec (Plateau suisse). Les bâtiments présentant un standard d'isolation moins élevé demandent un chauffage d'appoint. On peut aussi envisager une installation avec recirculation de l'air; ces installations sont toutefois plus coûteuses et peuvent conduire à l'apparition de problèmes de qualité de l'air par effet de redistribution (cf. paragraphe 2.2 et chapitre 7).

Un chauffage d'appoint peut aussi être nécessaire dans une maison passive lorsque l'énergie de chauffage disponible présente un niveau de température inférieur à 50°C (capteurs solaires, pompe à chaleur).

Humidité

Avec des températures superficielles internes aussi proches de celle de l'air et avec un renouvellement continu de l'air assuré par une installation de ventilation mécanique, l'apparition de températures inférieures au point de rosée est pratiquement exclue, ce qui élimine aussi une cause importante de dommages dans les bâtiments.

En hiver, l'humidité absolue de l'air frais est très basse. Pour éviter que l'air intérieur ne soit trop sec, le débit d'air doit être réduit au minimum nécessaire pour assurer l'hygiène de l'air (voir plus haut). Les débits d'air devraient autant que possible être adaptés au taux d'occupation momentané des locaux. En cas de besoin, les occupants devraient avoir la possibilité de réduire encore le débit d'air, jusqu'à 18 m³/h.personne si les locaux sont occupés, et jusqu'à la ventilation minimale lorsque le bâtiment est inoccupé (cf. paragraphe 2.3).

Puissance thermique nécessaire

Les gains solaires et les gains internes ne sont pas négligeables pour la détermination de la puissance thermique nécessaire dans une maison passive. Le «paquet de projet maison passive» (Passivhaus-Projektierungspaket) [PHPP 02/03] donne une méthode validée pour le calcul de la puissance thermique nécessaire et de la puissance thermique disponible de l'air soufflé. La norme suisse «Puissance thermique à installer dans les bâtiments» [SIA 384/2] est en cours de révision de sorte qu'il n'existe actuellement pas de méthode de calcul adaptée aux conditions suisses pour les bâtiments à faible consommation d'énergie.

Ainsi la description des travaux devrait mentionner que l'application de la norme SIA 384/2 est exclue jusqu'à ce qu'une nouvelle version ait été publiée.

Comme la puissance thermique disponible de l'air soufflé ne suffit d'une manière générale pas à (re)chauffer une maison qui s'est refroidie, les maisons passives devraient être continuellement chauffées en hiver même en cas d'absence (prolongée). Des économies d'énergie par réduction de la puissance de chauffage ne sont là plus guère possibles et le réchauffement du bâtiment dure soit très longtemps soit demande une puissance thermique plus élevée.

Une panne du système de chauffage pour une journée ne pose pas de problème dans une maison passive car la température ne s'abaisse que très lentement du fait des faibles déperditions calorifiques du bâtiment.

En cas de nécessité, des appareils de chauffage d'appoint peuvent être utilisés pour amener le bâtiment à température: le plus souvent il suffit p. ex. de mettre la cuisinière en service durant un moment. Pour le chauffage lors de la première occupation ou pour accélérer le séchage du bâtiment, il est possible de faire appel à des appareils de chauffage mobiles (cf. paragraphe 2.2).

Déperditions de chaleur des gaines de ventilation

Sur les installations de ventilation avec chauffage de l'air, les différences de température entre la gaine et son environnement peuvent être importantes et cela même à l'intérieur du périmètre isolé. Ainsi, suivant l'épaisseur de l'isolation thermique des gaines, un flux thermique important peut apparaître à travers leurs parois.

Sur les gaines non isolées, l'air amené chaud peut céder jusqu'à 1/3 de sa chaleur à l'air ambiant sur une longueur de 5 m. Une isolation de 1 cm d'épaisseur réduit ces déperditions de moitié. Avec des gaines libres ou montées dans des plafonds suspendus, la température de l'air à la sortie des bouches d'air soufflé réagit de manière rapide aux variations de la puissance thermique. Avec des gaines posées sans isolation dans le béton, les variations de température sont retransmises avec une certaine inertie à la sortie des diffuseurs de même qu'à la surface des éléments de construction. Avec une faible isolation des gaines de ventilation dans les éléments de construction, le chauffage réagit de manière étonnamment lente; un découplage peut cependant aussi être obtenu par une isolation ciblée. Si la gaine d'aménée pour la chambre à coucher est conduite sans isolation à travers la salle de bain, ceci permet d'abaisser la température dans la chambre à coucher et de l'augmenter dans la salle de bain (cf. paragraphe 3.3).

Distribution de chaleur dans l'habitation, création de zones de température

Le transport de chaleur entre une pièce équipée uniquement d'une bouche d'air soufflé et une pièce voisine s'effectue environ pour moitié à travers la cloison de séparation et pour moitié par l'air qui s'écoule entre les deux pièces. Dans les maisons présentant une structure ouverte et d'une manière plus générale lorsque les portes de communication sont ouvertes, les échanges de chaleurs s'effectuent principalement par les courants de convection naturels. Ce flux de chaleur, qui peut être dix fois plus élevé que les deux autres mentionnés en début du paragraphe, assure un équilibrage rapide des températures à l'intérieur de l'habitation.

Ceci permet de renoncer à un système de distribution de la chaleur coûteux; un système de chauffage «simple» suffit. Inversement cela signifie qu'il est nécessaire de prendre des mesures particulières lorsque les locaux d'une habitation doivent présenter des températures différentes (cf. paragraphe 3.5).

Commande et possibilités de réglage

Le débit d'air et la température consigne doivent pouvoir se régler séparément. Le réglage de l'apport de chaleur s'effectue au travers de la température de l'air soufflé. La sonde de température ambiante est placée de manière centrale dans l'habitation.

Dans les immeubles plurifamiliaux aussi, le débit d'air, et en règle générale aussi la température, doivent pouvoir être réglés de manière individuelle par appartement. Le réglage de la ventilation devrait présenter au minimum les paliers arrêt, ventilation de base, normal, selon besoin (cf. paragraphe 3.6).

Poêle à bois

La puissance de chauffe minimale des poêles à bois est limitée par la nécessité d'assurer une combustion efficace et propre. La chaleur diffusée dans la pièce dépend de la puissance de chauffe et de l'inertie thermique du poêle. Même les plus petits poêles disponibles sur le marché sont en fait surdimensionnés pour le chauffage des appartements d'une maison passive. Les poêles qui peuvent céder une partie de leur chaleur au réservoir d'eau chaude à travers un échangeur de chaleur présentent sur ce point un avantage.

Avec les portes de communication intérieures ouvertes, la convection permet à la chaleur d'un poêle à bois placé dans une pièce de se répartir dans l'habitation. Si une maison passive est chauffée durant une longue période uniquement avec un poêle à bois placé dans une pièce, il s'établit des différences de températures de 2 à 4 K entre les pièces. Les poêles à accumulation doivent toutefois présenter des pouvoirs de restitution de chaleur très faibles afin d'éviter une surchauffe à court terme des pièces. Le pouvoir de restitution de chaleur maximum ne devrait pas dépasser 2 kW (dans un appartement de 130 m²). Avec les poêles à bûches, la masse d'accumulation doit être dimensionnée de manière à ce que la diffusion de chaleur s'effectue sur (au moins) 24 heures ou le chauffage doit être réparti sur la journée en au minimum deux allumages du poêle. Les poêles à granulés de bois présentent certes de meilleures possibilités de réglage mais là aussi le problème est celui de la faible puissance demandée.

Systèmes de ventilation

Ventilateurs / équilibrage

On utilise de préférence des moteurs à courant continu à commande électronique qui présentent une très faible consommation d'énergie. Les débits d'air soufflé et évacué doivent être égaux pour tous les états de fonctionnement (installation équilibrée). Cet équilibrage exige en principe une commande par flux massiques que toutefois seuls quelques rares fabricants offrent déjà actuellement. Le plus souvent le réglage est à flux volumique. Mais avec un tel réglage, le flux massique dépend de la température : A une différence de température de 10 K, les écarts sont d'environ 3 à 4%.

Fuites

Les fuites les plus importantes sont avant tout celles des échangeurs de chaleur, car elles provoquent une diminution du rendement de récupération effectif et qu'elles peuvent aussi porter atteinte à la qualité de l'air.

Besoins de ventilation accrue

Du fait des débits d'air évacué nécessaires et de la forte charge en polluants de l'air évacué il n'est pas judicieux de raccorder les hottes de cuisine au système de ventilation. Ces hottes devraient être à recirculation d'air.

Les hottes avec évacuation d'air et ouverture d'amenée d'air séparées peuvent aussi entrer en ligne de compte mais elles sont toutefois plus critiques sur le plan de l'exploitation et de l'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment.

Une courte aération (env. 10 min, de préférence aération traversante) est aussi appropriée dans les maisons passives pour évacuer efficacement un air fortement vicié (cf. paragraphe 6.1).

Mise en service, réception

Pour les ventilations avec fonction de chauffage, la documentation ne donne pas d'informations particulières. Le bon fonctionnement des installations de ventilation avec fonction de chauffage presuppose un fonctionnement parfait de la partie ventilation de l'installation.

Les points particulièrement importants à vérifier pour la fonction chauffage sont les suivants:

- Taux de récupération et débits d'air de l'échangeur de chaleur
- Puissance du registre de chauffage
- Température d'injection sur les bouches d'air soufflé
- Température des pièces durant une période froide

(cf. paragraphe 6.8).

Inhaltsverzeichnis

Zeichenerklärungen	1
Einleitung	3
1. Allgemeine Anforderungen	5
1.1. Innenraumklima.....	5
Aufenthaltsbereich	6
Thermischer Komfort.....	6
Luftqualität.....	10
Feuchte	12
Allergene	13
1.2. Der Passivhausstandard.....	14
1.3. MINERGIE und MINERGIE-P.....	15
1.4. Anforderungen aus Gesetzen und Richtlinien	15
2. Bedarf im Passivhaus.....	17
2.1. Lufterwärmung	17
Charakterisierung Passivhaus	17
Lüftungsanlage mit Lufterwärmung.....	17
Belegung	18
2.2. Wärmebedarf	19
Heizleistungsbedarf.....	19
Leistung über Zuluft	22
2.3. Feuchte	23
Problematik	23
Feuchteproduktion	23
Raumluftfeuchte im Winter.....	25
Feuchte-Rückgewinnung	27
2.4. Primärenergiebedarf	27
Anforderung Passivhausstandard	27
2000 Watt Gesellschaft	28
3. Wärmeabgabe und –verteilung.....	29
3.1. Luftsystem in der Wohnung	29
Luftführung	29
Luftmengen	30
Lüftungsanlage.....	30
Infiltration.....	34
3.2. Lüftungssystem im Gebäude	37
3.3. Wärmeabgabe im Kanal	38
Wärmeabgabe von Kanälen an Luft	39
Wärmeabgabe von Kanälen in Wänden und Decken.....	40
Instationäre Wärmeabgabe.....	40

	Gezielte Dämmung.....	41
3.4.	Wärmeverteilung in der Wohnung	43
3.5.	Temperaturzonierung	43
	Trocknung	44
3.6.	Regelung und Einstellmöglichkeiten	45
4.	Raumluftströmung	47
4.1.	Verteilung von Wärme und Zuluft im Raum	47
4.2.	Durchlässe	48
4.3.	Strömungsfeld	49
	Untersuchungen zur Raumluftströmung	49
	Messkonfiguration Luftströmkammer	50
	Strömungsbilder	52
4.4.	Zugluftrisiko	53
4.5.	Luftaustauschwirkungsgrad	57
4.6.	Temperaturgradienten.....	59
	Mehrgeschossigkeit.....	60
4.7.	Erkenntnisse.....	61
5.	Ergänzungsheizung	65
5.1.	Charakteristiken von Holzöfen	65
5.2.	Temperaturverteilung in der Wohnung mit Ofenbetrieb.....	67
	Modellwohnung und thermische Simulation.....	67
	Luftströmung und Wärmeverteilung	70
5.3.	Betrieb eines Holzofens in einem Passivhaus	73
	Zuführung der Verbrennungsluft	73
	Sicherheit	73
	Raumluftunabhängiger Betrieb	74
	Lüftungsanlage und Luftdichtigkeit.....	74
	Wärmeabgabe und -verteilung vom Ofen	74
6.	Weitere Systemfragen	77
	Normen, Richtlinien, Merkblätter	77
6.1.	Lüftung	77
	Küchenabluft, erhöhter Luftwechsel.....	77
6.2.	Schallschutz	80
6.3.	Brandschutz	80
6.4.	Kanalnetz	81
	Belastungen aus dem Luftheizsystem	81
	Temperaturbeständigkeit und Emissionen.....	81
6.5.	Nachheizregister	82
	Anforderungen.....	82
	Wärmeträger	82
	Staubverschwendung	82

6.6.	Wärmeerzeugung.....	83
	Energiekonzept - Primärenergiebedarf	83
	Möglichkeiten für die Wärmeerzeugung	83
6.7.	Primärenergiebedarf Energieversorgung.....	85
6.8.	Inbetriebnahme, Abnahme, Unterhalt.....	87
7.	Lüftungsanlage mit Lufterwärmung in "Beinahe-Passivhäusern"	89
7.1.	Allgemeines.....	89
7.2.	Unterschiede zur Lüftungsanlage mit Lufterwärmung im Passivhaus....	89
	Heizleistungsbedarf.....	89
	Wärmeverteilung	91
	Thermischer Komfort.....	91
	Schallschutz	91
7.3.	Lüftungsanlage mit Lufterwärmung im "Beinahe-Passivhaus"	92
	Umluftsystem	92
	Lüftungsanlage mit Lufterwärmung mit Zusatzheizsystem, ohne Umluft.....	93
7.4.	Vergleich mit separatem Heizsystem.....	93
	Luftheizsystem	93
	Getrenntes Lüftungs- und Heizsystem.....	94
8.	Aktuelle P+D	95
	Mehrfamilien-Passivhaus mit solarem Luftsystem, Rychenbergstrasse, Winterthur	97
	Passiv-Acht-Familienhaus, Im Wechselacher, Stans	99
	1. Schweizerisches Wohn- und Gewerbehaus im Passivhausstandard, Obermatt Rapperswil.....	100
	Wohnen in Sunny Woods, Zürich Höngg.....	101
	Passivhaus im Umbau, Zürich Aussersihl.....	102
	Passiv-MFH-Stämpfli, Unterägeri	103
9.	Referenzen, Literatur	105
9.1.	Referenzen.....	105
9.2.	Normen, Vorschriften, Richtlinien	110
9.3.	Berechnungsprogramme	112

Abbildungsverzeichnis

1–1:	Optimale Raumtemperatur als Funktion von Bekleidung Tätigkeit.	7
2–1:	Schema einer Lüftungsanlage mit Lufterwärmung.	18
2–2:	Wärmebilanz in einem typischen Passivhaus.....	19
2–3:	Tagesmittel der gemessenen Heizlast.....	20
2–4:	Kumulierte Häufigkeit der Differenz zwischen Zuluft und Raumlucht	21
2–5:	Heizleistung als Funktion der Aussenluftrate.....	23
2–6:	Relative Raumluchtfeuchte als Funktion der Aussenluftwechselrate, Wohnfläche 30 m ² /P	24
2–7:	Relative Raumluchtfeuchte als Funktion der Aussenluftwechselrate, Wohnfläche 60 m ² /P	24
2–8:	Kumulierte Häufigkeit der gemessenen relativen Feuchte der Raumlucht im MFH Stans, Winter 2002/2003	26
2–9:	Kumulierte Häufigkeit der gemessenen relativen Feuchte der Raumlucht im MFH Stans, Februar 2003.	26
3–1:	Schema der Lüftungsanlage mit Lufterwärmung in einer Wohnung	29
3–2:	Anlagenschema einer Lüftungsanlage mit Lufterwärmung für ein EFH oder eine Wohnung.....	31
3–3:	Mögliche Anordnungen der Ventilatoren und des Wärmetauschers im Lüftungsgerät.....	33
3–4:	Differenz des Drucks in einer Lüftungsanlage zum Aussendruck auf gleicher Höhe in einer eingeschossigen Wohnung.....	34
3–5:	Infiltration und Exfiltration in einer zweigeschossigen Wohnung mit offener Treppe und Türspalt als Überströmdurchlass.....	35
3–6:	Schema Lüftungsanlage mit Lufterwärmung MFH.....	37
3–7:	Temperaturabnahme längs des Kanals und Wärmeabgabe an die Raumlucht über die Rohrwand eines Zuluftkanals	38
3–8:	Temperaturabnahme längs des in die Decke eingelegten Kanals und Wärmeabgabe über die Decke an die angrenzenden Räume über die Rohrwand	39
3–9:	Temperaturverlauf in einer halbunendlichen Wand und zugehörige Wärmeströme nach einem Temperatsprung	41
3–10:	Wärmeströme in einer Wohnung	42
4 1:	Zuluftdurchlässe	49
4 2:	Strömungsbilder	53
4 3:	Zugluftrisiko bei Zulufttemperatur 16°C, für Weitwurfdüse und Gitter....	54
4 4:	Zugluftrisiko im Bereich des Bodendurchlasses bei Zulufttemperatur 17°C.....	56
4 5:	Temperaturgradienten in der LSK.....	59
4 6:	Gemessener Temperaturverlauf im Erdgeschoss und im Obergeschoss	60
5–1:	Typischer Zeitverlauf der Wärmeabgabe eines Stückholzofens.....	66

5–2:	Simulation, Modellgrundriss der Wohnung	67
5–3:	Zeitverlauf der Wärmeabgabe des modellierten Ofens	68
5–4:	Zeitverlauf ausgewählter Raumtemperaturen. Einmaliges Einfeuern an einem Tag	69
5–5:	Zeitverlauf ausgewählter Raumtemperaturen. Zweimal Einfeuern an einem Tag, und ständige Beheizung über den Ofen mit zweimal Einfeuern an einem Tag.....	70
5–6:	Simulation Ofen Maisonettewohnung, CFD-Rechnung der Strömungssituation	71
5–7:	Vergleich der Luftvolumenströme zwischen Erdgeschoss und Obergeschoss aus thermischer / Luftaustausch-Simulation und aus CFD-Rechnung	71
5–8:	Messung Maisonettewohnung Stans: Luftgeschwindigkeiten in vier Höhen im Durchgang zur Treppe, sowie relative Heizleistung der konvektiven Wärmequelle.....	72
5–9:	Luftgeschwindigkeiten nahe der Decke des Erdgeschosses im Durchgang zur Treppe aus den Messungen im Vergleich mit dem Wert aus der CFD-Rechnung	73
6 1:	Verlauf der CO ₂ -Konzentration und der Raumlufttemperatur, sowie des Luftwechsels bei Stößlüftung	79
6 2:	Verlauf der CO ₂ -Konzentration und der Raumlufttemperatur, sowie des Luftwechsels, Massivbau und Leichtbau bei Stößlüftung.....	79
6 3:	Modulares System mit Erdreichsonden-WP	84
6 4:	Kompaktgerät mit Abluft-WP.....	84
6 5:	Typischer Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie für ver- schiedene Energieversorgungskonzepte eines Passivhauses	86
7 1:	Raumluftfeuchte und mögliche Heizleistung als Funktion der Luftraten, ohne Umluft und mit Umluftanteil	90
7 2:	Grenztemperaturen für die Außenluft, bei denen mit einer Lüftungsanlage mit Luftherwärmung ohne Umluft gerade noch die erforderliche Heizleistung erbracht werden kann	90
7 3:	Beispiel MHF FOCUS in Uster: zentrale Lüftungsanlage mit WRG und EWT, Nachheizung wohnungsweise	92
8 1:	Luftführung Rychenbergstrasse.....	97
8 2:	Wärmeabgabe des Zuluftkanals über Boden	98
8 3:	Luftführung Passiv-Acht-Familienhaus, Im Wechselacher, Stans ...	99
8 4:	Luftführung Wohn- und Gewerbehaus Obermatt, Rapperswil.....	100
8 5:	Luftführung Sunny Woods	101
8 6:	Luftführung Passivhaus im Umbau.....	102
8 7:	Luftführung Passiv-MFH-Stämpfli	103

Tabellenverzeichnis

1–1:	Erforderliche Aussenluftraten.....	11
1–2:	Ablufttraten	12
2–1:	Vorgaben für die Belegung von Wohnungen.	18
3–1:	Vergleich der Wärmeströme durch Transmission, Infiltration, mechanische Lüftung und Konvektion durch offene Türen	42
4 1:	Geometrie Messraum und Randbedingungen.....	51
4 2:	Maximalwerte des Zugluftrisikos	55
4 3:	Luftaustauschwirkungsgrad	57
8 1:	Projektübersicht	96

Zeichenerklärungen

Variablen	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
DR	Zugluftrisiko (draught risk)	%
g	Gesamtenergiedurchlassgrad	-
n	Luftwechsel bezogen auf das belüftete Volumen	h^{-1}
n_{50}	Luftwechsel bei 50 Pa Differenzdruck (Drucktest)	h^{-1}
\dot{m}	Massenstrom	kg/h
PPD	vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener	%
Tu	Turbulenzgrad	%
U	U-Wert, Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
\bar{v}	mittlere Luftgeschwindigkeit	m/s
ϑ	Temperatur	$^\circ\text{C}$
ϑ_L	Lufttemperatur	$^\circ\text{C}$
ϑ_R	Raumlufttemperatur	$^\circ\text{C}$
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz	K
η_A	Luftaustauschwirkungsgrad	-
φ	Relative Feuchte	% rF

Indices	Bedeutung
a	aussen, Umgebung
F	Fenster
g	Glas
L	Luft
R	Raum
o	offen
W	Wand
w	Fenster (window)
Zu	Zuluft

Abkürzungen

ABL	Abluft
AKKP	Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser
ALD	Abluftdurchlass
ATD	Air terminal device (Luftdurchlass)
AUL	Aussenluft
BAG	Bundesamt für Gesundheit
CFD	Computational Fluid Dynamics
CO ₂	Kohlendioxid
EBF	Energiebezugsfläche; hier: nach [SIA 416]
EFH	Einfamilienhaus
ETV	Elektrothermischer Verstärkungsfaktor
EWT	Erdwärmetauscher
IAQ	Indoor air quality (Raumluftqualität)
LSK	Luftströmkammer
MFH	Mehrfamilienhaus
MuKEN	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
PHI	Passivhaus Institut Darmstadt
PV	Photovoltaik
VKF	Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung
WLG	Wärmeleitgruppe
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
ZLD	Zuluftdurchlass
ZUL	Zuluft

Einleitung

MINERGIE-P und Passivhaus

Der Standard MINERGIE-P [MINERGIE] wurde erst während der Projektlaufzeit eingeführt. Darum, und weil die Literatur zum Passivhaus schon viel umfangreicher ist, fokussierte dieses Projekt auf den Passivhausstandard. Wenn sich Aussagen in diesem Bericht auf "das Passivhaus" beziehen, so ist darunter immer auch ein Gebäude mit MINERGIE-P-Standard zu verstehen.

Ausgangslage

Der Passivhausstandard für Gebäude orientiert sich an den Bestrebungen für eine nachhaltige Gebäudetechnologie und ist damit ein Baustein für eine 2000 W-Gesellschaft [ETH 2000WG]. Gemäss Passivhausstandard erstellte Gebäude haben einen sehr geringen Heizwärmebedarf. Damit kann das (zwingend vorhandene) mechanische Wohnungslüftungssystem auch zur Deckung des Restwärmebedarfs eingesetzt werden. Die Luftmengen orientieren sich dabei am hygienischen Bedarf und sind somit viel niedriger als bei bisherigen Luftheizungen¹. Andererseits muss damit im Gegensatz zur reinen Lüftungsanlage die Zuluft je nach Wärmebedarf mit einer deutlich über der Raumtemperatur liegenden Temperatur zugeführt werden. Die Lüftungs- und die Heizungsfunktion stellen zum Teil gegensätzliche Anforderungen an Luftführung und Auslegung des Systems.

Im Winter besteht die Gefahr, dass die Luftfeuchte in den Räumen über einen längeren Zeitraum sehr tief ist.

Es stellt sich die Frage, wie stark das Luftverteilssystem vereinfacht werden kann. Zudem wird in der Praxis momentan sehr kontrovers diskutiert, inwie weit Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung auch in Nicht-Passivhäusern, insbesondere in MINERGIE-Gebäuden, sinnvoll einsetzbar sind.

Verschiedentlich kommen zur Spitzenlastdeckung auch ergänzende Heizquellen (z.B. Holzöfen) im Raum zum Einsatz. Dabei können Probleme mit der Verteilung der Wärme auftreten. Eine Zusatzwärmequelle im Raum darf nicht zu lokaler Überhitzung und zu grossen Temperaturunterschieden in der Wohnung führen. Hier ist das Zusammenwirken mit der mechanischen Lüftung von grosser Bedeutung.

Projektziele und -inhalt

Projektziele

Ziel des Projektes ist es, Möglichkeiten und Grenzen für Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung in Passivhäusern aufzuzeigen und sinnvolle Lösungen zu bestimmen.

Auf folgende Fragen soll dabei speziell eingegangen werden:

¹ nach [SIA 2023] soll die Bezeichnung "Lüftungsanlage mit Lufterwärmung" statt "Luftheizung" für eine Lüftungsanlage mit Heizfunktion verwendet werden. Lüftungsanlagen ohne Heizfunktion heissen danach "einfache Lüftungsanlage".

- Wie stark kann das Luftverteilssystem vereinfacht werden?
- Inwieweit sind Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung auch für Nicht-Passivhäuser geeignet ist?
- Wie kann die Gebäudemasse als Wärmeüberträger und Speicher genutzt werden?
- Wie verteilt sich die Wärme eines Ofens im Raum, und welche Anforderungen sind an solche Öfen zu stellen?

Projektinhalt

Fragen des thermischen Komforts und der Effizienz der Luftverteilung im Raum wurden durch Messungen im Raumklimalabor der EMPA und durch CFD-Rechnungen evaluiert.

Die Luftführung in der Wohnung und die Möglichkeiten, die Gebäudemasse als Wärmeüberträger und Speicher zu nutzen, wurden im Hinblick auf Konsequenzen für die Zuluftzustände untersucht. Ebenso wurden Anforderungen bezüglich zeitlicher und räumlicher Verteilung von Zusatzwärme von Holzöfen bestimmt. Die Fragen der Wärmeverteilung wurden einerseits rechnerisch mit dynamischer Gebäudesimulation [TRNSYS], [TRNFLOW], [COMIS] und mit CFD Simulationen [FLOVENT] und andererseits mit Messungen in einer Wohnung untersucht.

Die Erkenntnisse von Messungen in P+D-Gebäuden, in selbständigen Erfolgskontroll-Projekten durchgeführt, und ergänzende Aspekte wurden in die Auswertung mit einbezogen.

Daraus wurden nebst diesem Bericht auch Beiträge für das internationale Projekt IEA SHC Task 28 "Sustainable Solar Housing" erstellt [Task28].

Zweck des Berichtes, Zielpublikum

Die vorliegende Publikation ist als technischer Bericht erstellt gemäss der Zielsetzung des Projektes, Grundlagen zu erarbeiten und zu dokumentieren, einerseits für eine geplante Publikation über Passivhäuser, und andererseits als Input für das internationale Projekt IEA Task 28. Der Bericht stellt also kein Planungshandbuch dar, sondern dokumentiert spezifische Punkte, die bei der Planung der Lüftungsanlage mit Lufterwärmung im Passivhaus zu berücksichtigen sind. Der Bericht richtet sich primär an Fachpersonen, insbesondere LüftungsplanerInnen und ArchitektInnen.

Bezüglich Anforderungen bezieht sich der Bericht hauptsächlich auf die Situation in der Schweiz.

Die Resultate sollen in ein später zu erststellendes Handbuch zum Thema Passivhaustechnologie einfließen.

Datengrundlage

Alle Aussagen und Empfehlungen, auch wenn nicht gesondert vermerkt, beziehen sich entweder auf eigene Untersuchungen, oder sind übernommene Aussagen und Empfehlungen des Passivhaus Institut Darmstadt (PHI) bzw. des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser (AKKP).

1. Allgemeine Anforderungen

1.1. Innenraumklima

Die Anforderungen an das Innenraumklima werden im Folgenden kurz dargestellt, soweit sie für die Fragestellungen dieser Arbeit von Bedeutung sind. Anforderungen an das Innenraumklima beziehen sich zum einen auf den Komfort und die Gesundheit der NutzerInnen, und zum anderen auf die Erhaltung der Gebäudesubstanz. Die Beurteilungsgrundlagen sind in den entsprechenden Normen und Regelwerken festgelegt. Da die Einhaltung der Komfortbedingungen in Gebäuden gemäss Passivhausstandard in aller Regel zugleich eine Schädigung der Gebäudesubstanz ausschliesst (siehe auch Kapitel 2), werden die Anforderungen des Wärme- und Feuchteschutzes hier nicht weiter behandelt.

Normen und Standards definieren Mindestanforderungen und liefern Beurteilungsgrundlagen, ob ein Gebäude und seine Einrichtungen diesen Mindestanforderungen entspricht. Soweit diese Anforderungen den Komfort betreffen, orientieren sie sich zum einen am statistischen Durchschnitt, und betreffen zum anderen meist nicht explizit den Wohnbereich. Daneben gibt es viele Ratschläge und Empfehlungen für "behagliches", "gesundes", "energiesparendes" Wohnen etc, die den Bedürfnissen vieler Menschen zu entsprechen scheinen, die aber in keiner Norm festgelegt sind. Ein Beispiel ist der Wunsch nach einem "kühlen" Schlafzimmer. Es ist auch oft nicht sicher, ob der Gegenstand der Empfehlung selbst (im Beispiel die Raumtemperatur), oder damit verbundene Effekte (frische Luft durchs geöffnete Fenster, akustische Verbindung gegen aussen) entscheidend ist.

Obwohl ein Passivhaus nach "objektiven" Kriterien gegenüber einem normalen Haus und auch gegenüber einem Niedrigenergiehaus messbare Vorteile im Komfort aufweist, stehen gerade diese typischen Bedingungen in Passivhäusern – wie ausgeglichene Raumtemperaturen – tendenziell im Widerspruch zu den oben genannten Bedürfnissen. Andererseits zeigen die Befragungen der BewohnerInnen, die inzwischen für einige Projekte vorliegen, dass trotz eventueller anfänglicher Bedenken gegenüber dem System "Passivhaus" die Zufriedenheit hoch ist, und mit längerer Wohnerfahrung sogar eher steigt [Danner], [Hallman]. Vieles spricht dafür, dass sich mit der Verbreitung von Passivhäusern allmählich auch die Erwartungen an komfortables Wohnen ändern werden.

Um diesen Prozess zu fördern und unnötige Enttäuschungen zu vermeiden, sollten die Bauherrschaft bzw. die zukünftigen NutzerInnen über "passivhaustypische" Gegebenheiten informiert werden. Die Bedürfnisse der zukünftigen NutzerInnen sollten soweit als möglich abgeklärt werden, und es sollte diskutiert werden, welchen Bedürfnissen mit welchen Massnahmen Rechnung getragen wird.

Aufenthaltsbereich

Die Komfortbedingungen müssen (nur) im Aufenthaltsbereich gewährleistet werden. Nach [SIA 382/1] muss der Aufenthaltsbereich von Fall zu Fall definiert werden. Als allgemeine Definition wird genannt:

- 1.00 m Abstand von Fenstern
- 0.50 m Abstand von allen Innenwänden und von fensterlosen Außenwänden
- 0.10 m Abstand vom Boden (Untergrenze)
- 1.30 m Abstand vom Boden bei vorwiegend sitzender Tätigkeit
- 1.80 m Abstand vom Boden bei vorwiegend stehender Tätigkeit

Folgende Raumbereiche gehören nach [SIA 382/1] ohne besondere Abma-
chungen nicht zum Aufenthaltsbereich:

- Durchgangszonen
- Bereiche in der Nähe häufig benutzter oder offen stehender Türen

Das SIA Merkblatt "Wohnungslüftung" [SIA 2023], das gerade erarbeitet wird, übernimmt obige Definitionen für den Wohnbereich, spezifiziert aber zusätzlich, dass Zuluftdurchlässe keine Einschränkung der allgemeinen Aufenthaltszone bewirken sollten (also z.B. kein grösserer Abstand von der Innenwand infolge eines Durchlasses an dieser Innenwand).

Thermischer Komfort

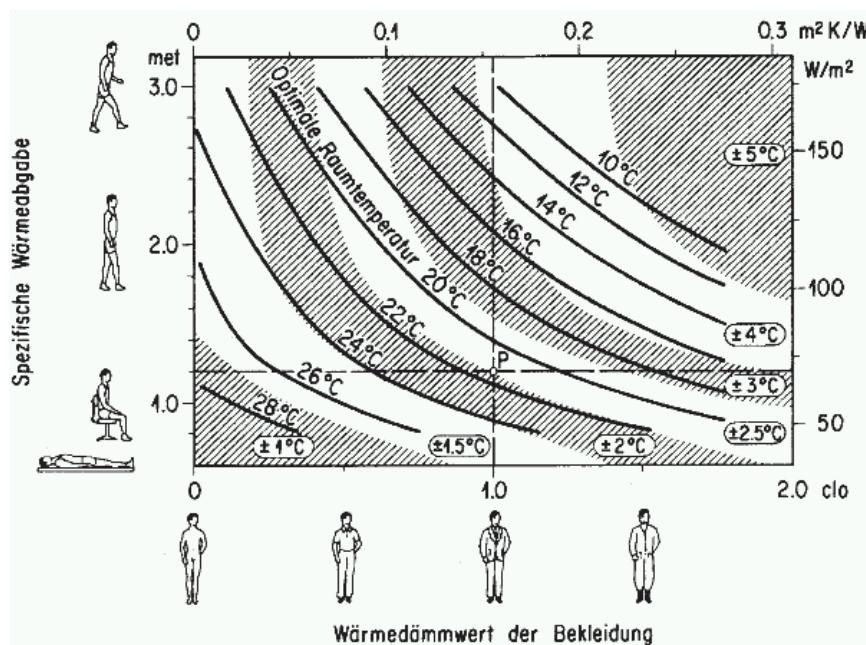
Personen empfinden dann den optimalen thermischen Komfort, wenn die Wärmebilanz des Körpers ausgeglichen ist. Die Wärmebilanz wird vor allem beeinflusst durch

- Bekleidung
- Tätigkeit
- Lufttemperatur
- Temperatur der Umschliessungsflächen
- Luftgeschwindigkeit
- Turbulenzgrad der Luft
- und in geringerem Mass durch die Luftfeuchtigkeit

Die wesentlichen Anforderungen sind in [SIA 180] zu finden, die den Empfehlungen für thermische Behaglichkeitsanforderungen der [SN EN ISO 7730:1995] entsprechen. Letztere enthält daneben detailliertere Angaben, Datengrundlagen und Berechnungsverfahren. Die Anforderungen gelten in einem gemässigten Umgebungsklima und für konstante Umgebungsbedingungen.

Nach [SN EN ISO 7730:1995] wird der Komfort anhand des "vorausgesagten Prozentsatzes Unzufriedener" (PPD) bewertet. Der PPD liegt nie unter 5%. [SIA 180] sieht diejenigen Komfortbedingungen als angemessen an, "die 80% der Benutzer unter der Voraussetzung einer für die Nutzung normalen Tätigkeit und saisonüblicher Bekleidung als behaglich empfinden." Es wird also $PPD < 20\%$ gefordert.

Es konnte gezeigt werden, dass die Berechnungsverfahren auch bei variablen Umgebungsbedingungen anwendbar sind [NEFF 357].



Figur 1–1: Optimale Raumtemperatur als Funktion der Bekleidung und der Tätigkeit [element 29],[SIA 180]. Relative Luftfeuchte zwischen 30% und 70%, Luftgeschwindigkeit kleiner als 0.1 m/s.

Allgemeine Bedingungen im Raum

Figur 1-1 zeigt die optimale Raumtemperatur¹ und ihren Toleranzbereich als Funktion der Bekleidung und der Tätigkeit. Bei leichter Tätigkeit (=1.2met) und angepasster Kleidung ist der optimale Temperaturbereich im Sommer (0.5clo) 23.5°C ... 26.5°C, und im Winter (1.0clo) 19°C ... 24°C.

Die Temperaturtoleranzen in den weissen und schraffierten Bereichen gelten für die Bedingung $PPD < 10\%$. Die Differenz zu dem oben angegebenen Grenzwert von 20% Unzufriedenen berücksichtigt Spielraum für weitere in der Figur nicht erfasste Komforteinbussen (Temperaturgradienten, Zugescheinungen usw.).

Aus Figur 1-1 lässt sich auch abschätzen, dass im Bad (wenig bekleidet $\approx 0\text{clo}$, mittlere Tätigkeit $\approx 2\text{ met}$) wie erwartet eher höhere Temperaturen erforderlich sind. Im Schlafzimmer (unter der Bettdecke $> 2\text{clo}$, ruhend = 0.8met) sind aber kaum niedrigere Raumtemperaturen erforderlich.

Lokale Einflüsse

Neben der (mittleren) Raumtemperatur spielt auch die räumliche Variation der Temperatur eine Rolle. Die folgenden Werte sind [SIA 180] entnommen, sie entsprechen den internationalen Normen. Das PHI ist allerdings der Meinung, dass diese Werte selbst für konventionelle Gebäude zu grosszügig bemessen sind. Die Komfortgrenzen könnten somit strenger gefasst werden.

¹ Gewichteter Mittelwert zwischen der Raumlufstemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur

Der (positive) Gradient der Lufttemperatur sollte zwischen 0.1 m und 1.1 m Raumhöhe nicht mehr als 3 K/m betragen. Die Asymmetrie der Strahlungs-temperatur² sollte im Winter

- zwischen oben und unten bei warmen Decken 4 K
- zwischen zwei Seiten bei kalten Wänden 10 K
- zwischen zwei Seiten bei warmen Wänden 20 K

nicht überschreiten. Die Temperatur des Fussbodens sollte zwischen 19°C und 26°C liegen.

Luftgeschwindigkeit - Zugluftrisiko

Eine weitere Voraussetzung für thermischen Komfort ist die Abwesenheit von Zugerscheinungen. Das Zugluftrisiko DR (draught risk) nach [SN EN ISO 7730:1995] beschreibt empirisch den Prozentsatz Unzufriedener (in %),

$$DR = (34 - \vartheta_L)(\bar{v} - 0.05)^{0.62}(0.37 \cdot \bar{v} \cdot Tu + 3.14)$$

in Abhängigkeit von der Lufttemperatur ϑ_L , der mittleren Luftgeschwindigkeit \bar{v} und dem Turbulenzgrad Tu (in %). Als Begrenzung wird ein Wert von 15% empfohlen³. Im Entwurf der neuen SIA 382/1 (Stand März 2004) wird hingegen von 13% ausgegangen.

Erlaubte Überschreitung der Toleranzbereiche

In den Normen zum thermischen Komfort finden sich keine Hinweise, wie eine Überschreitung der Toleranzbereiche gewertet werden soll. Andererseits erfordert es erfahrungsgemäss einen unvertretbar grossen Aufwand, die Toleranzen unter allen Umgebungsbedingungen einzuhalten. Ein Hinweis zur Bewertung kann den Normen [SIA 382/3] und [SIA 384/2] entnommen werden.

Überhitzung. Für den Wohnbereich allgemein gibt es keine direkt anwendbaren Normen. [SIA 382/3] behandelt lüftungstechnische Anlagen, und gilt explizit auch für Wohnräume, sofern sie mit einer lüftungstechnischen Anlage ausgestattet sind. Behandelt wird dabei auch die sommerliche Überhitzung. Allerdings ist auch für diese Norm eine Überarbeitung unter Berücksichtigung der neuen CEN Normen geplant.

Nach [SIA 382/3] gilt der Bedarf für Kühlung als nachgewiesen, wenn die zulässige maximale Raumlufstemperatur in der Periode 16. April bis 15. Oktober (ohne Tage über 30°C Spitzentemperatur der Aussenluft, so genannte Hitzetage) trotz aller vertretbaren Massnahmen während der Nutzungszeit um mehr als 30 Kh überschritten wird. Das heisst umgekehrt, bis zu 30 Kh an Tagen mit Spitzentemperatur unter 30°C, sowie Überhitzung an Hitze-tagen gelten als akzeptabel. Die zulässige maximale Raumlufstemperatur beträgt 28°C für Tage mit einer Spitzentemperatur der Aussenluft zwischen 20°C und 30°C.

² Differenz der mittleren Strahlungstemperaturen zweier durch eine gedankliche Ebene horizontal oder vertikal getrennter Halbräume.

³ [SIA 180] und [SIA 382/1] definieren mit fast gleicher lautender Formel einen Anteil Unzufriedener. Der Turbulenzgrad wird jedoch aus Quantilen berechnet und nicht wie in [SN EN ISO 7730:1995] aus Mittelwert und Standardabweichung. Je nach Häufigkeitsverteilung der gemessenen Geschwindigkeiten können sich damit Abweichungen zwischen beiden Formeln ergeben. Als Grenzwert wird ein Anteil von 20% Unzufriedener festgelegt.

Im Passivhaus-Projektierungspaket [PHPP 02/03] steht seit Version 2002 probeweise eine Abschätzung der Häufigkeit sommerlicher Übertemperaturen zur Verfügung. Als Grenze für Übertemperaturen wird im Nachweis 25°C gesetzt. Dann dürfen in den Sommermonaten (in der Regel Mai – September) nicht mehr als 10% der Jahresstunden (867 h) über diesem Wert liegen. Bezogen auf die Sommermonate wären dies knapp 24% aller Stunden.

Die Anforderung der [SIA 382/3], die Überhitzung auf 30 Kh zu begrenzen, erscheint für Wohnbauten mit einer Nutzungszeit von praktisch 24 h sehr streng im Vergleich zu den Anforderungen des Passivhaus-Projektierungspakets. Allerdings liegt die zulässige maximale Raumlufttemperatur in der relevanten Zeit mit 28°C auch höher, was die erste Aussage relativiert. Die Formulierung der Anforderung im Passivhaus-Projektierungspaket scheint eher auf Wohnnutzung zugeschnitten. Da aber nur die Stunden mit Übertemperaturen begrenzt werden, wird keine direkte Bewertung der erreichten Spitzentemperaturen im Gebäude vorgenommen.

Für die Heizperiode gibt es keine [SIA 382/3] entsprechenden Regelungen bezüglich Überhitzung. [SIA 180] begrenzt die Raumtemperatur aber auf den Bereich 19°C ... 24°C.

Anders als bei der Überhitzung im Sommer ist die Überhitzung durch solare Gewinne (oder auch durch Ofenfeuerung) im Winter meist auf einen oder einige wenige Räume beschränkt. Eine kurzfristige Überschreitung des Komfortbereichs in einem Teilbereich der Wohnung sollte akzeptiert werden, um solare Gewinne optimal zu nutzen. Allerdings sollte ein Sonnenschutz vorhanden sein, der es erlaubt, die Überhitzung durch solare Gewinne zu vermeiden. Weiter muss gewährleistet sein, dass bei Überhitzung eines Teils der Wohnung die Temperatur in anderen Teilen der Wohnung nicht unter die Komfortgrenze fällt. D.h., die Temperaturunterschiede in der Wohnung sollten nicht mehr als ca. 5 K betragen.

Unterschreitung der Sollwerte. Nach [SIA 384/2] wird eine Unterschreitung des Sollwerts der Raumlufttemperatur im langjährigen Mittel einmal jährlich um 1 K ... 2 K während 1 ... 2 Tagen (ca. 50 Kh) akzeptiert. Diese Toleranz sollte auch für Gebäude nach Passivhausstandard gelten. Das Rechenverfahren selbst ist aber für die Auslegung einer Passivhausheizung nicht tauglich. Zum einen ist die Toleranz in der massgebenden Außenlufttemperatur schon eingerechnet. In die Berechnung der massgebenden Außenlufttemperatur gehen aber die durchschnittliche Speicherfähigkeit und die üblichen Verluste konventioneller Gebäude ein. Dazu kommt, dass Querwärmeströme zwischen beheizten Räumen, die in einem Gebäude nach Passivhausstandard eine wesentliche Rolle spielen, ungenügend berücksichtigt werden. Die Norm [SIA 384/2] wird zur Zeit der Berichterstattung überarbeitet, aber die neue Fassung liegt noch nicht vor.

Zonierung, Nachtabsenkung

Von vielen Stellen werden Empfehlungen zur optimalen Raumtemperatur der verschiedenen Räume einer Wohnung angegeben. Die Empfehlungen resultieren aus einer Abwägung von Komfort, Energieersparnis, Nutzungsdauer und eventuell gesundheitlichen Aspekten (siehe Abschnitte *Feuchte*

und *Allergene* in diesem Kapitel). Die Überlegungen zur Energieeinsparung durch differenzierte Einstellung der Temperatur und durch Nachtabsenkung gelten für konventionelle Gebäude. In Passivhäusern bewirken diese Massnahmen praktisch keine Einsparung mehr. Sie sind hier allenfalls noch aus Gründen des Komforts und der Gesundheit zu rechtfertigen. Zu beiden Aspekten existieren aber keine eindeutigen Hinweise und Begründungen.

Nach [SIA 384/2] beträgt der Richtwert der Raumlufttemperatur für Badzimmer von 22°C (Deutschland: 24°C), sofern die allgemeinen Komfortanforderungen eingehalten sind.

Zuluft

Da die unmittelbare Umgebung von Durchlässen nicht vom Aufenthaltsbereich ausgenommen wird, müssen bei Durchlässen, die sich im normalen Aufenthaltsbereich befinden, die Komfortkriterien eingehalten werden.

Übertemperatur. Im Aufenthaltsbereich sollten auch bei maximaler Zulufttemperatur die Anforderungen bezüglich (lokaler) Raumtemperatur und Temperaturgradienten eingehalten werden.

Damit die Zuluft noch als frisch empfunden wird, sollte die Temperatur nach [Pfluger] 32°C nicht übersteigen. Wenn die Luft kühler ist als die Hautoberfläche, ist noch ein kühlender Effekt zu spüren.

Die maximale Temperatur der Zuluft wird von weiteren Vorschriften und Empfehlungen begrenzt. Siehe auch Abschnitte *Luftqualität*, und 1.4 *Anforderungen aus Gesetzen und Richtlinien* in diesem Kapitel.

Untertemperatur. Zugerscheinungen können auftreten, wenn Zuluft mit grosser Untertemperatur unterhalb der Decke eingeblasen wird und dann aufgrund des thermischen Abtriebs nach unten fällt.

Luftqualität

Anforderungen Luftqualität

Die Luftqualität in Räumen muss so beschaffen sein, dass die Geruchsbelastung akzeptabel ist und keine gesundheitlichen Gefährdungen auftreten. Um die zur Schadstoffabfuhr notwendigen Luftmengen zu begrenzen, müssen vorrangig die Quellen, soweit sie beeinflussbar sind, minimiert werden. Besonders wichtig ist es, beim Innenausbau emissionsfreie oder zumindest emissionsarme Materialien bevorzugt einzusetzen. Örtlich spezifisch auftretende Belastungen (Küche, Bad, WC) sollen lokal abgesaugt werden.

Erforderliche Luftraten (Bedarf). Die erforderlichen Luftraten sind bei hoher Personenbelegung bestimmt durch den Aussenluftbedarf, bei geringer Personenbelegung eher durch die notwendigen Abluftraten bzw. durch die Sicherstellung einer Grundlüftung.

Die in den verschiedenen Normen und Richtlinien empfohlenen Aussenluftraten pro Person differieren erheblich, wobei in den neuen Unterlagen ein Trend zu höheren Luftraten erkennbar ist. Das PHI dagegen tendiert eher zu niedrigeren Luftraten, da in der Wintersituation die Komfortaspekte Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Belastung und tiefe Raumluftfeuchte gegeneinander abgewogen werden müssen. Eine Übersicht gibt Tabelle 1-1. Basis für Werte im

Rahmen von CEN-Normen ist der Technische Bericht [CR 1752], der Luftraten für verschiedene Anspruchsklassen gibt. Diese sind auch in die neue Norm [prEN 13779] aufgenommen worden, die Norm bezieht sich allerdings explizit auf den Nicht-Wohnbereich.

Die Luftraten sind festgelegt unter der Annahme eines stationären Zustandes. Dieser Gleichgewichtszustand ist nur abhängig vom Verhältnis der Quellstärke des Schadstoffs zum zugeführten Luftvolumenstrom, er ist unabhängig vom Volumen des betrachteten Raumes. Dagegen ist die Zeit, die vergeht, bis sich das Gleichgewicht eingestellt hat, abhängig vom Luftwechsel, d.h. vom Verhältnis des Zuluftvolumenstroms zum Raumvolumen. Je grösser das Raumvolumen bei gegebenem Zuluftvolumenstrom ist, desto länger dauert es, bis das Gleichgewicht erreicht ist. D.h., dass kleinere Zuluftvolumenströme tolerierbar sind, wenn während der Nutzungszeit die noch zulässige Konzentration der Schadstoffe nicht überschritten wird, oder wenn die Quelle nur zeitlich beschränkt wirksam ist (siehe auch Abschnitt 6.1). Außerdem ist erforderlich, dass der kleinere Zuluftvolumenstrom ausreicht, um die Schadstoffkonzentration bis zur nächsten Nutzungszeit wieder abzutransportieren.

Bei – auf das Raumvolumen bezogen – kleineren Belastungsquellen respektive bei nur während einer beschränkten Zeit wirksamen Quellen erlauben die dynamischen Effekte (das heisst die Berücksichtigung des Konzentrationsanstieges) gegebenenfalls kleinere Luftraten.

Tabelle 1–1: Erforderliche Aussenluftraten gemäss Normen und kommissionsinternen und somit unverbindlichen Normentwürfen (kursiv); darunter sind Empfehlungen des AKKP und von MINERGIE angegeben.

Norm	Kriterium	Volumenstrom
[SIA 382/1]	Bedarf pro Person, Grundlüftung	25 – 30 m ³ /(h.P) oder 0.3 1/h
[prEN 13779] (Nicht-Wohnbereich ?)	Class 1, hohe Qualität, mindestens	54 m ³ /(h.P)
	Class 4, mittlere Qualität, mindestens	22 m ³ /(h.P)
[DIN 1946-6]	Bedarf pro Person Grundlüftung der Wohnung	30 m ³ /(h.P) 60 – 120 m ³ /h (je nach Grösse der Wohnung)
SIA 382/1 (neu) (Entwurf)	Bedarf pro Person Schlafzimmer etc. Grundlüftung	bis 36 m ³ /(h.P) >18 m ³ /(h.P) 0.2 bis 0.3 1/h
SIA Merkblatt 2023 (Entwurf) [SIA 2023]	Belegung und Aussenluftrate pro Person	allgemein 24 – 30 m ³ /(h.P), Schlafzimmer 18 – 24 m ³ /(h.P), bei tiefer Feuchte 15 m ³ /(h.P)
AKKP Protokollband Nr. 17 [Werner]	Maximum ¹⁾ von: Bedarf pro Person (nicht auf Raucher abstellen), Grundlüftung, Abluftbedingung	30 m ³ /(h.P), 0.3 1/h ²⁾ , siehe Tabelle 1-2
MINERGIE [MINERGIE]	Komfortlüftung mit WRG, pro Raum, aber gesamter Volumenstrom mindestens 30 m ³ /h pro angefangene 50 m ² EBF ₀	30 m ³ /h pro Raum

1) das PHI tendiert inzwischen dazu, das Minimum zu wählen

2) das PHI schlägt neu 0.2 1/h vor

[Rietschel] gibt an, dass eine Person bei leichter sitzender Tätigkeit (1 met) 17 Liter Kohlendioxid pro Stunde abgibt. Mit einem Zuluftvolumenstrom von 18 m³/h (= 5 l/sec) würde sich bei dieser Quellstärke im Raum eine Gleichgewichtskonzentration von 944 ppm über der Außenluftkonzentration einstellen. Bei einer durchschnittlichen Außenluftkonzentration von 350 ppm liegt der Gesamtwert für die Gleichgewichtskonzentration, (944+350) ppm, noch unter dem Grenzwert von 1500 ppm. Damit würden die Anforderungen an die Luftqualität bezüglich CO₂ auch mit dieser geringen Luftrate noch erfüllt. Wenn dieser Person ein Luftvolumen von 30 m³ zur Verfügung steht, liegt die Konzentration nach etwa 4 Stunden 900 ppm über dem Startwert. Ohne Zuluft würde die Konzentration dagegen um 600 ppm/h ansteigen, der zulässige Grenzwert wäre nach knapp zwei Stunden überschritten. Siehe auch die Beispiele in den Figuren 6-1 und 6-2.

Die Abluftvolumenströme richten sich nach dem Bedarf, Gerüche und Feuchtigkeit effizient abzuführen. Anhaltswerte für die Abluftraten sind in Tabelle 1-2 gegeben.

Tabelle 1-2: Abluftraten [Werner].

Raum	Volumenstrom
Küche	40 – 60 m ³ /h
Bad	40 m ³ /h
WC, Abstellraum o. ä.	20 m ³ /h

Anforderung Luftaustauschwirkungsgrad. Die Empfehlungen zu den erforderlichen Außenluftraten nehmen keinen Bezug auf den Luftaustauschwirkungsgrad. Das oben genannte Zahlenbeispiel beruht auf einer Bilanzgleichung für vollständig durchmischte Raumluft, also für eine Situation, die durch einen Luftaustauschwirkungsgrad $\eta_A = 0.5$ charakterisiert ist. Wie in Abschnitt 4.5 gezeigt wird, werden diese Werte für Lüftungssysteme in Passivhäusern in der Regel erreicht.

Belastung aus der Lüftungsanlage. Vor allem von Passivhaus-Fachleuten und in den Veröffentlichungen des Passivhaus Instituts wird eine Grenze von 50°C bis 55°C für die Zuluft am Luftheritzer angegeben⁴. Diese Begrenzung soll verhindern, dass Staub am Erhitzer verschwelt und die Zuluft mit Verschwendungsprodukten belastet ist (siehe auch Abschnitt 6.4).

Feuchte

Die Luftfeuchte ist zum einen ein Aspekt des Komforts. Im Winter wird der Komfort überwiegend durch zu tiefe Werte der relativen Feuchte beeinträchtigt. Zum anderen ist die Luftfeuchte in Gebäuden vor allem im Hinblick auf mögliche Bauschäden von Bedeutung. Hier sind ungenügende Lüftung, zu geringe Dämmung und / oder schlecht belüftete Wandpartien die Hauptursache.

⁴ Am Zuluftdurchlass beträgt die Temperatur der Zuluft damit je nach Dämmung und Länge der Kanäle deutlich weniger als 50°C.

Tiefe Feuchtwerte stellen sich bei tiefen Aussentemperaturen, kleinen internen Feuchtelasten und hohen Luftraten ein, solange nicht bei einer Lüftungsanlage über den Wärmetauscher auch eine gewisse Feuchterückgewinnung realisiert werden kann (siehe Abschnitt 2.3 *Feuchte*).

Die in [SIA 382/1] definierten Anforderungen gelten auch für Passivhäuser. Es ist ein Bereich von 30% rF (im Winter) bis 65% rF (im Sommer) relative Feuchte innerhalb der entsprechenden Temperaturbereiche einzuhalten. "Gelegentliche" Über- und Unterschreitungen "an wenigen Tagen im Jahr" sind nach [SIA 382/1] physiologisch zulässig. In diesem Bereich ist der Einfluss auf den Komfort gering.

Um Feuchteschäden zu vermeiden, begrenzt [SIA 180] die maximal zulässige Feuchte noch weiter, laut Tabelle 5 im Hauptteil bei -10°C z.B. auf 38% rF. Da aufgrund der höheren Oberflächentemperaturen im Passivhaus die Taupunkttemperaturen kaum mehr unterschritten werden, ist diese einfache Begrenzung allerdings zu streng. Im Anhang der [SIA 180] werden die Formeln angegeben, die eine Berechnung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Oberflächentemperaturen erlauben.

Über die physiologischen Wirkungen und den Komfort gibt es viele widersprüchliche Aussagen. [Nagda] liefert eine gute Zusammenfassung der vielfältigen Studien, auf die sich auch das BAG stützt. Danach sind Personen wenig in der Lage, Luftfeuchtigkeitswerte zu schätzen. Die relative Luftfeuchtigkeit hat aber sehr wohl Auswirkungen auf das Wohlbefinden. Zu tiefe relative Luftfeuchtigkeit (meist deutlich unter 30% rF) kann zu einer Austrocknung der Schleimhäute und der Haut, sowie zu Augenreizungen führen. Die Beeinträchtigung tritt dabei mit zeitlicher Verzögerung auf – Symptome der Augen und der Nase treten nach 3 bis 4 Stunden auf, Hautsymptome meist deutlich später. Es gibt auch Hinweise, dass keine Anpassung an geringe relative Luftfeuchtigkeit auftritt.

Im Zusammenhang mit geringer relativer Luftfeuchtigkeit treten auch vermehrt störende elektrostatische Aufladungen auf. Holzeinbauten, vor allem Böden und Deckenverkleidungen können bei länger andauernden Perioden mit tiefer relativer Luftfeuchtigkeit austrocknen und eventuell sogar reissen. Gegebenenfalls müssen beim Hersteller Informationen über die Eignung der Beläge eingeholt werden.

Die Problematik tiefer relativer Luftfeuchte ist aber nicht primär ein Problem der Lüftungsanlage mit Luftherwärmung, sondern vor allem eine Frage der Höhe des Luftwechsels. Selbst mit den hygienisch minimal notwendigen Luftraten können im Winter tiefe Werte der relativen Luftfeuchtigkeit nicht immer vermieden werden. Eine Überdimensionierung der Aussenluftraten sollte daher unter allen Umständen vermieden werden.

Allergene

Pollen und andere Schadstoffe aus der Aussenluft

Die Belastung der Aussenluft mit Pollen, Staub und Schadstoffen kann je nach Jahreszeit und Standort sehr unterschiedlich sein. Bei natürlicher Lüftung können diese unerwünschten Luftbestandteile nicht aus der Zuluft

entfernt werden. In einer Lüftungsanlage kann die Belastung mit Pollen und Staub mit geeigneten und gut gewarteten Filtern weitgehend reduziert werden.

Pilze und Sporen

In der Lüftungsanlage können Pilze vor allem in feuchten und schlecht gewarteten Filtern im Zuluftstrang auftreten. Pilzsporen, die zum Teil extrem giftig sind, werden in die Luft abgegeben. Eine regelmässige Wartung und ein rechtzeitiger Tausch der Filter ist daher unbedingt erforderlich.

Hausstaubmilben

Optimale Wachstumsbedingungen für Hausstaubmilben bestehen nach [Jones] bei etwa 20°C bis 30°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 70% rF bis 80% rF. Solche Bedingungen dürfen nicht über längere Zeit andauern, sonst besteht die Gefahr, dass sich die Milben zu stark vermehren. Regelmässiges Lüften der Betten ist also ratsam. Je kühler und trockener die Umgebungsbedingungen sind, desto mehr verlangsamt sich das Wachstum der Hausstaubmilben. Unter 50% rF und bei Temperaturen unter 20°C gedeihen sie nicht mehr. Larven können allerdings ungünstige Umgebungsbedingungen längere Zeit überdauern.

1.2. Der Passivhausstandard

Gemäss Passivhaus Institut "Passivhaus Qualitätsanforderungen" [PHQ] muss in einem Passivhaus (Wohnnutzung) ein behagliches Innenklima ohne separates Heizsystem und ohne Klimaanlage erreichbar sein. Die Behaglichkeitsskriterien müssen in jedem Wohnraum im Winter wie im Sommer erfüllt sein.

Der Nachweis, dass ein Gebäude dem Passivhausstandard genügt, erfolgt mit dem Passivhaus-Projektierungspaket [PHPP 02/03]. Es muss rechnerisch nachgewiesen werden, dass, bezogen auf die *Nettofläche*,

- der Energiekennwert Heizwärme weniger als 15 kWh/(m².a), und der
- der Energiekennwert Primärenergie weniger als 120 kWh/(m².a)
(für Heizung, Warmwasser, Haushaltsstrom)

betragen. Zusätzlich muss in einer Messung nachgewiesen werden, dass

- der Luftwechsel n_{50} bei einem Drucktest (50 Pa) weniger als 0.6 h⁻¹ beträgt.

Zusätzlich werden Anforderungen an Komponenten angegeben, die in der Regel genügen, um diese integralen Werte zu erreichen:

- Wärmedämmung der opaken Hülle mit U-Werten unter 0.15 W/(m².K)
- wärmebrückenfreie Ausführung bei Bezug auf das Außenmaß
- Verglasungen mit U_g -Werten unter 0.8 W/(m².K) bei hohem Gesamtenergiedurchlassgrad g über 50%; dann sind auch im Winter Netto-Wärmegewinne möglich
- Fenster mit U_w -Werten unter 0.8 W/(m².K), wärmebrückenfreier Einbau gedämmter Fensterrahmen

- Mechanische Zu-/Abluftanlage, mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung mit einem Wärmebereitstellungsgrad von mindestens 75% bei einem Strombedarf für Antrieb und Regelung von höchstens 0.45 Wh/m^3
- niedrigste Wärmeverluste bei der Brauchwasserbereitung und -verteilung
- hocheffiziente Nutzung von elektrischem Haushaltsstrom: Elektrogeräte der höchsten Effizienzklasse, Stromsparlampen etc., der Richtwert beträgt $55 \text{ kWh/(m}^2\text{.a)}$ Primärenergieeinsatz für Haushaltsstrom.

Das vom Passivhaus Institut vergebene Zertifikat "Passivhaus geeignete Komponente" erleichtert die Beurteilung der Komponenten, und stellt die Produktkennwerte in der für die Passivhaus-Projektierung benötigten Form auf einfache Weise zur Verfügung. Zertifiziert werden zur Zeit Lüftungsanlagen, Wand- und Bausysteme, Verglasungen, Fensterrahmen und Haustüren.

Dazu kommen noch diverse Hinweise zur Planung und Ausführung.

Obwohl für den Wohnbau entwickelt, wird der Passivhausstandard auch auf Büro- und Gewerbegebäuden angewendet, wobei die gleichen Grenzwerte gelten.

1.3. MINERGIE und MINERGIE-P

MINERGIE ist in der Schweiz das Label für energieeffiziente Bauten im Bereich Wohnen und Dienstleistung [MINERGIE]. Da es wegen diverser länderspezifischer Regelungen, vor allem auch der unterschiedlichen Definition der Energiebezugsflächen, nicht möglich ist, die Anforderungen des Passivhausstandards allgemeingültig in Werte gemäss SIA-Normen umzurechnen, wurde für die Schweizer Bedürfnisse der Standard MINERGIE-P geschaffen [Binz]. Die Anforderungen wurden so festgelegt, dass die Grundforderung des Passivhausstandards, dass "in einem Passivhaus ein behagliches Innenklima ohne separates Heizsystem und ohne Klimaanlage erreichbar sein" muss, erfüllt wird. Der Nachweis kann nun aber mit einigen wenigen Modifikationen nach SIA 380/1 geführt werden, so dass für die Zertifizierung keine separaten Berechnungen notwendig sind [MINERGIE].

1.4. Anforderungen aus Gesetzen und Richtlinien

SIA 380/1 und SIA 384/2

Werden die Passivhauskriterien eingehalten, ist sichergestellt, dass auch die Anforderungen nach [SIA 380/1] "Thermische Energie im Hochbau" erfüllt sind.

Nach der derzeit gültigen Fassung der [SIA 384/2] "Wärmeleistungsbedarf von Gebäuden" würde für Niedrigenergie- und Passivhäuser ein zu grosser Leistungsbedarf projektiert. Eine neue Fassung dieser Norm wird erarbeitet, die die spezifischen Aspekte von Gebäuden mit niedrigem Wärmeleistungsbedarf berücksichtigt. Sie lag bei Erstellung des Berichts noch nicht vor.

Vorlauftemperatur

Die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich [MuKEn 2000] begrenzen die Vorlauftemperaturen:

"Art. 1.11 Wärmeverteilung und –abgabe (V)

Die Vorlauftemperaturen für neue oder ersetzte Wärmeabgabesysteme dürfen bei der massgebenden Auslegetemperatur höchstens 50 °C betragen. ..."

Damit wäre die Zulufttemperatur am Luftheritzer auf weniger als 50°C begrenzt und die Heizleistung stärker eingeschränkt als nach dem Passivhauskriterium. Es wäre zu prüfen, ob für Gebäude nach Passivhausstandard eine Ausnahme nach MuKEEn Art. 1.2 Ausnahmen geltend gemacht werden kann. Die Begründung wäre der extrem niedrige Heizwärmebedarf. Besonders sparsame Gebäude sollten nicht "bestraft" werden. Explizit vorgesehen sind in der MuKEEn z.B. Ausnahmen für die verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung für Gebäude mit weniger als 30 W/m² Wärmeerzeugerleistung oder für Gebäude nach MINERGIE Standard.

Verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung

Die verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung (VHKA) wird in den Kantonen sehr unterschiedlich gehandhabt [UVEK]. Zum Teil wird sie nicht angewendet. Diejenigen Kantone, die die VHKA (teilweise) eingeführt haben, kennen zum grossen Teil Ausnahmen für Gebäude mit sehr kleinem Leistungsbedarf, Gebäude nach MINERGIE-Standard oder ähnliches. Damit sollte die VHKA in Passivhäusern nicht erforderlich sein.

2. Bedarf im Passivhaus

2.1. Lufterwärmung

Charakterisierung Passivhaus

Die zur Erreichung des Passivhausstandards erforderliche Aussenwanddämmung ($0.1 - 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) bewirkt hohe Oberflächentemperaturen an der Innenseite der Aussenwände. Diese liegen in der Regel weniger als 0.5 K unter der Raumlufttemperatur. Auch die extrem guten Fenster mit U-Werten von $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ weisen innen hohe Oberflächentemperaturen auf (bei -10°C maximal 3 K unter Raumlufttemperatur). Wärmebrücken sind weitgehend zu vermeiden, um Passivhausstandard zu erreichen. Weiter ist eine sehr luftdichte Gebäudehülle erforderlich. Der mit einem Blowerdoor-Test bestimmte Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz, n_{50} , darf nicht mehr als 0.6 h^{-1} betragen. Der notwendige Luftwechsel wird mindestens in der Heizsaison mit einer balancierten Zu- und Abluftanlage mit effizienter Wärmerückgewinnung (WRG) bewerkstelligt.

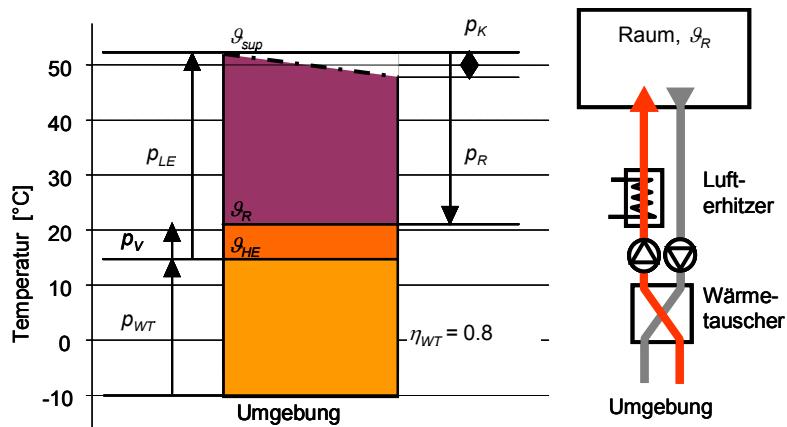
Diese Anforderungen haben zur Folge, dass nur sehr geringe Strahlungsasymmetrien und geringe Temperaturgradienten im Gebäude auftreten. Deshalb sind keine Heizflächen an Aussenwänden oder unter Fenstern erforderlich, um den Komfort zu gewährleisten. Da die Wärmedurchgangswiderstände zwischen den Räumen sehr viel kleiner sind als die gegen aussen, werden interne Temperaturdifferenzen leicht ausgeglichen. Auf ein aufwendiges Verteilsystem für die Heizwärme kann unter diesen Umständen verzichtet werden. Ein "einfaches" Heizsystem genügt. Umgekehrt bedeutet dies, dass besondere Vorkehrungen getroffen werden müssen, wenn Räume einer Wohnung unterschiedliche Temperaturen haben sollen.

Taupunktsunterschreitungen sind bei Oberflächentemperaturen, die so nahe an der Raumlufttemperatur liegen, und bei kontinuierlichem Luftwechsel über die Lüftungsanlage praktisch nicht mehr möglich. Somit ist auch eine wesentliche Quelle von Bauschäden ausgeschaltet.

Lüftungsanlage mit Lufterwärmung

Da eine mechanische Lüftungsanlage mit effizienter WRG erforderlich ist, kann diese auch die Heizungsfunktion übernehmen. Die Luftpunktmengen werden aber nach dem hygienisch erforderlichen Minimum festgelegt, es gibt keinen Umluftanteil. Typischerweise ergeben sich damit Luftpunktmengen von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $60 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Zuluftdurchlass.

Die Grenzwerte für die Zulufttemperatur betragen ca. 16°C respektive 50°C , um Diskomfort zu vermeiden. Die obere Grenztemperatur kann neben der Komfortbedingung noch durch andere Anforderungen eingeschränkt sein, siehe Abschnitte 1.1 und 6.4. Innerhalb dieser Grenzwerte bestimmt sich die Zulufttemperatur aus der festgelegten Luftrate und der erforderlichen Heizleistung.



Figur 2-1: Schema einer Lüftungsanlage mit Luftherwärmung. Hervorgehoben ist der Zuluftstrang mit den wichtigsten Temperaturen und Leistungen.

Es bedeuten:

- p_{WT} Leistungsaufnahme am Wärmetauscher
- p_{LE} Leistungsaufnahme am Lüfterhitzer
- p_V Kompensation "Lüftungsverluste"
- p_R Leistungsabgabe im Raum
- p_K Leistungsabgabe über Kanalwände (an Raum)

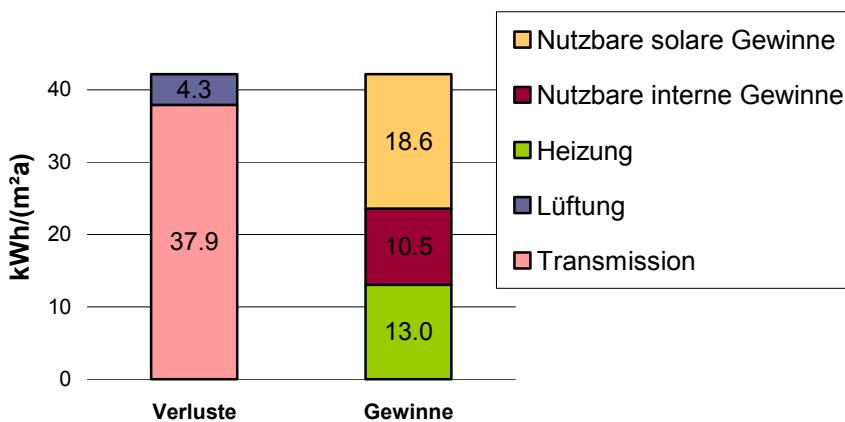
Figur 2-1 zeigt schematisch eine Lüftungsanlage mit Luftherwärmung. Die Leistungsaufnahme p_{LE} am Lüfterhitzer LE dient zur Kompensation der "Lüftungsverluste" p_V (Erwärmung auf Raumlfttemperatur infolge der nicht-idealnen Wärmerückgewinnung), sowie der Transmissions- und Infiltrationsverluste p_R , die im Raum auftreten. Bei der Auslegung des Lüfterhitzers muss der Anteil von p_{LE} berücksichtigt werden. Die Begrenzung der Leistung der Lüftungsanlage mit Luftherwärmung bezieht sich auf die im Raum abgegebene Leistung p_R .

Belegung

Die Belegung hat einen grossen Einfluss auf das Konzept eines Passivhauses. Zum einen tragen Personen zu den internen Gewinnen bei und beeinflussen damit den Heizwärmebedarf. Zum anderen wird die notwendige Luftrate in einer Wohnung, und damit die mögliche Heizleistung einer Lüftungsanlage mit Luftherwärmung, bestimmt durch die Anzahl Personen. Die standardmässig verwendeten Belegungszahlen sind in Tabelle 2-1 wiedergegeben.

Tabelle 2-1 Vorgaben für die Belegung von Wohnungen.

[SIA 380/1]	(Bruttofläche)	EFH	60 m ² /P
		MFH	40 m ² /P
[PHPP 02/03]	(Nettofläche)		35 m ² /P



Figur 2–2: Wärmebilanz in einem typischen Passivhaus
(Daten PHI).

2.2. Wärmebedarf

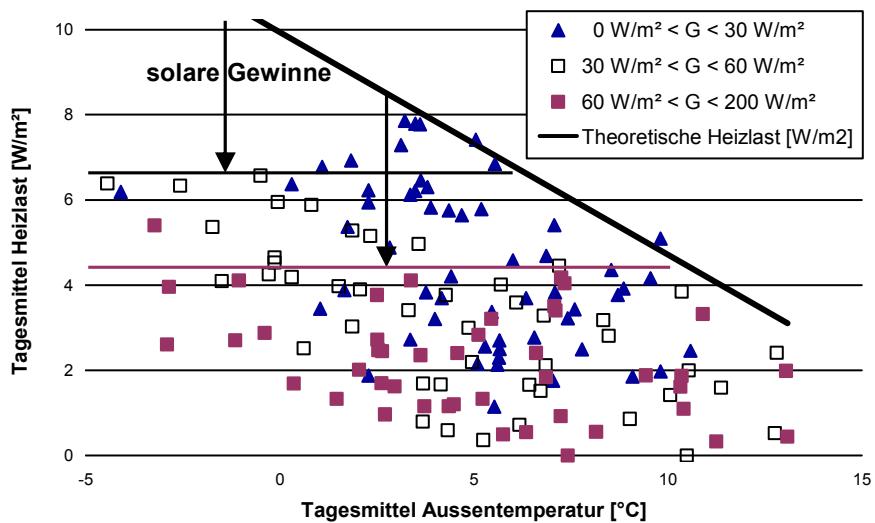
Der Heizleistungsbedarf von Passivhäusern liegt typischerweise bei 10 W/m^2 (Nettowohnfläche), was für mitteleuropäisches Klima zu einem Heizwärmeverbrauch von unter $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ führt, wie im PH-Standard gefordert. Damit liegen bei Passivhäusern die Heizleistung, die solaren und die internen Gewinne in der gleichen Größenordnung (Figur 2-2). Sie sind somit tiefer als der Wärmebedarf für Warmwasser (typischerweise $20 – 30 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{.a})$).

Heizleistungsbedarf

Der maximale Heizleistungsbedarf in Passivhäusern tritt nicht immer an den kältesten Tagen auf. Häufig weisen mäßig kalte, trübe Tage die grösste Heizlast auf [Bisanz], [Bühring]. In Passivhäusern liefern solare Gewinne einen erheblichen Beitrag zur Energiebilanz. Da im Winter sehr niedrige Temperaturen meist an klaren Tagen auftreten, die dann aber auch eine hohe Sonneneinstrahlung aufweisen, wächst die benötigte Heizleistung nicht mehr proportional mit sinkender Außentemperatur. Unter Umständen können die solaren Gewinne den Wärmebedarf sogar vollständig decken, siehe Figur 2-3, und die Luftpumpe schaltet ab. In diesem Fall entspricht die Temperatur der Zuluft beim Eintritt in die Räume etwa der Ausgangstemperatur der Wärmerückgewinnung. Ob die Spitzen des Heizleistungsbedarfs tatsächlich an mäßig kalten, trüben Tagen auftreten, hängt von den klimatologischen Eigenschaften des Standortes ab, sowie von der Fensterqualität und dem Fassadenanteil der Fenster.

Die Anwendung der derzeit gültigen Norm [SIA 384/2] zur Ermittlung des Wärmeleistungsbedarfs würde leicht zu falschen Ergebnissen führen, da bei der Berechnung solare und interne Gewinne vernachlässigt werden, und auch die klimatologischen Daten unter Berücksichtigung typischer Auskühlraten des Gebäudebestands ermittelt wurden. Die Norm wird zurzeit überarbeitet, das neue Verfahren liegt aber noch nicht vor.

Im Baubeschrieb sollte deshalb die Anwendung der SIA 384/2 bis zum Vorliegen der neuen Fassung ausgeschlossen werden.



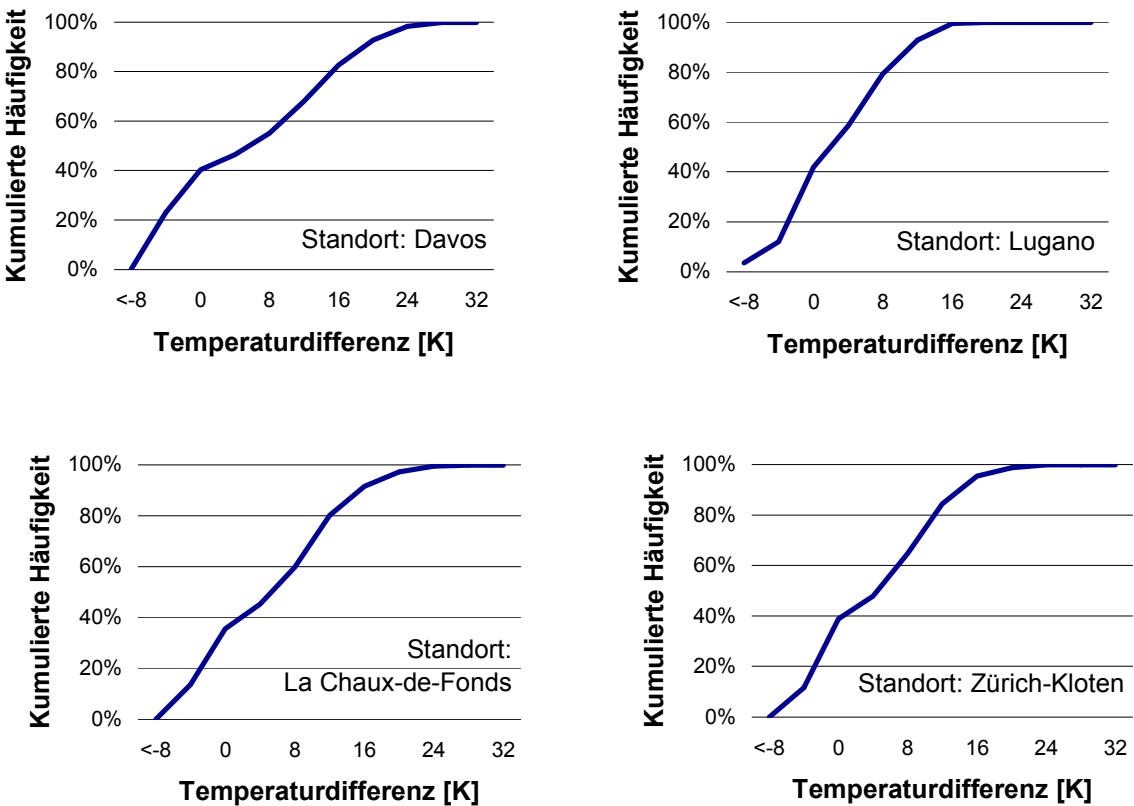
Figur 2–3: Tagesmittel der gemessenen Heizlast als Funktion der mittleren täglichen Außentemperatur, gruppiert nach drei Einstrahlungsklassen (Punkte). Die Gerade stellt die theoretische Heizlast dar, die sich aus den spezifischen Wärmeverlusten und den internen Gewinnen berechnet. Die gemessenen Werte liegen wegen der solaren Gewinne unterhalb der theoretischen Kurve.

Die neue Auswertung der Monate November 2000 bis März 2001 für das Objekt Hörbranz [CEPHEUS] wurde freundlicherweise vom PHI zur Verfügung gestellt.

Wie häufig das Auftreten welcher Heizleistungen zu erwarten ist, wurde zunächst anhand von Simulationsrechnungen untersucht. Den Rechnungen zugrunde liegt das vereinfachte Modell einer Wohnung im Passiv-Mehrfamilienhaus "Im Wechselacher", Stans [Humm], [Bossard]. Als Solltemperatur der Aufenthaltsräume wurde 21°C vorgegeben. Die Zuluft wird (ohne Begrenzung der Leistung) soweit aufgeheizt, dass diese Temperatur erreicht wird. Nach unten ist die Zulufttemperatur nur begrenzt durch die Ausgangstemperatur der Wärmerückgewinnung (Annahme 80% Wirkungsgrad). Eine weitere Erwärmung beim Durchströmen der Zuluftkanäle wurde nicht berücksichtigt. Um Überhitzung zu vermeiden, wurde die Direktstrahlung auf die Südfenster ab einem vorgegebenen Schwellwert abgeschaltet.

Figur 2-4 zeigt die kumulierten Häufigkeiten der Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluft im südorientierten Wohnzimmer im Zeitraum Oktober bis März für verschiedene Standorte in der Schweiz.

Die Temperaturdifferenzen sind zu etwa 10% bis 20% der Zeit kleiner oder gleich -4 K, zu etwa 40% kleiner oder gleich Null. Zu 40% der Zeit ist die Zuluft im Winterhalbjahr also kühler als die Raumluft. Von diesen 40% treten 85% bis 90% bei Heizleistung Null, also bei reinem Wärmetauscherbetrieb, auf. Temperaturdifferenzen unter -8 K kommen außer bei Lugano nicht vor. Dort wurde in der Simulation die Wärmerückgewinnung erst im November aktiviert. Eine optimierte Regelung könnte solche Fälle verhindern. Temperaturdifferenzen über +20 K treten merklich nur in Davos (rund 10% der Zeit) auf.



Figur 2–4: Kumulierte Häufigkeit der Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta$ zwischen Zuluft und Raumluft in einem südorientierten Wohnraum. Die Werte wurden mit dem gleichen Gebäudemodell für verschiedene Standorte ermittelt.

$$\Delta \vartheta = \vartheta_{Zu} - \vartheta_R; \text{ negative Werte: Zulufttemperatur unter Raumlufttemperatur.}$$

Links oben: Davos, rechts oben: Lugano,
links unten: La Chaux-de-Fonds, rechts unten: Zürich-Kloten.

Die Temperaturdifferenzen sind an allen Standorten zwischen -8 K und $+20\text{ K}$ relativ gleichmäßig verteilt. Es gibt keine vorherrschenden Zuluftbedingungen, auch im Winter ist die Luftnachheizung häufig gar nicht in Betrieb.

Die Vereinfachungen in der Simulation führen dazu, dass sowohl die maximalen Untertemperaturen als auch die maximalen Übertemperaturen eher überschätzt als unterschätzt werden. Wenn nun, wie in Kapitel 4, gezeigt werden kann, auch für diese Extremwerte der thermische Komfort und die Luftqualität ausreichend sind, dann sollten auch in realen Passivhäusern keine diesbezüglichen Probleme auftreten.

Heizlastberechnung im Passivhaus-Projektierungspaket

Zur Berechnung der Heizlast werden in [PHPP 02/03] Daten der entsprechenden deutschen Klimaregionen verwendet. Die relevanten Klimaparameter wurden mit umfangreichen Simulationsrechnungen bestimmt [Bisanz]. Angegeben werden Temperatur und Einstrahlung für die Haupthimmelsrichtungen für zwei "Auslegungstage": einen klaren kalten Tag (Typ I) und für einen trüben moderaten Tag (Typ II).

Die Heizlast wird für beide Typen berechnet. Der grössere der beiden Werte ist die massgebende Heizlast. Parallel wird aus der minimalen Zulufttemperatur ohne Nachwärmung und der maximal zulässigen Zulufttemperatur die Leistung bestimmt, die über die Zuluft zugeführt werden kann. Wenn eine Lüftungsanlage mit Lufterwärmung eingesetzt werden soll, muss die Heizlast kleiner sein als die über die Zuluft transportierbare Leistung. Je nach Region und Gebäudetyp (Kompaktheit der Hülle, passive Solarnutzung) kann die maximale Heizlast an Tagen von Typ I oder Typ II auftreten.

Dieses Verfahren wurde zunächst in einer Testphase zur Verfügung gestellt. Es hat sich u.a. bei der Anwendung im Projekt [CEPHEUS] bewährt. In Ausgabe 2002 des *Passivhaus-Projektierungspakets* [PHPP 02/03] wurden neuere Erkenntnisse berücksichtigt. Der Nachweis der maximal auftretenden Heizlasten ist nun Bestandteil der für die Zertifizierung notwendigen Unterlagen.

In der Schweiz kann die Heizlastberechnung nach PHPP nur mit Einschränkungen angewendet werden, da für die Schweizer Klimaregionen Temperatur und Einstrahlung der Auslegungstage nicht bekannt sind, und die Verwendung "ähnlicher" deutscher Klimaregionen mit Unsicherheiten behaftet ist.

Die Unterschiede zwischen den Annahmen im Passivhausstandard und im MINERGIE-Standard (und den entsprechenden SIA-Normen) bezüglich den Energiebezugsflächen, den internen Lasten etc. sind im Detail analysiert und dokumentiert im Schlussbericht des Projektes *MINERGIE und Passivhaus: Zwei Gebäudestandards im Vergleich* [Binz].

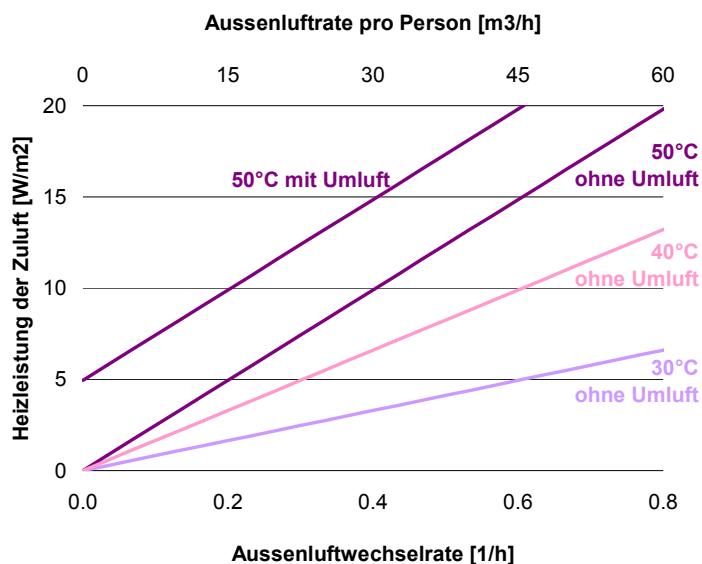
Leistung über Zuluft

Die Heizleistung steigt mit der Luftrate und der Zulufttemperatur. Die Begrenzung der Temperatur und der Luftrate begrenzt die Heizleistung. Aus Figur 2-5 ist zu entnehmen, dass die Leistung bei $n = 0.4 \text{ h}^{-1}$ und einer maximalen Temperatur von 50°C etwa 10 W/m² Nettowohnfläche beträgt.

Die Heizleistung der Zuluft reicht nur bedingt zum (Wieder-)Aufheizen eines ausgekühlten Gebäudes aus. Deshalb sollten Passivhäuser im Winter auch bei (längerer) Abwesenheit durchgeheizt werden. Die Einsparungen durch eine Reduktion der Solltemperatur sind gering, und das Wiederaufheizen dauert entweder sehr lange, oder erfordert grössere Heizleistungen, als die Zuluft erbringen kann.

Ein kurzfristiger Ausfall des Heizsystems ist im Passivhaus bezüglich der verfügbaren Heizleistung jedoch unkritisch, da die Temperatur aufgrund der geringen Verluste nur sehr langsam abnimmt.

Im Notfall können Zusatzgeräte zur Aufheizung verwendet werden: meist reicht es, z.B. den Herd einige Zeit in Betrieb zu nehmen. Beim Aufheizen vor dem Erstbezug und zur Unterstützung der Bauaustrocknung können mobile Heizgeräte eingesetzt werden.



Figur 2–5: Heizleistung (Leistungsabgabe im Raum, p_R) als Funktion der Aussenluftrate. Parameter: Zulufttemperatur 30°C, 40°C und 50°C ohne Umluft, und Zulufttemperatur 50°C mit Umluftanteil 0.2 h⁻¹ (oberste Kurve), mit den Annahmen: Wohnfläche 30 m²/P.

2.3. Feuchte

Problematik

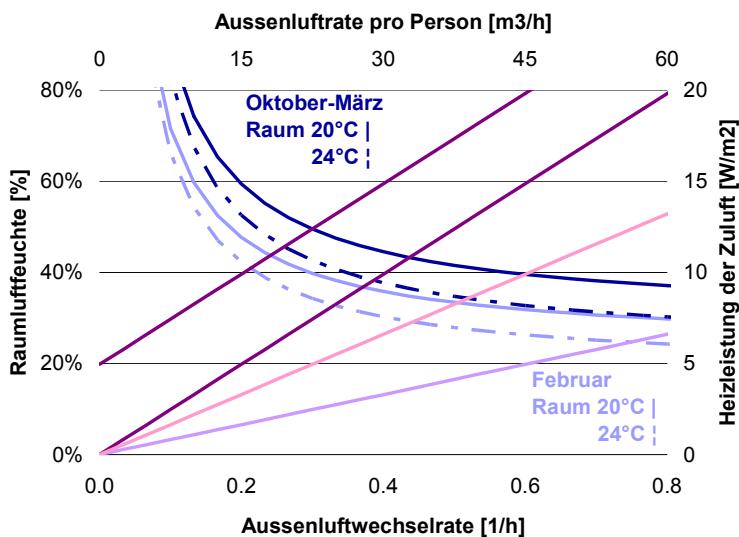
Die hohe Qualität der Gebäudehülle und der kontinuierliche Luftaustausch verhindern Feuchteschäden im Passivhaus sehr effektiv. Im Gegenteil besteht die Problematik im Winter eher in der zu niedrigen relativen Luftfeuchte, die teilweise auch über längere Zeiträume anhält.

Eine niedrige relative Luftfeuchte im Raum, unter 30%, kann negative Auswirkungen sowohl auf die Bewohner (siehe Abschnitt 1.1) als auch auf Einrichtungen und Mobiliar haben (Holzboden, Möbel, Musikinstrumente, etc.).

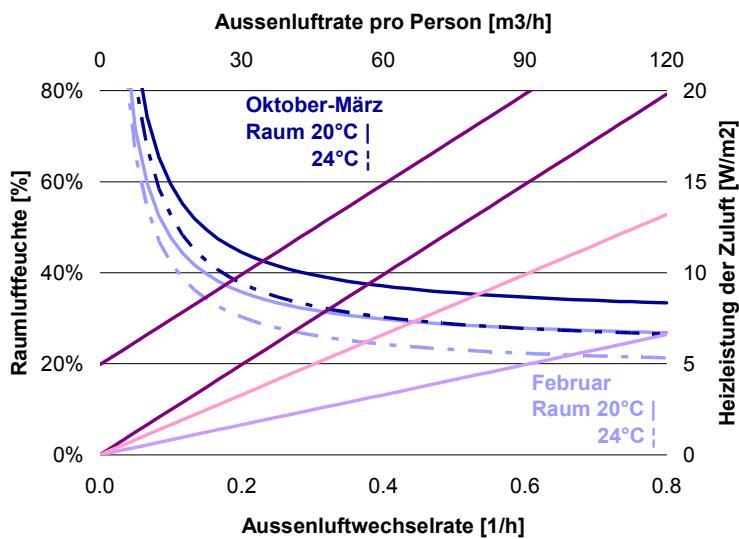
Feuchteproduktion

Aktuelle Werte für Feuchteproduktion werden angegeben von [Hartmann]. Sie gelangen nach einer Revision der möglichen Feuchtequellen und heutiger typischer Wohnsituationen zu einem "neuen Vorschlag", nämlich 78 g/(h.P), wovon etwa 36 g/(h.P) von der Person selbst stammen. Dieser Wert ergibt sich, wenn die Wäsche nicht in der Wohnung getrocknet wird. Demgegenüber gibt [SIA 180] einen Wert von 2 bzw. 4 g/m².h für niedrige bzw. mittlere Produktion an. Bei einer Belegung von 60 respektive 30 m²/P führt dies zu einer personenspezifischen Feuchteproduktion von 120 g/(h.P).

In [PHPP 02/03] wird angenommen, dass Verdunstung (ohne Verdunstung der Person selbst) zu einem negativen internen Gewinn von 25 W/P führt. Dies würde einer Verdunstungsrate von knapp 40 g/(h.P) entsprechen, und stimmt damit sehr gut mit dem obigen neuen Vorschlag überein.



*Figur 2–6: Relative Raumluftfeuchte als Funktion der Aussenluftwechselrate, mit den Annahmen:
Wohnfläche 30 m²/P,
Aussenluft-Feuchte 5 g/m³ (dunkelblau, Mittelwert von Oktober bis März in Zürich) bzw. 4 g/m³(hellblau, Mittelwert im Februar in Zürich),
interne Feuchteproduktion 78 g/(h.P).
Zusätzlich sind die Kurven der Heizleistung aus Figur 2–5 eingezeichnet.*



*Figur 2–7: Relative Raumluftfeuchte als Funktion der Aussenluftwechselrate, mit den Annahmen:
Wohnfläche 60 m²/P,
Aussenluft-Feuchte 5 g/m³ (dunkelblau, Mittelwert von Oktober bis März in Zürich) bzw. 4 g/m³(hellblau, Mittelwert im Februar in Zürich),
interne Feuchteproduktion 78 g/(h.P).
Zusätzlich sind die Kurven der Heizleistung aus Figur 2–5 eingezeichnet.*

Raumluftfeuchte im Winter

Abschätzung

Figuren 2-6 und 2-7 zeigen eine Abschätzung der erreichbaren Raumluftfeuchte. Die Annahmen waren:

▪ Wohnfläche	30 m ² /P (Figur 2-6)
	60 m ² /P (Figur 2-7)
▪ Absolute Feuchte Aussenluft (Auswertung Klimadaten Zürich Kloten)	
- Mittelwert Oktober – März	5 g/m ³
- Mittelwert im Februar	4 g/m ³
▪ Feuchteproduktion intern:	78 g/(h.P)

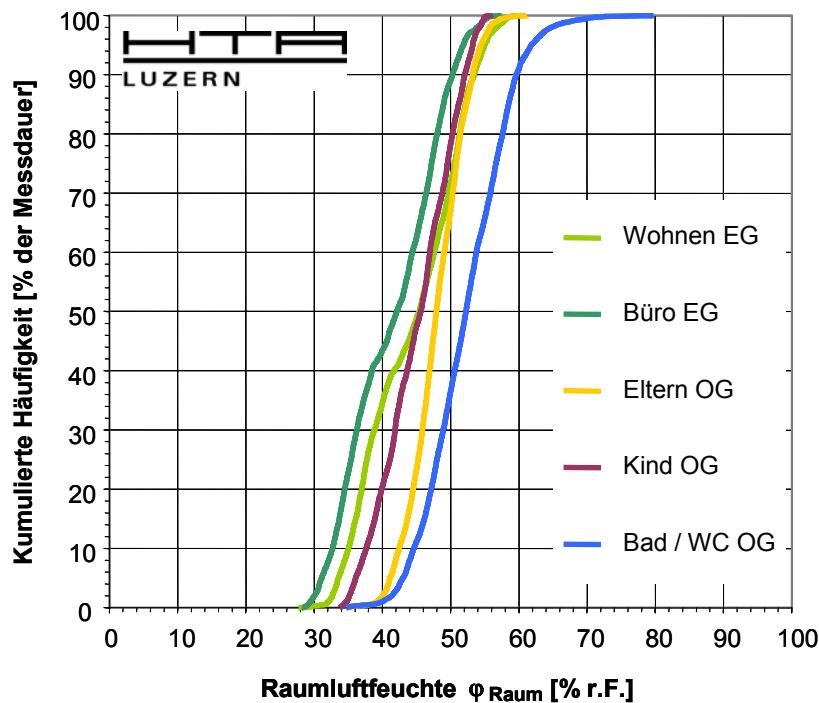
Hierzu ist zu bemerken, dass in Realität Feuchte aus dem Bad kaum voll als Quelle bei der Berechnung der mittleren Raumluftfeuchte in der Wohnung gezählt werden kann, weil ja diese direkt durch die Abluft im Bad weg transportiert wird. Bei offenen Türen (und höheren Temperaturen im Badzimmer) findet allerdings ein Transport von Feuchte in die angrenzenden Räume statt, auch wenn der Netto-Luftstrom natürlich *in* das Badzimmer mit dem Abluftdurchlass ist.

Resultate von Messungen in Gebäuden

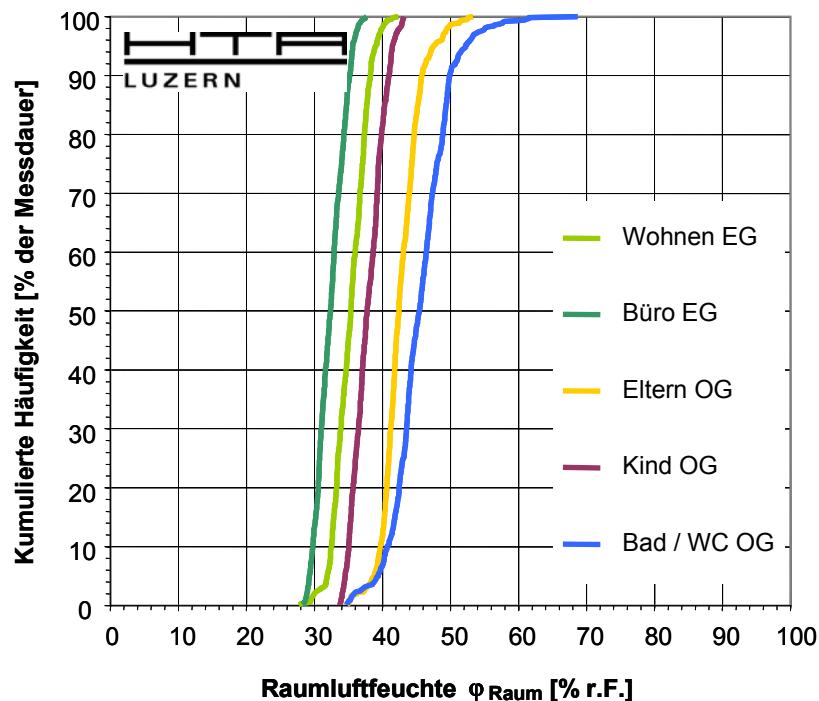
Im Rahmen des Messprojekts [Bossard] bestand die Möglichkeit, zusätzliche Messungen vorzunehmen. Im Winter 2002/2003 und im Frühjahr 2003 wurden durch den Wissens- und Technologietransfer HLKS der HTA Luzern Langzeitmessungen der Raumluftfeuchte in den Räumen einer Maisonettewohnung im Passiv-MFH "Im Wechselacher" in Stans durchgeführt [StansLuft]. Die Wohnung ist 130 m² gross, und der Zuluftvolumenstrom bei Stufe Normallüftung beträgt etwa 140 m³/h. Die Wohnung wird von zwei Erwachsenen und zwei Kindern bewohnt.

Figur 2-8 zeigt die kumulierte Häufigkeit der Stundenmittelwerte der relativen Feuchte in den einzelnen Räumen im Zeitraum Oktober 2002 bis März 2003. Büro und Wohnen im Erdgeschoss weisen die tiefsten Werte auf, aber der kritische Wert von 30% rF wird auch hier kaum jemals unterschritten. Zu ca. 50% der Zeit betragen die Werte sogar mehr als 40% rF. Figur 2-9 zeigt die kumulierte Häufigkeit der Stundenmittelwerte der relativen Feuchte in den gleichen Räumen im Februar 2003. Büro und Wohnen im Erdgeschoss weisen wieder die tiefsten Werte auf. Für jeden Raum sind die Höchstwerte der relativen Feuchte im Februar deutlich tiefer als im ganzen Winterhalbjahr. Dazu kommt, dass – ebenfalls in allen Räumen – die tiefsten Werte der relativen Feuchte gehäuft im Februar auftreten.

Dies bedeutet, dass im grössten Teil des Winterhalbjahres bezüglich der Feuchte ein sehr komfortables Raumklima herrscht. Auch im Februar treten kritische Werte kaum jemals auf, aber die relative Feuchte bewegt sich lange Zeit in einem tiefen Bereich. Die tiefen Werte der relativen Feuchte im Februar lassen sich gut erklären mit der Tatsache, dass dieser Monat im Messzeitraum eine lang andauernde Kälteperiode aufwies.



Figur 2–8: Kumulierte Häufigkeit der gemessenen relativen Feuchte der Raumluft im MFH Stans, Zeitraum Oktober 2002 bis März 2003 [StansLuft].



Figur 2–9: Kumulierte Häufigkeit der gemessenen relativen Feuchte der Raumluft im MFH Stans, Zeitraum Februar 2003 [StansLuft].

Ein Bewohner bestätigte, dass die Feuchte im Allgemeinen keinen Anlass zu Beschwerden gab. Er berichtet allerdings auch von Problemen mit manchen Holzverkleidungen, die offensichtlich auch unter moderaten Feuchteverhältnissen erheblichen Schwund bis hin zu Rissen zeigen.

Feuchte-Rückgewinnung

Das Problem der niederen Feuchte im Winter könnte mit Feuchte-Rückgewinnung entschärft werden. Neuerdings sind neben Lüftungsgeräten mit Rückgewinnung mittels Kondensation auch solche auf dem Markt, deren Rotor mit sorptivem Material beschichtet ist.

Allerdings liegen zurzeit keine praktischen Erfahrungen oder Messungen zur Feuchte-Rückgewinnung bei Wohnungslüftungen vor. Zu klären wäre, ob eine Steuerung der Feuchte-Rückgewinnung wünschenswert wäre (zu hohe Feuchte in der Übergangszeit), ob sich durch die Feuchte-Rückgewinnung hygienische Probleme einstellen, und wie zuverlässig die Rückübertragung (bzw. in MFH die Verteilung) von Gerüchen unterbunden werden kann.

2.4. Primärenergiebedarf

Anforderung Passivhausstandard

Die Anforderung an den Heizwärmebedarf stellt sicher, dass das Innenklima einen sehr hohen Komfortwert aufweist. Nebst der Anforderung an den Heizwärmebedarf beinhaltet der Passivhausstandard aber auch eine Anforderung bezüglich Primärenergie. Der Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie darf $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ nicht überschreiten. Der Strombedarf für die Haushaltgeräte ist dabei mit zu berücksichtigen, was die Berechnung dieses Wertes in der Planung etwas erschwert.

Das Primärenergiekriterium ist erforderlich, da sonst der geringe Heizwärmebedarf erkauft werden könnte durch hohe interne Gewinne, oder die Einsparungen durch eine effiziente Gebäudehülle durch ein ineffizientes System zur Wärmebereitstellung zunichte gemacht werden könnten. Das oberste Ziel, bei mindestens gleichem oder grösserem Komfort im Vergleich zu konventionellen Bauten eine Energieeinsparung zu realisieren, wäre damit in Frage gestellt.

Der Primärenergiebedarf – und die assoziierten CO_2 -Emissionen – werden im Passivhaus-Projektierungspaket [PHPP 02/03] mittels Umrechnungsfaktoren aus dem Endenergiebedarf des jeweiligen Energieträgers berechnet. Die Primärenergiefaktoren berücksichtigen dabei den Aufwand an nicht-erneuerbarer Primärenergie, der nötig ist, um eine Einheit Endenergie dem Gebäude zur Verfügung zu stellen. Der Ertrag einer Solaranlage zur Warmwasserbereitung, die zum Gebäude gehört, wird abgezogen von der Energie, die dem Speicher zur Bereitstellung der Nutzenergie zugeführt werden muss. D.h., sie wirkt sich mindernd auf den anderweitigen Endenergiebedarf aus. Allerdings wird eine PV-Anlage im Nachweis bisher nicht analog beim Strombedarf berücksichtigt. Weder bei Wärme noch bei Strom ist bisher standardmäßig eine Möglichkeit gegeben, gekaufte Energie aus erneuer-

baren Quellen zu berücksichtigen. Für Holz wird dagegen der nicht-erneuerbare Primärenergieaufwand für die Bereitstellung berücksichtigt.

Der Passivhausstandard erlaubt es, den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf bei Verwendung von konventionellen Energieträgern einschliesslich Wärmepumpen, BHKW und Fernwärme konsistent zu berechnen. Bei den "neuen" erneuerbaren Energieträgern bestehen noch Inkonsistenzen, die aber zum Teil nur das Fehlen einer allgemeinverbindlichen Definition wider spiegeln.

Möglicherweise wird die Berechnung des Primärenergiebedarfs im Passivhausstandard demnächst revidiert. Längerfristig wäre auch die Berücksichtigung der Gebäudestruktur in einer Gesamtbilanz wünschenswert.

2000 Watt Gesellschaft

Von den ETH-Annex-Anstalten wurde die Vision einer "2000 Watt Gesellschaft" definiert als eine Strategie, mit der bis Mitte dieses Jahrhunderts eine Lebens- und Wirtschaftsform realisiert werden soll, welche den heutigen Primärenergieverbrauch um den Faktor drei reduziert, ohne sozialen und ökonomischen Schaden anzurichten. Vielmehr soll die Lebensqualität durch höheren Komfort und geringere Umweltbelastung verbessert werden. Zur leichteren Veranschaulichung kann die gesamthaft in der Schweiz umgesetzte Primärenergie in eine Dauerleistung pro Person umgerechnet werden. Konkret sieht die Vision eine Reduktion des Energieverbrauchs von heute 6000 W auf 2000 W pro Person vor [ETH 2000WG].

Inwieweit der Passivhausstandard die Anforderungen der Vision "2000 Watt Gesellschaft" erfüllt, wird in einer novatlantis-Studie untersucht, in der einerseits die Kriterien der 2000 Watt Gesellschaft auf den Gebäudebereich der Schweiz, auch in zeitlicher Hinsicht, transponiert werden und andererseits Gebäude mit verschiedenen Energiestandards auf diese Kriterien hin evaluiert werden [Koschenz].

3. Wärmeabgabe und –verteilung

Da das Lüftungssystem, wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, primär nach dem (hygienischen) Lüftungsbedarf ausgelegt wird, ist die Heizungsfunktion ein "Nebenprodukt". In diesem Kapitel werden die Wechselwirkungen Luftsysteem – Gebäude dargestellt und die Konsequenzen für die Heizungsfunktion diskutiert. Die Verhältnisse in den Zulufräumen werden im anschliessenden Kapitel behandelt.

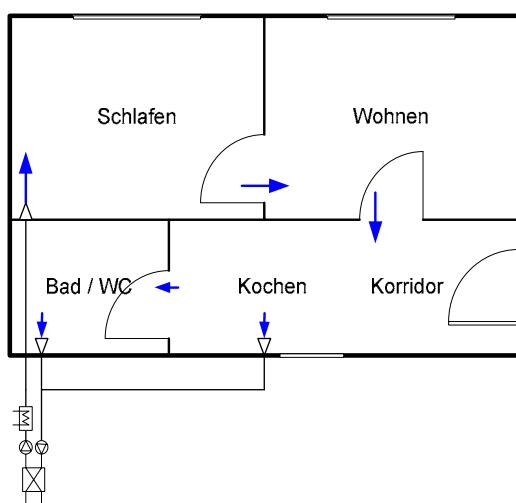
3.1. Luftsystem in der Wohnung

Luftführung

Die Luftführung soll so gewählt werden, dass in die Bereiche, in denen sich Personen aufhalten, möglichst unverbrauchte Luft eingebracht wird, und dass belastete Luft möglichst effektiv und auf kürzestem Weg abgeführt wird. Ideal wäre also eine Kolbenströmung durch die Räume vom Zuluftbereich zum Abluftbereich. Aus diesen Überlegungen abgeleitet ist das Prinzip der Kaskadenlüftung. Die Wohnung wird in Zuluft-, Überströmbereiche und Abluftbereiche unterteilt. Zum Zuluftbereich gehören Räume mit hohem Frischluftbedarf. Überströmbereiche sind nicht ständig belegt oder werden alternierend mit Räumen im Zuluftbereich genutzt. Zum Abluftbereich gehörenden Räume mit nicht ständiger Belegung und / oder hoher Luftbelastung.

Figur 3-1 zeigt das Prinzip der Kaskadenlüftung in einer Wohnung mit einem bewusst einfach gehaltenen Grundriss. Die Zuluft wird im Schlafräum zugeführt. Wohnzimmer und Korridor sind Überströmbereiche, in der Küchenzone und im Bad / WC wird die Abluft gefasst. Die Lüftungsanlage mit Lufterwärmung kann sich innerhalb oder ausserhalb der Wohnung befinden.

Mit der Lüftungsanlage mit Lufterwärmung sind bei der Kaskadenlüftung Räume im Zuluftbereich tendenziell wärmer als Räume im Abluftbereich. Dies steht im Gegensatz zu den gewöhnlichen Temperaturanforderungen:



Figur 3-1: Schema der Lüftungsanlage mit Lufterwärmung in einer Wohnung. Idealfall der Kaskadenlüftung: die Zuluft wird im Schlafräum zugeführt. Wohnzimmer und Korridor sind Überströmbereiche, in der Küchenzone und im Bad / WC wird die Abluft gefasst. Die Lüftungsanlage mit Lufterwärmung kann sich innerhalb oder ausserhalb der Wohnung befinden.

meist werden Schlafzimmer eher kühler, Badzimmer eher wärmer als die anderen Räume gewünscht. Die Größenordnung des Gefälles, ausgleichende Effekte und gezielte Gegenmassnahmen werden in den folgenden Abschnitten 3.3, 3.4 und 3.5 diskutiert.

Luftmengen

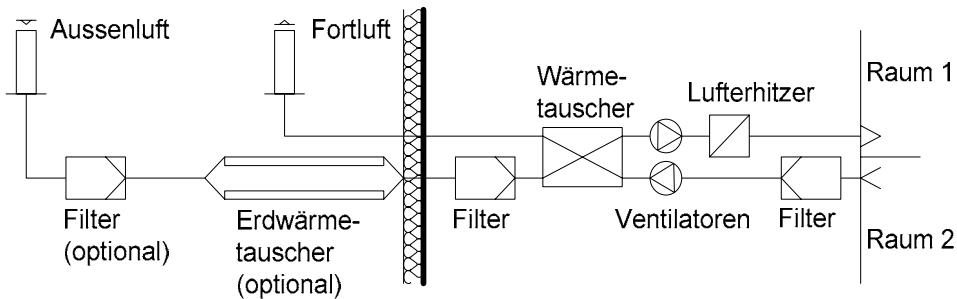
Die Luftmengen werden nach dem hygienischen Lüftungsbedarf bestimmt. Anhaltswerte dazu sind in Abschnitt 1.1, unter *Luftqualität*, gegeben. Ausgangspunkt für die Bemessung der gesamten Luftmenge ist die Anzahl von Personen in der betrachteten Wohneinheit. Die Luftraten pro Person gelten bei Anwesenheit. Für die Verteilung wird dann in der Regel eine (zeitweise) Belegung von zwei Personen pro Zimmer angenommen. Dies führt zu Lufraten von etwa $40 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Zimmer. Auch wenn keine Personen anwesend sind sollte eine Grundlüftung aufrecht erhalten werden, um Emissionen, die nicht an Personen gebunden sind, abzuführen. Häufig wird ein Mindestluftwechsel 0.3 h^{-1} , bezogen auf die gesamte Wohnung, empfohlen. Um die Grundlüftung möglichst tief halten zu können, ist auf die Verwendung von emissionsfreien oder zumindest emissionsarmen Materialien, vor allem im Innenausbau, zu achten. Informationen über Emissionen können der auf der SIA-Homepage [SIA-ÖkoDek] abgerufen werden. Die Grundlagen dazu sind in [SIA D093], [SIA 493] dokumentiert.

Lässt sich die erforderliche Heizwärme nicht mit den hygienisch notwendigen Luftmengen einbringen, muss die fehlende Wärme anderweitig bereit gestellt werden. Auf Umluft zur Erhöhung der Heizleistung sollte verzichtet werden. Das Luftsysteem wird damit komplexer und hat einen grösseren Platzbedarf, und die Einstellung und Regelung werden aufwendiger. Es wird mindestens ein zusätzlicher Ventilator benötigt, der Energiebedarf für die Luftförderung steigt. Je nach Ort der Umluftfassung besteht auch die Möglichkeit, dass belastete Luft wieder in die Wohnung zurückgeführt wird. Damit entfällt das wichtigste Argument für die Lüftungsanlage mit Luft erwärmung: die Einsparung von Aufwand im Vergleich zu anderen Heizsystemen (siehe auch Kapitel 7).

Lüftungsanlage

Figur 3-2 zeigt eine mögliche Konfiguration einer Lüftungsanlage mit Luft erwärmung. Die Aussenluft wird gefasst und gegebenenfalls, über einen Grobfilter in der Aussenluftfassung, durch den Erdwärmetauscher geleitet.

Im Gebäude durchströmt die Luft einen Feinfilter und danach den Wärmetauscher. Für die Ventilatoren sind verschiedene Positionen vor oder nach dem Wärmetauscher denkbar. Die jeweiligen Vor- und Nachteile werden weiter unten erläutert. Nach dem Wärmetauscher und dem Ventilator folgt in der Zuluftleitung der Luftheritzer. Werden mehrere Räume über Abzweigungen von einer Zuluftleitung versorgt, sollten zwischen den Abzweigungen Schalldämpfer vorgesehen werden. Um eine Verschmutzung des Wärmetauschers zu vermeiden, wird auch in der Abluftleitung ein Filter vorgesehen. Über den Wärmetauscher und den Fortluftauslass wird die Luft nach aussen transportiert.



Figur 3–2: Anlagenschema einer Lüftungsanlage mit Luftwärmung für ein EFH oder eine Wohnung.

Der Erdwärmetauscher dient dem Frostschutz und ist optional. In Deutschland ist ein Grobfilter in der Außenluftfassung üblich, in der Schweiz eher nicht. Die Position der Ventilatoren wird im Text diskutiert. Schalldämpfer wurden nicht eingezeichnet.

Ventilatoren

Ventilatoren für passivhaustaugliche Lüftungsanlage mit Luftwärmung müssen zum einen effizient sein. Die Forderung, dass der Elektrizitätsbedarf pro gefördertem Luftvolumen für die gesamte Anlage (2 Ventilatoren) $0.45 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})$ nicht übersteigen soll, lässt auch bei Minimierung der Druckverluste in den notwendigen Anlagenkomponenten fast nur die Verwendung von elektrisch kommutierten Gleichstromventilatoren zu.

Zum anderen muss die Balance der Zu- und Abluftströme unter allen möglichen Betriebsbedingungen möglichst gut eingehalten werden. Da die Luftströme an den verschiedenen Stellen in der Anlage unterschiedliche Temperaturen aufweisen, die stark variieren können, und da auch die von aussen aufgeprägten Druckverhältnisse (Stack, Wind) sehr unterschiedlich sein können, ist dazu im Prinzip eine Massenstromregelung erforderlich. Einige Hersteller bieten massenstromgeregelte Ventilatoren an. Die meisten Ventilatoren arbeiten aber noch mit Volumenstromregelung bzw. mit einer Konstantvolumenstromregelung (eine stufenweise Regelung des Volumenstroms). Der Einbauort des Ventilators ist daher kritisch für die Einhaltung der Balance bei Temperaturverteilungen längs der Kanäle, die von der Situation beim Abgleich der Anlage abweichen. Bei reinen Lüftungssystemen ist der Unterschied zwischen Volumen- und Massenstrom aufgrund der geringeren Temperaturdifferenzen der Luftströme weniger bedeutsam als bei der Lüftungsanlage mit Luftwärmung. Bei Abweichungen von $\pm 10 \text{ K}$ ändert sich die Dichte, und damit der Massenstrom, um -3.3% bzw. $+3.5\%$, bei $\pm 30 \text{ K}$ beträgt die Abweichung -9.3% bzw. $+11\%$.

Für eine optimale Balance sollten die Zuluft- und Abluftventilatoren Luftströme mit möglichst ähnlicher Temperatur fördern. Aus dieser Sicht empfiehlt sich ein Einbau des Zuluftventilators nach dem Wärmetauscher und vor dem Luftheritzer, des Abluftventilators vor dem Wärmetauscher, wie in Figur 3-2 dargestellt. Demgegenüber wären andere Positionen aufgrund der Effizienz und der Luftqualität zu bevorzugen, siehe Abschnitt *Leckagen in der Lüftungsanlage*.

Position Heizregister (in der Wohnung)

In der Regel wird pro Wohnung ein zentraler Luftheritzer eingesetzt, der die gesamte Zuluft auf die notwendige Temperatur erhitzt. Dieser befindet sich nach Figur 3-2 nach dem Wärmetauscher und dem Zuluftventilator. Auf eine raumweise Konditionierung der Zuluft, entweder mit separaten Heizregistern für die einzelnen Räume, oder über die Versorgung nur einiger Räume mit erwärmer Zuluft, sollte verzichtet werden. In Passivhäusern ist eine raumweise Regelung der Heizleistung zur Aufrechterhaltung einer gleichmässigen Temperatur in der ganzen Wohnung nicht notwendig. Zudem ist der Aufwand für separate Heizregister erheblich, vor allem weil eine direkt-elektrische Versorgung wegen des ungünstigen Primärenergiefaktors nicht in Frage kommt. Damit wären auch mögliche Kosteneinsparungen durch eine Lüftungsanlage mit Lufterwärmung nicht mehr gegeben.

Sind dagegen in bestimmten Fällen unterschiedliche Temperaturen in verschiedenen Räumen gefordert, ist der Aufwand für eine Zusatzheizung nicht vermeidbar. Dazu kommt eventuell ein erhöhter Aufwand für die Dämmung der Innenwände, da die Wärmeströme durch Transmission über Innenwände und Konvektion durch offene Türen in Gebäuden nach Passivhausstandard nicht vernachlässigbar sind, siehe Abschnitt 3.4 *Wärmeverteilung in der Wohnung*. Möglichkeiten zur Temperaturdifferenzierung innerhalb der Wohnung werden in [Schnieders] diskutiert.

Kanalnetz

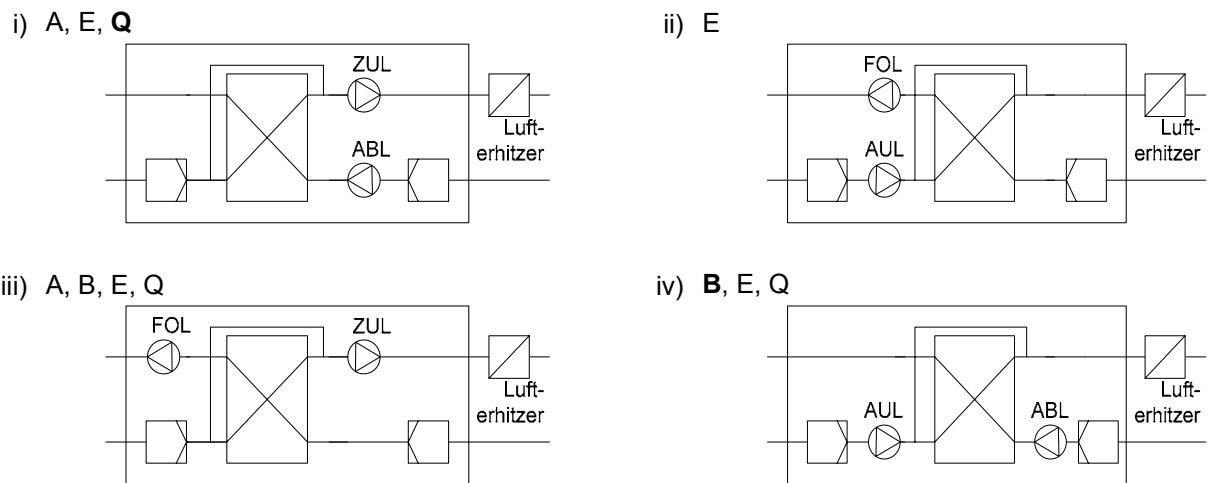
Um den Energiebedarf für die Luftförderung zu minimieren, muss das Kanalnetz einerseits möglichst kurz gehalten werden. Die Kanäle sollten möglichst wenig Richtungsänderungen aufweisen, und auch möglichst wenig Einbauten. Andererseits darf auf notwendige Einbauten (Filter, Schalldämpfer etc) nicht verzichtet werden. Zuluftdurchlässe (ZLD) und Abluftdurchlässe (ALD) müssen in einer geeigneten Position installiert werden, was eine minimale Kanallänge erfordert. Einstellbare ZLD ermöglichen den Abgleich der Anlage ohne zusätzliche Drosselventile.

Aussenluft- und Fortluftkanäle sollten weitgehend ausserhalb der thermischen Hülle verlaufen, und müssen innerhalb gut gedämmt sein. Entsprechend müssen Abluft- und - insbesondere bei Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung - Zuluftkanäle ausserhalb der thermischen Hülle soweit möglich vermieden werden, und, wenn unvermeidbar, sehr gut gedämmt werden.

Bei Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung kann auch eine Dämmung der Zuluftkanäle innerhalb der thermischen Hülle sinnvoll sein. Nähere Ausführungen dazu finden sich in Abschnitt 3.3 *Wärmeabgabe im Kanal*.

Leckagen in der Lüftungsanlage

Die Dichtigkeit des Lüftungssystems beeinflusst sowohl die Lüftungsfunktion als auch die Heizfunktion. Befinden sich die Leckagen im Kanalsystem innerhalb der thermischen Hülle in dem zu belüftenden Bereich, wird die Verteilung der Luft und damit der Wärme auf die Räume unter Umständen verändert. Befinden sich die Leckagen im Kanalsystem ausserhalb der Woh-



Figur 3–3: Mögliche Anordnungen der Ventilatoren und des Wärmetauschers im Lüftungsgerät (nach [Paul]). Je nach Lage können verschiedene kritische Punkte auftreten:

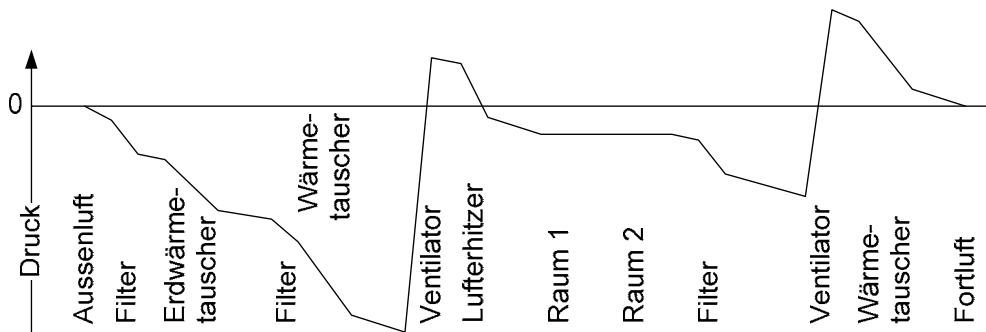
- A: Akustik, Ventilatorgeräusch im Raum hörbar
- B: Balance, Volumenstromregelung bewirkt evtl. grössere Differenzen im Massenstrom
- Q: Luftqualität, interne Leckagen bewirken unerwünschte Umluftanteile
- E: Effizienz, interne Leckagen bewirken Kurzschluss AUL – FOL.

nung, erhält diese zuwenig Luft und Wärme. Befinden sich die Leckagen auch noch ausserhalb der thermischen Hülle, entstehen auch noch zusätzliche Wärmeverluste.

In einem Mehrfamilienhaus mit einer semizentralen Lüftungsanlage (siehe Abschnitt 3.2) könnten durch Leckagen auch Geruchsübertragungen von der Abluft in die Zuluft stattfinden, wenn die Abluft- und Zuluftkanäle zu den Wohnungen in einem gemeinsamen Schacht untergebracht sind. Das Kanalnetz in einem Passivhaus sollte daher mindestens den Anforderungen der Dichtigkeitsklasse C nach [prEN 12237] (zitiert nach [prEN 13779]) genügen. Als Prüfdruck wird die (mittlere) Auslegungsdruckdifferenz der Anlage verwendet. Um eine Vorstellung von den Größenordnungen zu erhalten, sei folgendes Beispiel genannt: ein Kanalstück mit einer Oberfläche von 12 m^2 , das bei einem Prüfdruck von 100 Pa eine Leckage von höchstens $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$, oder rund 2% eines Volumenstroms von $120 \text{ m}^3/\text{h}$, aufweist, genügt der Dichtigkeitsklasse C.

Für runde Kanäle (Wickelfalzrohre) mit vorgefertigten Dichtungselementen ist eine Dichtigkeit der Klasse D (dreimal dichter als Klasse C) leicht zu erreichen.

Auch Leckagen in Komponenten müssen vermieden werden. Insbesondere der Wärmetauscher ist hier von Bedeutung. Leckagen im Wärmetauscher verringern den tatsächlichen Rückgewinnungsgrad und beeinträchtigen unter Umständen die Luftqualität. In Figur 3-3 sind die möglichen Anordnungen der Ventilatoren bezüglich des Wärmetauschers dargestellt. Position i) ist optimal für die Balance und die Nutzung der Abwärme der Ventilatoren, aber interne Leckagen im Wärmetauscher können einen Kurzschlussstrom zwischen Abluft, die in den Wärmetauscher gedrückt wird, und der Zuluft bewirken, sodass die Zuluftqualität vermindert wird. Auch können eventuell Ge-



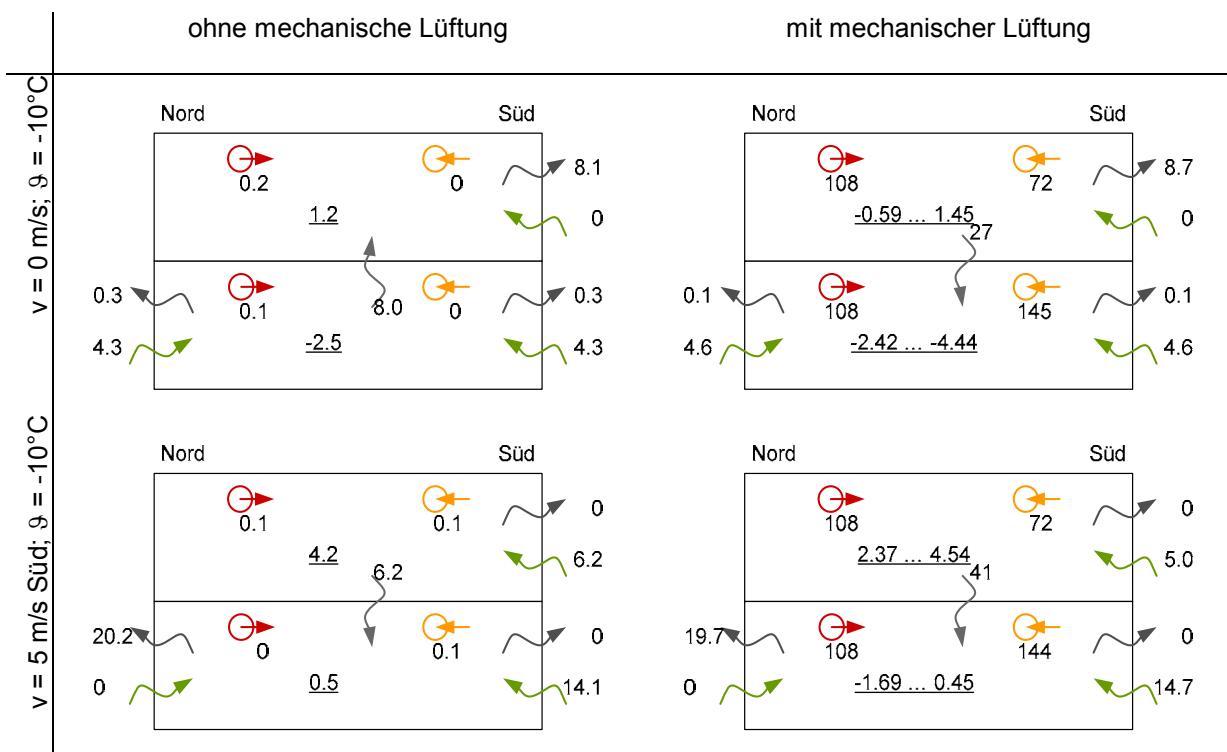
Figur 3–4: Differenz des Drucks in einer Lüftungsanlage zum Aussendruck auf gleicher Höhe in einer eingeschossigen Wohnung (qualitativ). Umgebungsbedingungen: kein Wind, ca. 0°C. Die Druckdifferenz in den Räumen ist bei einem balancierten Lüftungssystem und bei ausreichend dimensionierten Überströmöffnungen wesentlich bestimmt durch den Stackdruck (und gegebenenfalls den Winddruck). Im Beispiel liegt die Raumtemperatur über der Aussentemperatur, entsprechend ist der Druck im Raum relativ zum Aussendruck auf gleicher Höhe etwas geringer (ohne Wind). Die grössten Strömungswiderstände bilden die Einbauten im Kanalnetz. Die Widerstände der geraden Kanalstücke und der Fittings sind im Allgemeinen wesentlich geringer, aber bei einem nicht optimierten Kanalnetz könnte sie sehr wesentlich werden.

räusche sowohl vom Zuluftventilator als auch vom Abluftventilator in den Raum übertragen werden. Letzteres ist aber ausser in offenen Küchen unkritisch. Variante iii) und iv) sind sowohl bezüglich Balance als auch bezüglich Luftqualität ungünstig. Variante iii) ist auch bezüglich Akustik ungünstig. Diese Variante ist allerdings in vielen Kleingeräten anzutreffen. Variante ii) weist die wenigsten Beeinträchtigungen auf. Einige wenige Hersteller bieten diese Variante an (u.a. Paul, Hoval). In allen Fällen wird aber durch interne Leckagen die Effizienz der Lüftung gemindert, und bei Standard-Prüfbedingungen ein zu hoher Rückgewinnungsgrad vorgetäuscht, siehe [Feist 1999b], [Schild]. Es sollte daher darauf geachtet werden, dass das Lüftungsgerät geringe interne Leckagen aufweist. Für den Einsatz im Passivhaus dürfen die Leckagen nicht mehr als 3% des mittleren Volumenstromes des Einsatzbereiches des Wohnungslüftungsgerätes betragen [Feist 1999b].

Zusammen mit der Luftdichtigkeitsprüfung der Gebäudehülle müsste je nach Situation auch die Luftdichtigkeit der Lüftungskomponenten geprüft werden (siehe [prEN 14134] und [prEN 12237]). Über den Einfluss der Luftdichtigkeit der Lüftungsanlage auf die Luftdichtigkeitsmessung der Gebäudehülle siehe [Tanner 2004].

Infiltration

Ein typischer Verlauf des Drucks im Lüftungssystem und in der Wohnung ist in Figur 3-4 dargestellt. Angegeben ist die Differenz zum Aussendruck auf gleicher Höhe bei ca. 0°C und ohne Wind. Die Druckdifferenz in den Räumen ist bei einem balancierten Lüftungssystem und bei ausreichend dimensionierten Überströmöffnungen wesentlich bestimmt durch den Stackdruck (und gegebenenfalls den Winddruck). Die grössten Strömungswiderstände bilden die Einbauten im Kanalnetz. (Filter, Wärmetauscher, Lufterhitzer, Luft-



Figur 3-5: Infiltration und Exfiltration in einer zweigeschossigen Wohnung, mit offener Treppe und Türspalt als Überströmdurchlass. Links: mit Lüftungsanlage, aber ausgeschalteter mechanischer Lüftung; rechts: mit mechanischer Lüftung. Eine balancierte mechanische Lüftungsanlage verändert die Infiltration und Exfiltration nur geringfügig. Kreis mit Pfeil nach aussen (rot): Zuluft, Pfeil nach innen (gelb): Abluft, angegeben sind Massenströme in kg/h; unterstrichen: Differenz zum Aussendruck auf gleicher Höhe; mit mechanischer Lüftung: kleinste und grösste Druckdifferenz je Etage.

Bedingungen: alle Innenräume 20°C, Zuluft 50°C; Leckagen mit insgesamt $n_{50} = 0.6 \text{ h}^{-1}$ verteilt auf Nord- und Südfassade;

Umgebungsbedingungen: $v = 0 \text{ m/s}$, $\vartheta_a = -10^\circ\text{C}$ (oben), $v = 5 \text{ m/s}$ (Süd), $\vartheta_a = -10^\circ\text{C}$ (unten).

durchlässe). Der Druckverlust je Komponente bei Nennvolumenstrom beträgt 20 bis 40 Pa. Die Widerstände der geraden Kanalstücke und der Fittings sind im Allgemeinen wesentlich geringer, aber bei einem nicht optimierten Kanalnetz können sie sehr wesentlich werden. Die Ventilatoren müssen unterschiedliche Druckverluste in den jeweiligen Strängen kompensieren, um denselben Volumenstrom aufrecht zu erhalten.

Figur 3-5 zeigt Infiltration und Exfiltration in einem vereinfachten Modell einer zweigeschossigen Wohnung, mit offener Treppe und Türspalten als Überströmvventilen (Berechnung mit [COMIS]). Der Betrieb einer balancierten mechanischen Lüftungsanlage (rechts) verändert die Infiltration und Exfiltration nur geringfügig gegenüber der Situation bei gleichen Umgebungsbedingungen, aber mit ausgeschalteter Lüftung (links).

Umgekehrt wird auch das Lüftungssystem von der Infiltration und Exfiltration wenig beeinflusst, sofern die Anlage ausreichend Reserve hat, die Balance der Volumenströme unter wechselnden Bedingungen aufrecht zu erhalten. Dies gilt sowohl für rein thermisch induzierte Infiltration und Exfiltration (oben), als auch für (zusätzlichen) Winddruck (unten).

Für das Modell der zweigeschossigen Wohnung wurden die Leckageraten genau auf $n_{50} = 0.6 \text{ h}^{-1}$ eingestellt. Für die Situationen in Figur 3-5 betragen die gesamten Infiltrations-/Exfiltrationsraten für den Stack alleine $n < 0.03 \text{ h}^{-1}$ bei -10°C Aussentemperatur. Wind aus Süd mit 5 m/s erhöht die Raten um zusätzlich $n \approx 0.06 \text{ h}^{-1}$. Bei 10 m/s würde die zusätzlichen Raten $n \approx 0.18 \text{ h}^{-1}$ betragen.

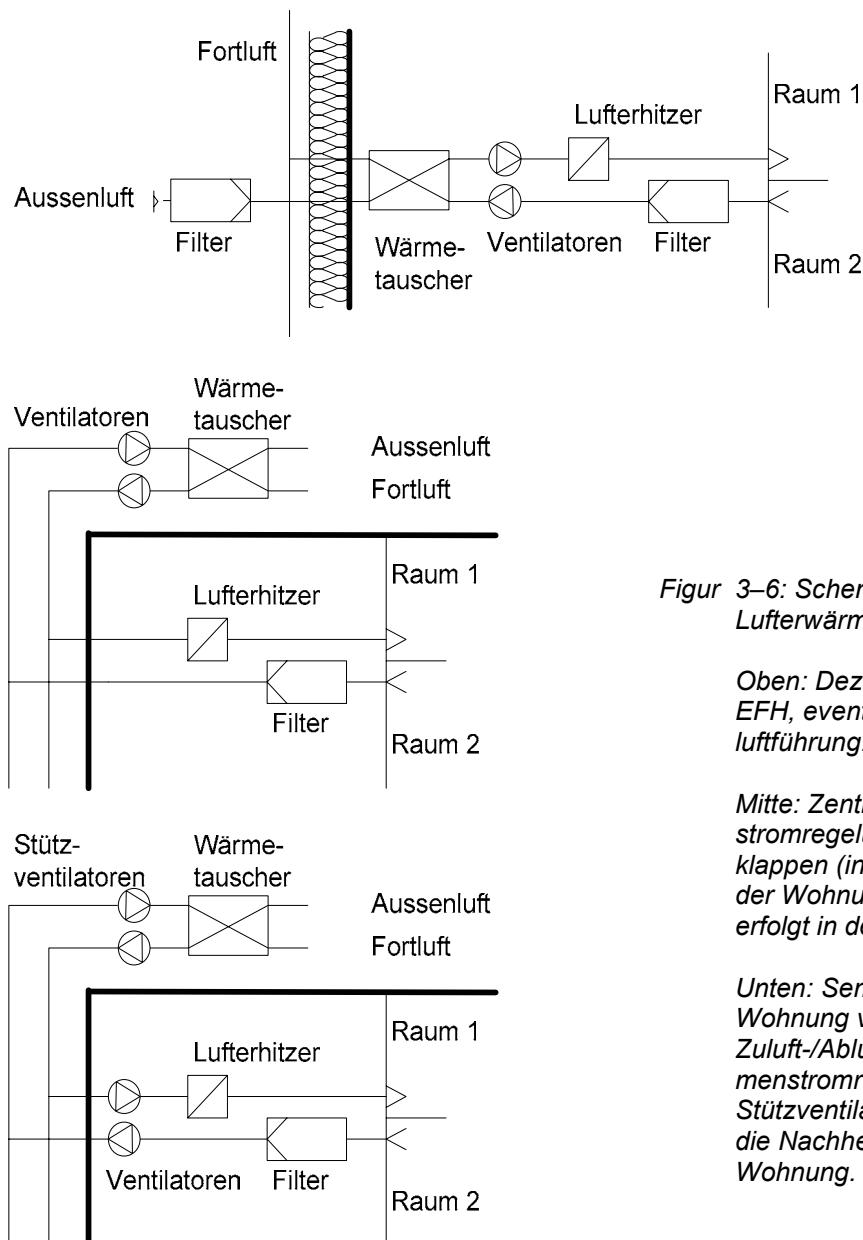
Bei nicht mehr als zwei miteinander verbundenen Geschossen sind die durch den Stackdruck verursachten Infiltrationsraten auch bei tiefen Aussen-temperaturen recht gering. Die Windgeschwindigkeit hat einen stärkeren Einfluss, allerdings treten Windgeschwindigkeiten von 5 m/s und mehr in der Schweiz sehr selten auf, und meist auch nicht über einen längeren Zeitraum.

Da der Stackdruck mit der Höhe ansteigt, empfiehlt es sich, Wohnungen in einem mehrgeschossigen Mehrfamilienhaus luftdicht vom Treppenhaus abzutrennen. Die Wohnungstüren sollten dementsprechend ausgeführt werden.

Für die Lüftungsanlage mit Lufterwärmung bedeutet die Unabhängigkeit von mechanischen Luftraten und Infiltrations-/Exfiltrationsraten, dass sich Wärmerückgewinnung und verfügbare Heizleistung durch veränderte Infiltrations-/Exfiltrationsraten nicht ändern. Höhere Infiltrationsraten vergrössern jedoch den Heizleistungsbedarf, da die eingedrungene Aussenluft erwärmt werden muss, beeinträchtigen eventuell die gleichmässige Temperaturverteilung, und können Bauschäden verursachen. Wenn der Heizleistungsbedarf aufgrund (unvorhergesehener) höherer Infiltration die maximal verfügbare Heizleistung übersteigt, ist dies aber auch nur kritisch, wenn es sich um eine Extrem situation handelt, die zudem über mehrere Tage anhalten müsste. Aufgrund der geringen Wärmeverluste eines Passivhauses dauert es relativ lange, bis eine merkliche Auskühlung auftritt.

Eine Disbalance in den Zu- und Abluftarten verschiebt das Druckniveau in den Räumen, und damit stellen sich die Infiltrations- und Exfiltrationsraten so ein, dass sie sich gerade um die Differenz der Zu- und Abluftrate unterscheiden. In jedem Fall vergrössert sich damit der Heizleistungsbedarf. Im Fall überwiegender Exfiltration kann weniger Wärme zurück gewonnen werden. Bei grösserer Infiltration muss die zusätzlich eindringende Aussenluft erwärmt werden. Im schlechtesten Fall, wenn die Zuluftrate kleiner als geplant ist, steht gleichzeitig weniger Heizleistung zur Verfügung. Lüftungsverluste im Zusammenhang mit der Massenstrombalance werden in [Werner] diskutiert.

Zusätzliche Disbalancen können auch bei volumenstromgeregelten Ventilatoren auftreten, wenn die geförderten Luftströme unterschiedliche Temperatur haben. Bei einem Temperaturunterschied von wenigen Kelvin ist die Disbalance allerdings gering und tolerierbar (Änderung des Massenstroms um 3 bis 4% bei +/-10 K). Diese addieren sich gegebenenfalls mit Disbalancen aufgrund nicht optimaler Einstellung.



Figur 3-6: Schema Lüftungsanlage mit Luftherwärmung MFH

Oben: Dezentrale Anlage analog EFH, eventuell gemeinsame Fortluftführung.

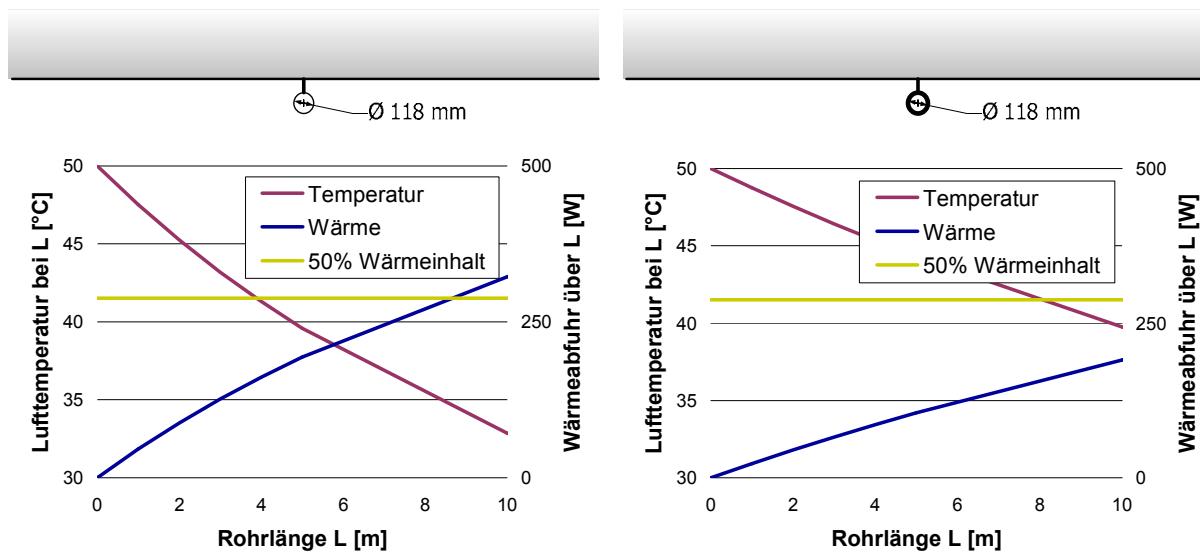
Mitte: Zentrale Anlage, die Volumenstromregelung erfolgt über Drosselklappen (innerhalb oder außerhalb der Wohnung), die Nachheizung erfolgt in der Wohnung.

Unten: Semizentrale Anlage, jede Wohnung verfügt über ein Paar von Zuluft-/Abluft-Ventilatoren zur Volumenstromregelung, zentral können Stützventilatoren eingesetzt werden, die Nachheizung erfolgt in der Wohnung.

3.2. Lüftungssystem im Gebäude

Die Art der Lüftungsanlage und die Luftführung in Gebäuden mit mehr als einer Wohneinheit hängen stark von der Gebäudegeometrie und der erwarteten Nutzung ab. Wichtig ist, dass Temperatur und Luftmenge individuell pro Wohnung einstellbar sind.

In Figur 3-2 wurde bereits die dezentrale Anlage gezeigt, die in der Regel in Einfamilienhäusern, aber auch in den einzelnen Einheiten einer Reihenhausiedlung zum Einsatz kommt. In Figur 3-6 oben ist nochmals dieses Anlagenprinzip gezeigt, diesmal aber als Variante für ein Mehrfamilienhaus. Erdwärmetauscher sind bei dieser Variante nicht möglich, oder zumindest sehr aufwendig. Da in Mehrfamilienhäusern mit vielen dezentralen Anlagen vermieden werden muss, dass die Fortluft einer Einheit in die Außenluft einer anderen Einheit gerät, empfiehlt es sich, einen gemeinsamen Fortluftkanal über Dach zu führen. Es sind in jedem Fall die geltenden Vorschriften zu beachten.



Figur 3-7: Temperaturabnahme längs des Kanals und Wärmeabgabe an die Raumluft über die Rohrwand eines Zuluftkanals mit Innendurchmesser 118 mm; Zuluft mit 60 m³/h und 50°C am Anfang des Kanals. Die waagrechte Linie markiert 50% der möglichen Wärmeabgabe des genannten Zuluftstroms in einem Raum mit 20°C.
Links: (PVC-)Rohr ohne Dämmung, rechts mit 1cm Dämmung der WLG 04.
Oben: Einbausituation.

In Figur 3-6 unten ist links eine zentrale und rechts eine semizentrale Lösung skizziert. Bei den höheren Volumenströmen der zentralen Variante können hochwertige Geräte aus der Klimatechnik eingesetzt werden. Die wesentlichen Anlagenteile sind erreichbar, ohne die Wohneinheiten zu betreten. Die Nachheizung erfolgt aber auch hier dezentral in den Wohnungen.

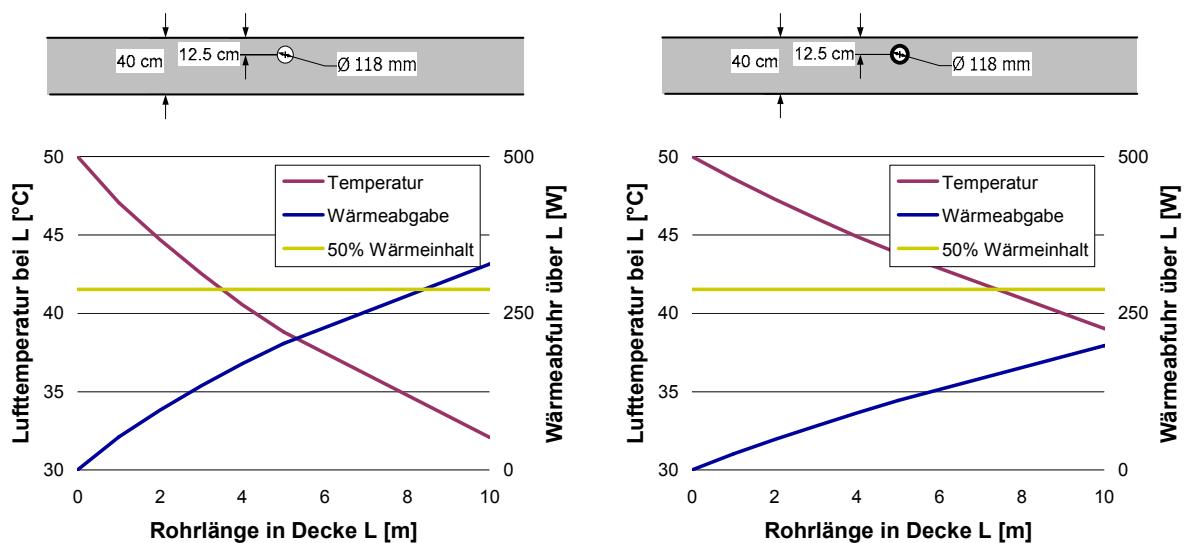
Die wohnungsweise Volumenstromeinstellung erfolgt über Klappen. Die semizentrale Variante setzt neben der wohnungsweisen Nachheizung auch dezentrale Ventilatoren für die wohnungsweise Volumenstromregelung ein. Diese Ventilatoren können eventuell durch zentral angeordnete Stützventilatoren ergänzt werden, die die Druckverluste in den zentralen Anlagenteilen kompensieren.

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten werden in [CEPHEUS] ausführlich diskutiert. Die semizentrale Variante ist bezüglich Energieeffizienz und Wartungsanfälligkeit im Mehrfamilienhaus die vorteilhafteste. Der Aufwand für Schallschutz ist dagegen etwas höher als bei den anderen Varianten.

Das Lüftungszentralgerät sollte in jedem Fall möglichst nahe am Durchtritt der Luftkanäle durch die thermische Hülle stehen. Ob innerhalb oder außerhalb ist dagegen nicht entscheidend.

3.3. Wärmeabgabe im Kanal

Gedämmt werden müssen bei reinen Lüftungsanlagen (mit guter WRG) lediglich Zuluftkanäle, die nach dem Wärmetauscher noch durch ungeheizte Bereiche führen, bzw. Fortluftkanäle, die durch geheizte Bereiche führen. Im beheizten Bereich eines Gebäudes gibt es nur relativ kleine Wärmeströme zwischen dem Zuluftkanalnetz und seiner Umgebung. Die Zulufttemperatur bei Eintritt in den Raum wird dadurch nicht wesentlich geändert.



Figur 3–8: Temperaturabnahme längs des in die Decke eingebauten Kanals und Wärmeabgabe über die Decke an die angrenzenden Räume über die Rohrwand.
 Links: ohne Dämmung, rechts mit 1 cm Dämmung der WLG 04.
 Zuluftkanal mit Innendurchmesser 118 mm; Zuluft mit $60 \text{ m}^3/\text{h}$ und 50°C am Anfang des Kanals in der Decke. Die waagrechte Linie markiert 50% der möglichen Wärmeabgabe des genannten Zuluftstroms in Räume mit jeweils 20°C .
 Oben: Einbausituation.

Im Unterschied dazu treten bei Lüftungen mit Heizungsfunktion zeitweise auch erhebliche Temperaturdifferenzen zwischen der Zuluft im Kanal und der Umgebung auf. Die Wärmeabgabe der Lüftungsanlage mit Luftherwärmung sollte definiert erfolgen. Der Wärmestrom über die Kanalwände an die Umgebung und die Temperaturabnahme zwischen Heizregister und Zuluftdurchlass müssen bei der Auslegung des Lüftungssystems berücksichtigt werden.

Wärmeabgabe von Kanälen an Luft

Die Diagramme in Figur 3-7 zeigen beispielhaft die Temperaturabnahme der Zuluft im Kanal und die Wärmeabgabe an die Umgebung des Kanals in Abhängigkeit von der Länge des Kanals. Das Passivhaus Institut stellt für solche Rechnungen auch das Programm PHLuft10 zum Download bereit [PHLuft]. Die Rechnungen hier wurden nach [Recknagel 2001], Abschnitt 3.3.5-3 durchgeführt und stimmen sehr gut mit den Ergebnissen nach PHLuft10 überein. Den Rechnungen wurde ein Kanal mit Innendurchmesser 118 mm zugrunde gelegt, der von einem Luftstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ durchströmt wird. Die Eingangstemperatur beträgt 50°C .

Figur 3-7 zeigt das Verhalten eines Kanalrohrs, das von Raumluft mit 20°C umgeben ist. Bei einem ungedämmten Rohr ist nach 5 m etwa ein Drittel des Wärmeinhalts der Zuluft über die Kanalwand abgegeben worden (links). Schon 1 cm Dämmung mit WLG 04 genügt bei diesem Beispiel, um die Wärmeabgabe über die Kanalwand auf den ersten 5 m annähernd zu halbieren¹.

¹ Diese Wärmedämmung wäre aber für eine Zuluftleitung im ungeheizten Bereich ungenügend!

Wärmeabgabe von Kanälen in Wänden und Decken

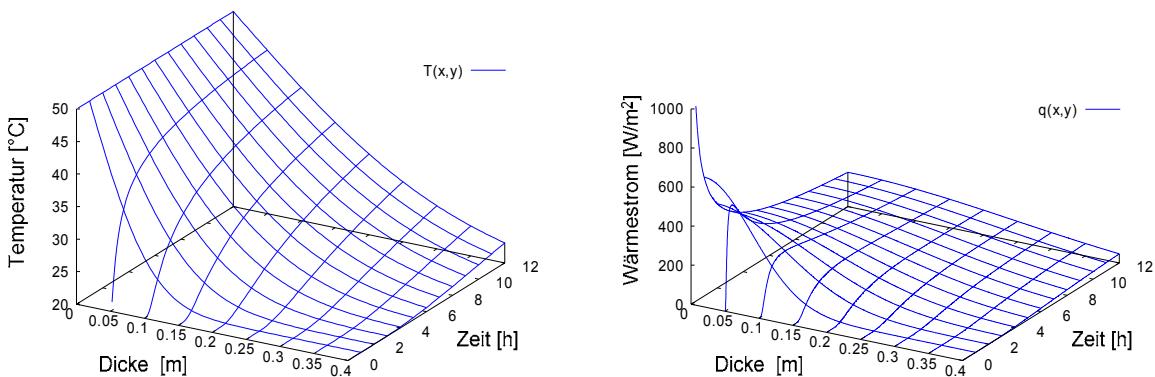
Da übliche Kanalrohre und Wärmedämmungen praktisch keine Wärmespeicherfähigkeit besitzen, stellt sich nach einer Änderung der Zuluft- oder der Umgebungsbedingungen jeweils sehr rasch ein neues Gleichgewicht ein. Verlaufen die Luftkanäle jedoch ganz oder teilweise in Geschossdecken oder in Wänden, so wird die Wärme nicht nur zum Teil über die Kanalwand und das Bauteil an die angrenzenden Räume abgegeben. Vielmehr findet die Wärmeabgabe an die angrenzenden Räume je nach Speicherfähigkeit des Wandaufbaus auch zeitverzögert statt. Das dynamische Verhalten ist in diesem Fall sehr komplex, da viele Parameter beteiligt sind, und das Problem nicht wie sonst bei flächigen Bauteilen üblich auf ein eindimensionales reduziert werden kann. Um trotzdem einige Anhaltspunkte zu gewinnen, wurde nach [Glück] die Wärmeabgabe eines Rohrs in einem einschichtigen Bauteil im stationären Zustand berechnet.

Figur 3-8 zeigt das stationäre Verhalten eines in eine Geschossdecke eingelagten Kanalrohrs, wobei die Temperatur der Raumluft auf beiden Seiten der Geschossdecke 20°C beträgt. Die Decke besteht im Beispiel aus 40 cm Beton, die Rohrachse befindet sich 12.5 cm unter der Oberfläche. Im stationären Zustand spielt die Speicherfähigkeit keine Rolle, und der U-Wert von etwa $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ entspricht bei diesem Aufbau den üblichen Zwischendecken. Aufgetragen ist wiederum der Verlauf der Zulufttemperatur im Rohr, sowie die gesamte Wärmeabgabe an beide angrenzende Räume. Im gewählten Beispiel werden der Temperaturverlauf und die Wärmeabgabe im stationären Zustand durch die zusätzliche "Dämmschicht" Decke nur wenig geändert, da sich gleichzeitig die Oberfläche vergrößert. Damit unterscheidet sich die mittlere Wärmeabgabe eines in eine solche Decke eingelagten Kanals über einen längeren Zeitraum nicht stark von der eines gleichartigen von Luft umgebenen Kanals.

Instationäre Wärmeabgabe

Allerdings werden die Verhältnisse bei einer Änderung der Zulufttemperatur sehr unterschiedlich sein. Im Extremfall steigt die Zulufttemperatur nach dem Heizregister z.B. von 20°C (Heizung aus) auf 50°C (maximale Heizleistung). War der Zustand bei 20°C annähernd stationär, dann wird zunächst sehr viel Wärme vom Bauteil aufgenommen. Damit wird die Zuluft stärker abgekühlt als im stationären Fall bei Zulufttemperatur 50°C, und die Zulufttemperatur am Lufteinlass steigt nur langsam an. Die Wärmeabgabe über das Bauteil an die Luft ändert sich zunächst nicht, und steigt dann langsam an. Daselbe gilt analog für den Fall, dass die Nachheizung abgeschaltet oder reduziert wird. Damit reagieren sowohl das Bauteil als auch die Luft "träge" auf sich ändernde Heizlasten.

Zur Veranschaulichung zeigt Figur 3-9 den Fall für eine halbunendliche Wand. Der Temperaturverlauf und der Wärmestrom nähern sich erst nach einigen Stunden, entsprechend der Temperaturleitfähigkeit des Materials, den stationären Werten an.



Figur 3–9: Temperaturverlauf (links) in einer halbunendlichen Wand (mit Materialwerten von Beton) und zugehörige Wärmeströme (rechts) nach einer sprunghaften Änderung der Grenzflächentemperatur von 20°C auf 50°C bei der Dicke 0 m zur Zeit 0 h.

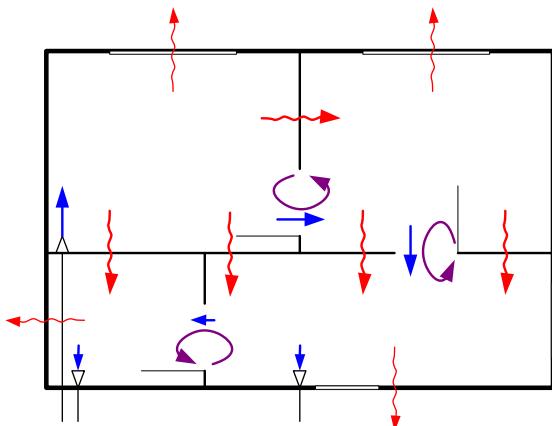
Die Dämmung der Zuluftkanäle bestimmt die Aufteilung der Wärmeabgabe über die Kanalwand und den Zuluftdurchlass, sie bestimmt aber auch, wie stark in Decken oder Wände eingelegte Zuluftkanäle an die Gebäudemasse ankoppeln, und bestimmt damit die "Trägheit" des Luftheizsystems mit. Die Verlegetiefe, respektive der partielle U-Wert, bestimmt die Aufteilung des Wärmestroms vom Kanal in das Bauteil auf die beiden Seiten des Bauteils.

Gezielte Dämmung

Es ist nicht notwendig, innerhalb des beheizten Bereichs die Zuluftkanäle überall zu dämmen. Da Passivhäuser nach aussen sehr gut gedämmten sind, werden unterschiedliche Temperaturen innerhalb einer Wohnung oder eines Hauses durch interne Wärmeströme relativ gering gehalten. Damit spielen Ort und Zeit der Einbringung der notwendigen Heizwärme eine geringere Rolle als bei konventionellen Bauten (siehe folgenden Abschnitt). Aber die Effekte geringerer Dämmung dürfen bei der Auslegung des Kanalsystems und gegebenenfalls auch bei der Heizungsregelung nicht völlig ausser Acht gelassen werden. Darüber hinaus kann eine geringere oder keine Dämmung auch eingesetzt werden, um zusätzlich Wärme in bestimmte Räume einzubringen, ohne die Luftmengen dort zu erhöhen, oder überhaupt einen Zuluftdurchlass vorzusehen. So kann z.B. mit einem ungedämmten Stück Zuluftkanal die Temperatur im Bad angehoben werden. Gleichzeitig kann die Wärmezufuhr in einem anderen Raum, z.B. dem Schlafzimmer, gesenkt werden, ohne die Luftmengen zu vermindern.

Auch führt der teilweise Wärmeaustausch über Kanalwände durch Reduktion der Schwankungen der Zulufttemperatur am Zuluftdurchlass zusätzlich zu einem grösseren Komfort im Nahbereich des Durchlasses.

Wenn wenig gedämmte Zuluftkanäle in Geschoßdecken oder Wänden eingelegt werden, um in einem gewissen Mass die Speichermasse des Gebäudes zu nutzen, dann sollten die NutzerInnen darauf aufmerksam gemacht werden, dass die Zulufttemperatur wesentlich langsamer reagiert, als von einer Lüftungsanlage mit Lufterwärmung zu erwarten.



Figur 3–10: Wärmeströme in einer Wohnung. Neben dem gezielten Transport von Wärme über die Kaskadenlüftung → wird Wärme in ähnlicher Größenordnung auch über Transmission über die Innenwände → ausgetauscht. Bei geöffneten Zimmertüren kann der Wärmetransport über Konvektion ↗ die anderen beiden Wärmeströme um ein Vielfaches übertreffen.

Tabelle 3–1 Vergleich der Wärmeströme durch Transmission, Infiltration, mechanische Lüftung und Konvektion durch offene Türen.

Die spezifischen Leistungen bei der Transmission entsprechen typischen U-Werten. Für Infiltration und mechanische Lüftung wurde die Wärmekapazität von Luft zugrunde gelegt. Die Konvektion ist von der Öffnungsgeometrie abhängig. Der angegebene Wert wurde für eine typische Tür mit [COMIS] abgeschätzt.

Die Temperaturdifferenzen beziehen sich auf die Raumluft bzw. die Außenluft.

Transportweg	Leistung spezifisch	pro Element	Annahmen für das Element	
			Temperaturdifferenz	Grösse
Transmission				
→ Innenwand	1.5 W/m _W ² /K	15 W	Δθ = 1 K	Wand- bzw. Fensterfläche $A_W = 10 \text{ m}_W^2$
→ Außenwand	0.1 W/m _W ² /K	30 W	Δθ = 30 K ($\vartheta_a = -10^\circ\text{C}$)	$A_W = 10 \text{ m}_W^2$
→ Fenster	0.8 W/m _F ² /K	30 W	Δθ = 30 K	$A_F = 1.25 \text{ m}_F^2$
Infiltration				Massenstrom
Infiltration	0.33 W/(kg/h)/K	30 W	Δθ = 30 K ($\vartheta_a = -10^\circ\text{C}$)	$\dot{m} = 3 \text{ kg/h}$
Exfiltration	0.33 W/(kg/h)/K	1 W	Δθ = 1 K (Nachströmen aus Nachbarraum)	$\dot{m} = 3 \text{ kg/h}$
Lüftungsanlage				Massenstrom
→ Zuluftdurchlass	0.33 W/(kg/h)/K	300 W	Δθ = 30 K ($\vartheta_{zu} = 50^\circ\text{C}$)	$\dot{m} = 30 \text{ kg/h}$
→ Überströmöffnung	0.33 W/(kg/h)/K	10 W	Δθ = 1 K	$\dot{m} = 30 \text{ kg/h}$
Konvektion				Öffnungsfläche
↗ offene Tür	75 W/m _O ² /K	150 W	Δθ = 1 K	$A_O = (1x2) \text{ m}_O^2$

Bei Verlauf des Zuluftkanals in einer Geschossdecke oder einer Wand ist auch zu bedenken, dass sich der Wärmestrom über das Bauteil immer auf zwei Seiten aufteilt. Dies ist nicht nur bei Aussenbauteilen oder Kellerdecken problematisch. Vielmehr ist zu beachten, dass, wenn das betreffende Bauteil zwei Nachbarwohnungen trennt, ein Teil der Wärme in die "falsche" Wohnung gelangt, und Temperaturunterschiede zwischen Wohnungen weniger gut ausgeglichen werden können als innerhalb einer Wohnung.

3.4. Wärmeverteilung in der Wohnung

Die Wärmeverteilung in der Wohnung erfolgt zum einen über die gerichtete Durchströmung der Räume. Daneben findet aber auch immer eine Weiterverteilung der Wärme über Innenwände statt. Der Wärmestrom über eine Wand liegt bei typischen Dimensionen, wie sie in Wohnungen vorkommen, in der gleichen Größenordnung wie derjenige, der mit der gerichteten Durchströmung verbunden ist. Da ein Raum i. A. mehrere Innenwände, aber nur eine Tür (Überströmöffnung) aufweist, überwiegt bei geschlossener Tür in der Regel der Wärmetransport über die Wände. Bei offenen Zimmertüren kann Wärme zusätzlich über Konvektion transportiert werden. Dieser Strom kann eine Größenordnung grösser sein als die beiden erstgenannten. Die Wärmeströme sind in Figur 3-10 für einen einfachen Grundriss skizziert. Typische Werte sind in Tabelle 3-1 aufgelistet.

Ein Raum von ca. 15 m^2 , mit zwei Aussenwänden mit Fenster, hat ohne interne oder solare Gewinne im Extremfall bei einer Aussentemperatur von -10°C einen Wärmebedarf von 150 W zur Kompensation von Transmission und Infiltration. Werden mit der Zuluft 300 W zugeführt, dann müssen 150 W an angrenzende Räume weitergegeben werden. Je nachdem wie warm die anderen Räume sind, d.h., über wie viele Wände die Wärme abgegeben werden kann, wird diese Wärme bei geschlossener Tür bei einer Temperaturdifferenz von 2 ... 4 K an die benachbarten Räumen abgegeben. Bei geöffneter Tür ist eine Differenz von weniger als 1 K notwendig. Bei höheren Aussentemperaturen und entsprechend geringeren Heizleistungen verringern sich auch die notwendigen Temperaturdifferenzen.

3.5. Temperaturzonierung

Wie gezeigt verteilt sich die Wärme in einem Gebäude nach Passivhausstandard durch Transmission über Innenwände und Konvektion über offene Zimmertüren sehr gleichmässig. Temperaturdifferenzen von mehr als 3 K treten durch die Heizung mit Kaskadenlüftung kaum auf. Grössere Temperaturdifferenzen können höchstens kurzfristig durch solare Gewinne oder grosse interne Wärmequellen verursacht werden.

Dies bedeutet auf der anderen Seite auch, dass besondere Massnahmen getroffen werden müssen, wenn bestimmte Räume wärmer oder kühler als andere gehalten werden sollen.

Oft werden z.B. im Bad etwas höhere Temperaturen gewünscht als in der übrigen Wohnung. Hier bieten sich folgende Möglichkeiten:

- Eine Zuluftleitung, vorzugsweise eine Zuleitung zu Räumen mit geringerem Wärmebedarf (Schlafzimmer) wird ungedämmt durch einen anderen Raum, z.B. das Badzimmer, geführt
- Der (trotzdem gut gedämmte!) Warmwasserspeicher wird im Badzimmer integriert, um die Wärmeverluste direkt zu nutzen
- Ein kleiner Radiator oder Handtuchheizkörper wird über eine Warmwasserzirkulationsleitung mit Wärme versorgt
- Ein kleiner Infrarotstrahler wird im Bad angebracht
- Das Badzimmer wird so angeordnet, dass es keine Außenwände aufweist (bewirkt allein noch keine höheren Temperaturen; die fehlende Möglichkeit der Fensterlüftung ist dagegen abzuwägen)
- Elektrische Zusatzheizung (ist nach Möglichkeit zu vermeiden)

Im Schlafzimmer werden dagegen oft etwas tiefere Temperaturen gewünscht als in der übrigen Wohnung. Hier bieten sich folgende Möglichkeiten:

- Die Zuluftleitung zum Schlafzimmer wird ungedämmt durch einen anderen Raum, z.B. das Badzimmer, geführt.
- Bypass: die Zuluft zum Schlafzimmer wird vor dem Heizregister abgezweigt (wenn sicher ist, welcher Raum als Schlafzimmer benutzt wird).
- Das Fenster nachts im Schlafzimmer gekippt lassen; der Luftwechsel ist (bei den tiefen Fensterläbungen im Passivhaus) oft geringer als befürchtet [Knissel].
- Wenn nicht extrem tiefe Außentemperaturen herrschen, kann nachts die Raumsolltemperatur reduziert werden, und so die Zuluftnachheizung unterbunden werden; damit wird zwar die Schlafzimmertemperatur nicht sofort erniedrigt, aber die Zuluft kommt "kühl" in den Raum.
- Solare Gewinne durch Nordorientierung vermeiden, leichte Überwärmung in Südräumen zulassen.

Es ist auch zu überlegen, ob der gewünschte Schlafkomfort nicht durch Verzicht auf warme Winterbetten erreicht werden kann.

Trocknung

Die hygienischen Luftraten reichen normalerweise auch aus, um Feuchte von Wäschetrocknung abzuführen. Wird die Wäsche zum Trocknen in den Ablufräumen aufgehängt, dann wird die Feuchte direkt am Entstehungsort aus der Wohnung abgeführt. Die Wäsche trocknet schnell und die Luftfeuchte in der Wohnung wird nur wenig beeinflusst werden.

Eine Alternative bieten Abluft-Trockenschränke, die an die Abluftleitung geschlossen werden und aufgrund ihres im Vergleich zu einem Raum kleineren Volumens einen höheren Luftwechsel und damit eine schnellere Trocknung zulassen. In [Feist 1999a] wurde ein solches Gerät in einem Passivhaus untersucht.

3.6. Regelung und Einstellmöglichkeiten

Die Lüftungsanlage mit Lufterwärmung in einem Passivhaus hat primär die Funktion Lüftung zu erfüllen. Die Luftmenge und die Solltemperatur müssen daher beide unabhängig voneinander gewählt werden können. Die Luftmenge muss auch in Mehrfamilienhäusern individuell pro Wohnung eingestellt werden können. Aber auch die gewünschte Raumtemperatur muss in der Regel wohnungsweise individuell wählbar sein.

Die Lüftung sollte mindestens folgende Stufen aufweisen: Aus, Grundlüftung (70-80%), Normal (100%), Bedarf (130%)². Die höchste Stufe sollte dabei nach einer (einstellbaren) Zeit automatisch in die Normalstellung zurückschalten [PHI 99/7] S.19.

Damit Luftmenge und Solltemperatur unabhängig gewählt werden können, muss die Regelung der Wärmezufuhr über die Zulufttemperatur, und nicht über die Luftmenge, erfolgen. Ein Raumtemperaturfühler, der zentral im Überströmbereich in der Wohnung angebracht ist, zusammen mit einem Solltemperatur-Geber steuert die Heizungsfunktion, d.h. die erforderliche Zulufttemperatur. Der Fühler sollte nicht in der Abluft platziert werden, da die Ablufttemperatur nur so lange repräsentativ für den tatsächlichen Heizleistungsbedarf ist, als die Ablufräume nicht viel wärmer oder kälter als die restliche Wohnung sind.

Werden Zuluftkanäle wenig gedämmt in Decken, Böden oder Wänden verlegt, so besitzt die Lüftungsanlage mit Lufterwärmung unter Umständen eine grosse Trägheit, die in der Regelung berücksichtigt werden sollte.

Es ist zu beachten, dass bei sehr tiefen Außentemperaturen die Grundlüftungsstufe wegen der Begrenzung der Zulufttemperatur eventuell nicht ausreicht, um die benötigte Wärmemenge in die Wohnung einzubringen. Bei längerer Abwesenheit im Winter sollte die Lüftungsstufe Normal beibehalten werden, wenn keine Möglichkeit besteht, die Wohnung schnell wieder aufzuheizen (z.B. mit einem Ofen).

Die Schalttafel der Lüftung und Heizung muss einfach und übersichtlich gehalten werden. Neben den Wahlschaltern für Lüftungsstufe und Raumtemperatur sollten eine Filterwechselanzeige und gegebenenfalls ein Umschalter zwischen "Sommer-" und "Winterbetrieb" auf einer Schalttafel vorhanden sein.

² Angegeben sind % des Nennmassenstroms

4. Raumluftströmung

4.1. Verteilung von Wärme und Zuluft im Raum

Das eingangs Kapitel 3 für die Luftführung durch die Wohnung aufgeführten Anforderungen gelten auch für jeden einzelnen Raum: die Luftführung soll so gewählt werden, dass in die Bereiche, in denen sich Personen aufhalten, möglichst unverbrauchte Luft eingebracht wird, und dass belastete Luft möglichst effektiv und auf kürzestem Weg abgeführt wird. Ideal wäre also bezüglich der Luftqualität eine Kolbenströmung auch im Raum. Dazu kommt, dass in den einzelnen Räumen auch die thermischen Komfortanforderungen eingehalten werden müssen. Dass die mittleren Raumluft- und Oberflächentemperaturen im komfortablen Bereich liegen, und dass keine unkomfortablen Strahlungsasymmetrien vorliegen, wird im Folgenden vorausgesetzt. Näher behandelt werden die Aspekte Zugluftrisiko, Luftaustauschwirkungsgrad und (vertikale) Temperaturgradienten.

Zulufttemperatur

Figur 2-4 zeigt, dass die Temperaturdifferenzen zwischen Zuluft und Raumluft zwischen den Extremwerten -8 K und $+20\text{ K}$ relativ gleichmäßig verteilt sind. Es gibt in der Heizperiode keine vorherrschenden Zuluftbedingungen. Zudem treten nicht nur grosse Übertemperaturen, sondern auch relativ grosse Untertemperaturen auf, sofern eine leichte Überhitzung des Wohnbereichs zur Ausnutzung der solaren Gewinne zugelassen wird. Der genannte Bereich der Temperaturdifferenzen ist das Maximum dessen, was in der Praxis zu erwarten ist.

Die grössten Untertemperaturen treten an kalten, sonnigen Tagen auf. Dann wird aufgrund der solaren Gewinne gar keine Heizwärme benötigt. Die Zuluft gelangt etwa mit WRG-Temperatur in einen eher überdurchschnittlich warmen Raum. Die maximale Heizleistung und damit die maximale Übertemperatur ist an trüben, mässig kalten Tagen notwendig, um die normale Raumtemperatur zu halten, siehe Figur 2-3.

Einfluss der Zuluft auf die Raumströmung

Besteht eine Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluft, so erfährt die Zuluft je nach Vorzeichen eine Auf- oder Abtriebskraft, die die resultierende Strömungsform im Raum stark beeinflussen kann. Die Höhe, in der die Zuluft zugeführt wird, und das Vorzeichen der Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluft bestimmen zudem, ob die Ausbildung bzw. Erhaltung eines vertikalen Temperaturgradienten im Raum gefördert oder behindert wird.

Treibende Kräfte für die Verteilung der Frischluft und gegebenenfalls der Wärme sind neben den Temperaturdifferenzen zwischen Zuluft und Raumluft der Impuls des zugeführten Luftstroms, sowie die im Raum vorherrschenden konvektiven Strömungen, die durch Wärmeaustausch mit warmen (bzw. kalten) Oberflächen in Gang gehalten werden.

Der Impuls der Zuluft bewirkt die Ausbildung eines Strahls oder Jets. Im Vergleich zu den Luftgeschwindigkeiten im Jet kann die Raumluft als ruhend angenommen werden. Zwischen Jet und umgebender Raumluft wirken viskose Kräfte. Umgebungsluft wird beschleunigt und in den Jet gerissen, dieser wird abgebremst. Ein hoher Impuls bewirkt einerseits ein tiefes Eindringen der Zuluft in den Raum, und zugleich eine intensive Vermischung der Zuluft mit einem Teil der Raumluft. Wird die Zuluft genügend nahe parallel zu einer Grenzfläche eingebracht, kommt der Coanda-Effekt zum Tragen: zwischen dem Jet und der Grenzfläche baut sich ein Unterdruck auf, der den Jet in Richtung Grenzfläche ablenkt. Der Jet legt sich an die Grenzfläche an. Dadurch kann z.B. die Ablenkung eines Jets mit Untertemperatur in den Aufenthaltsbereich verzögert werden.

Einfluss von Wand- und Fensterflächen, sowie Personen

Da die Oberflächentemperaturen von Außenwänden in Passivhäusern sehr nahe an der Raumlufttemperatur liegen, und auch die Innenoberflächen der Fenster nicht sehr kalt sind (siehe Tabelle 4-1), verursachen diese keine starken konvektiven Strömungen. Ausnahmen bestehen, wenn die Fenster sehr hoch sind.

Konvektive Strömungen, die durch Wärmeaustausch der Luft mit warmen Oberflächen im Raum angetrieben werden, können erhebliche Volumenströme hervorrufen. Eine Person bewirkt einen Auftriebsvolumenstrom in der Größenordnung von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ gemäß einer Abschätzung nach [Recknagel 2001], Abschnitt 3.6.8-1. [REHVA] und [ERL7] geben ähnliche Werte an. Damit werden – bei den für Passivhäuser typischen Luftraten – in belegten Räumen die Strömungsverhältnisse immer durch die anwesenden Personen und gegebenenfalls die Wärmeabgabe der benutzten Geräte wesentlich beeinflusst. Dies gilt schon in der Zuluftzone, und gilt erst recht in der Überströmzone, wo die zugeführte Luft in der Regel langsam über einen (relativ) grossen Querschnitt annähernd mit Raumlufttemperatur einströmt.

4.2. Durchlässe

Zuluftdurchlässe (ZLD) schliessen den Zuluftkanal gegen den Raum ab und lenken die Zuluft in den Raum. Sie sollen einen möglichst niedrigen Schallpegel und eine hohe Einfügungsdämpfung aufweisen. Das Spektrum der verwendeten ZLD ist sehr breit. Abbildung 4-1 zeigt typische Beispiele.

Zum Einsatz kommen einerseits hoch-induzierende Durchlässe (Weitwurfdüsen). Diese werden vornehmlich an den Innenwänden unterhalb der Decke der Zulufträume platziert (ermöglicht kurze Kanalstrecken). Auch an der Decke montierte radial ausblasende Weitwurfdüsen sind möglich. In der Regel kann die wirksame Querschnittsfläche einer Weitwurfdüse verändert werden, und damit der Volumenstrom durch den Durchlass verändert werden. Einstellbare ZLD erleichtern die Einregulierung der Anlage.

Andererseits werden häufig auch sehr einfache Schlitzdurchlässe bis hin zu simplen Abdeckgittern verwendet. Diese produzieren keinen eigentlichen Jet. Bei einigen Typen besteht das Gitter oder der Schlitz aus verstellbaren Lamellen, mit deren Hilfe die Richtung des in den Raum eintretenden Strahls



Figur 4-1: Zuluftdurchlässe. Links Weitwurfdüse mit einstellbarer Schlitzbreite. Mitte: Abdeckgitter. Rechts: Bodenauslass

beeinflusst werden kann. Gitter- oder Schlitzdurchlässe finden sich sowohl in Wänden (Innenwände unterhalb der Decke) als auch in Böden (in der Nähe der Außenwand) bzw. in Decken (mittig im Raum oder in der Nähe der Außenwand).

Der Einbau des ZLD an einer Innenwand spart Lüftungskanäle. Insbesondere wenn der ZLD über der Tür angebracht ist, wird jedoch mit Hinweis auf die Gefahr von Kurzschlussströmungen oft eine Weitwurfdüse eingesetzt.

Überströmöffnungen stellen die strömungstechnische Verbindung von einem Raum zu einem anderen her, auch wenn die Zimmertür geschlossen ist. Auch sie sollen einen geringen Druckverlust aufweisen und gleichzeitig die akustische Trennung der Räume nicht verschlechtern. Im einfachsten Fall genügt ein Türspalt von etwa 1 cm Höhe, siehe [ENABL], [Werner]. Im Rahmen des AKKP wurde eine einfache Methode entwickelt, die Überströmöffnung in die Türzarge zu integrieren. Diese Konstruktion weist bessere akustische Eigenschaften auf als der Türspalt [Werner].

Abluftdurchlässe sollten einstellbar sein, und ebenfalls gute akustische Eigenschaften aufweisen. Überströmöffnungen und Abluftdurchlässe haben nur einen geringen Einfluss auf die Raumströmung, und werden deshalb hier nicht weiter untersucht.

4.3. Strömungsfeld

Wie eingangs dieses Kapitels diskutiert, bewegen sich die Zulufttemperaturen einer Lüftungsanlage mit Lufterwärmung unter den typischen Bedingungen in einem Passivhaus in einem weiten Bereich. Damit verbunden herrschen je nach Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluft jeweils andere Strömungsverhältnisse. Da auch alle Zustände zwischen den Extrema mit ähnlicher Häufigkeit vorkommen, ist eine optimale Anordnung der Durchlässe bezüglich Komfort und Luftaustauschwirkungsgrad bei Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung in Passivhäusern nicht sofort ersichtlich.

Untersuchungen zur Raumluftströmung

Die Messung wie auch die Simulation von Raumluftströmungen sind aufwendig. Dazu kommt, dass die genaue Strömungsform (in der Realität) von einer Vielzahl nicht genau bekannter und/oder variabler Randbedingungen abhängt. Daher gibt es bisher wenige detaillierte Untersuchungen zur Raumluftströmung in Passivhäusern.

[Schwarz] hat CFD-Rechnungen für einen Modellraum durchgeführt und verschiedene Einbauvarianten eines ZLD im Heizfall (Zulufttemperatur 40°C) verglichen. Die Abmessungen des Modellraums waren 4.0 x 5.0 x 2.8 m³, mit einem Fenster von 3.2 m² in der einen Schmalseite und einer Tür (Türspalt als Überströmöffnung) in der anderen. Der ZLD war 20 cm unterhalb der Decke angebracht. Verglichen werden eine Weitwurfdüse in der Fensterwand, eine Weitwurfdüse in der Innenwand mit Tür, eine Düse mit Prallplatte in der Fensterwand (Ausströmung nach oben und unten), sowie eine Weitwurfdüse über einem Heizkörper an der Innenwand. Es liegen keine Angaben über thermische Lasten im Raum (Personen, Geräte) vor.

In [CEPHEUS] und [Amrein] sind Messungen in einem Haus der Passivhaus-Reihensiedlung "Wegere" in Nebikon und ergänzende CFD-Simulationen beschrieben. Im betrachteten Wohnraum befindet sich ein rechteckiger ZLD mit verstellbaren Lamellen etwa 55 cm unterhalb der Decke an der dem Fenster gegenüberliegenden Wand. Untersucht wurden Situationen, bei denen die Zulufttemperatur etwa der Raumlufttemperatur (21°C) entsprach, bzw. im Heizbetrieb mit mittlerer Heizleistung (Zulufttemperatur ca. 30°C). Bei den Untersuchungen zum thermischen Komfort wurden Einflüsse durch Solarstrahlung und interne Wärmequellen bewusst ausgeschaltet.

Bei den oben erwähnten Untersuchungen fanden sich bezüglich thermischem Komfort und Luftaustauschwirkungsgrad keine kritischen Fälle. Diese Ergebnisse wurden unter reproduzierbaren Bedingungen und mit interner Wärmequelle in der Luftströmkammer (LSK) der EMPA überprüft und um Aussagen zum Fall Lüftung mit minimaler Zulufttemperatur ergänzt.

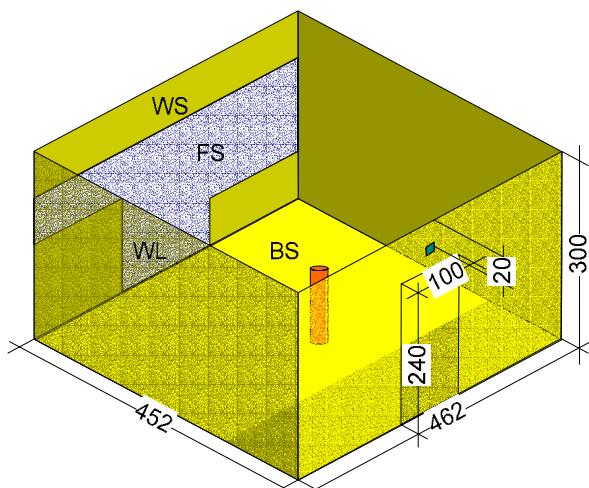
Punktuelle Messungen an einem Bodenauslass konnten im Rahmen des P+D-Projekts *Passiv-Acht-Familienhaus, Im Wechselacher, Stans* [Bossard] durchgeführt werden. Der Wohnbereich wird dort über zwei Bodenauslässe mit Frischluft versorgt. Die Auslässe befinden sich nahe der Außenwand, vor den raumhohen Terrassenfenstern.

Die Ergebnisse der verschiedenen Messungen und Rechnungen werden zusammen mit den Resultaten der Messungen in der Luftströmkammer vorgestellt und diskutiert.

Messkonfiguration Luftströmkammer

Die Luftströmkammer wurde mit einer Wand in zwei Bereiche geteilt. Der grössere wurde als Zuluftzone konzipiert, in diesem Bereich wurden die Messungen durchgeführt. Der kleinere diente als Überström- und Abluftzone. Beide wurden mit einer Türöffnung verbunden. Der Zuluftraum (siehe Tabelle 4-1) war ca. 21 m² gross und war 3 m hoch. Die Türhöhe betrug 2.40 m. Die ZLD wurden mittig in der Wand über der Tür eingesetzt mit einem Abstand Mitte ZLD – Decke von 0.20 m. Die Tür konnte offen stehen oder geschlossen sein, mit wahlweise einem Türspalt oben oder unten. Die Abluft verliess den Raum durch die Türöffnung oder den Türspalt und gelangte in den zweiten Bereich der LSK. In diesem wurde die Zuluft gefasst, konditioniert und über den ZLD dem Messraum wieder zugeführt.

Tabelle 4-1 Geometrie Messraum und Randbedingungen. Der Fall "mit maximaler Heizleistung" ist typisch für kalte, trübe Tage oder nachts. "Nur mit WRG" tritt an kalten, klaren Tagen mit hohen solaren Gewinnen auf.



Mit maximaler Heizleistung	Nur mit WRG
Zuluft	
Temperatur	
40°C	16°C
Volumenstrom	
30 m³/h	
Raumluft	
22°C	25°C

Umschliessungsflächen

Bezeichnung	Lage	Temperaturdifferenz zu Raumluft	
WS	Wand Stirnseite	gegen aussen	-0.5 K
FS	Fenster Stirnseite	gegen aussen	-2.5 K
WL	Wand links	gegen aussen	-0.5 K
BS	Boden bei Stirnseite	gegen Keller	-0.5 K
WR	Wand rechts	gegen innen	frei
WT	Wand Tür	gegen innen	frei
BT	Boden bei Türseite	gegen innen	frei
D	Decke	gegen innen	frei

Der Zuluftraum sollte zwei Aussenwände, sowie zwei Wände und die Decke gegen andere Räume aufweisen. Der Boden sollte gegen einen (unbeheizten) Keller orientiert sein. Die Aussenwand gegenüber der Zimmertür sollte eine grössere Fensterfläche aufweisen.

Die durchgeföhrten Messungen sollten die eingangs dieses Kapitels diskutierten Extremfälle abdecken. Die zugehörigen Randbedingungen für Zuluft, für Oberflächentemperaturen und für die Raumluft sind in Tabelle 4-1 aufgelistet. Konditioniert wurden die in der Grafik bezeichneten Wände. Die als gegen andere beheizte Räume liegend definierten Wände wurden nicht konditioniert, aber ihre Oberflächentemperaturen wurden registriert. Diese Oberflächentemperaturen ergaben sich aus dem Wärmeaustausch mit dem umgebenden Labor. Die Temperatur des Labors, in dem die Luftströmkammer aufgestellt ist, ist geregelt. Sie betrug während der ganzen Messzeit zwischen 22°C und 22.5°C.

Ein beheizter Zylinder (128 cm hoch, Durchmesser 20 cm, Wärmeabgabe 80 W) wurde etwa in der Mitte des Messraums aufgestellt. Er simuliert die Anwesenheit einer Person im Raum. Weitere interne Lasten waren nicht vorhanden.

Die Messungen wurden für zwei Typen von ZLD durchgeföhr: eine Weitwurfdüse mit einstellbarer Schlitzhöhe, sowie ein einfaches Abdeckgitter

ohne Einstellmöglichkeiten (siehe Figur 4-1 links und Mitte). Der Durchmesser der Zuluftöffnung hinter dem Durchlass beträgt in beiden Fällen 100 mm.

Strömungsbilder

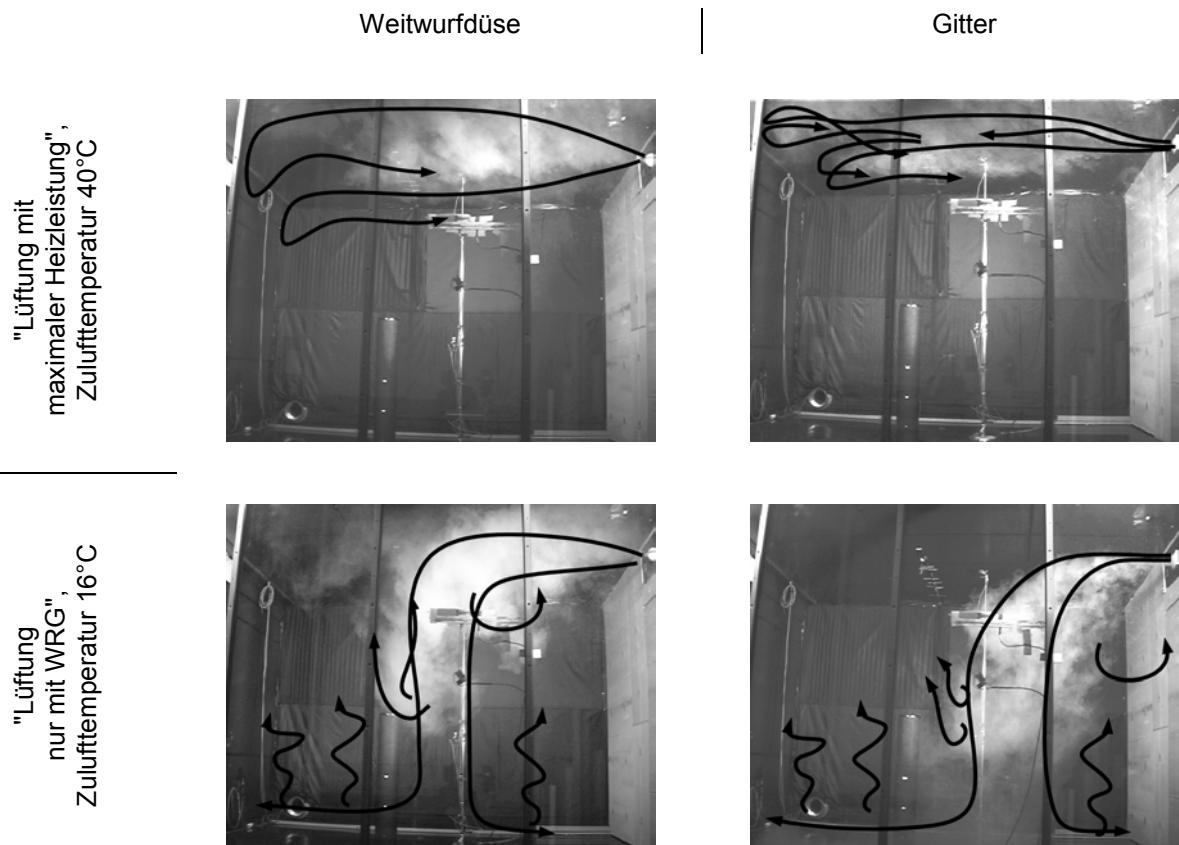
Bei Zulufttemperatur 40°C (Figur 4-2 oben) findet bei beiden ZLD eine gleichmässige Ausbreitung der Zuluft im oberen Raumbereich zwischen Höhe ZLD und Decke statt. Die Luft gelangt direkt unter der Decke bis zur gegenüberliegenden Wand und strömt dann langsam absinkend in etwa in Höhe Oberkante Tür zurück. Die Geschwindigkeiten in dieser Höhe sind auf Seite der "Aussenwand" (zum Aufnahmestandort hin) etwas grösser als auf Seite der Innenwand, und bei der Weitwurfdüse etwas grösser als bei dem Gitter. Der aus dem Gitter austretende Strahl wird durch die Auftriebsströmung um den Zylinder quasi in zwei Strahlen aufgeteilt (oben rechts). Das Strömungsbild der Weitwurfdüse wird dagegen nicht sichtbar beeinflusst, es ist annähernd radial (oben links). Lediglich die "Achse" krümmt sich etwas Richtung "Aussenwand", getrieben durch die etwas stärkere Abkühlung im Vergleich zur gegenüberliegenden "Innenwand".

Bei Zulufttemperatur 16°C (Figur 4-2 unten) strömt die Zuluft durch die Weitwurfdüse (unten links) zunächst in Richtung Decke, fällt dann aber bald ab (bei 1.5 bis 2 m Entfernung vom Durchlass). Die Strömung durch das Gitter (unten rechts) zeigt keine Tendenz zum Anlegen an die Decke, und fällt ab etwa 1.5 m Entfernung vom Durchlass ab. Bedingt durch die radiale Ausbreitung und den grösseren Austrittsimpuls kommt bei der Weitwurfdüse der Coanda-Effekt zum tragen. Bei beiden ZLD breitet sich die Zuluft nach dem Abfall in einer Bodenschicht aus und steigt dann allmählich auf. Gut zu beobachten ist auch die etwas ausgeprägtere Aufwärtsströmung rund um den beheizten Zylinder. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass in der Nähe des "Fensters" (in den Aufnahmen links) die Aufwärtsströmung stärker ist. Die höhere Bodentemperatur dort bildet den Effekt absorbiert Solarstrahlung nach.

Die Strömungsbilder zeigen wie erwartet keinen signifikanten Einfluss der Position der Überströmöffnung (Türspalt unten oder oben, bzw. offene Tür).

Die Strömungsbilder zeigen, dass der thermische Komfort im Fall Zulufttemperatur 40°C unkritisch sein sollte, da die warme Luft sich zunächst im oberen Raumbereich verteilt, bevor sie in den Aufenthaltsbereich gelangt. Kritisch könnte dagegen die Situation im Kaltluftabfall sein, der dementsprechend näher untersucht wurde.

Im Fall Zulufttemperatur 40°C verlässt möglicherweise ein merklicher Anteil der Zuluft den Raum wieder, ohne den eigentlichen Aufenthaltsbereich durchquert zu haben. Dieser Anteil Kurzschlussströmung kann die Raumluftqualität vermindern. Bei Zulufttemperatur 16°C sind weniger Probleme bezüglich Raumluftqualität zu erwarten. Da in jedem Fall die kalte Zuluft relativ schnell nach unten sinkt, und dann in einer Art grossflächiger Quellströmung wieder aufsteigt, findet eine gute Vermischung mit der Raumluft statt.



*Figur 4-2: Strömungsbilder, Aufnahmen links mit Weitwurfdüse, Aufnahmen rechts mit Gitter.
Oben "Lüftung mit maximaler Heizleistung", Zulufttemperatur 40°C;
Unten: "Lüftung nur mit WRG", Zulufttemperatur 16°C.
Alle Aufnahmen jeweils 20 s nach Sichtbarwerden des Rauchs am ZLD.
Zusätzlich eingezeichnet ist das jeweils typische Strömungsmuster (siehe auch Text).*

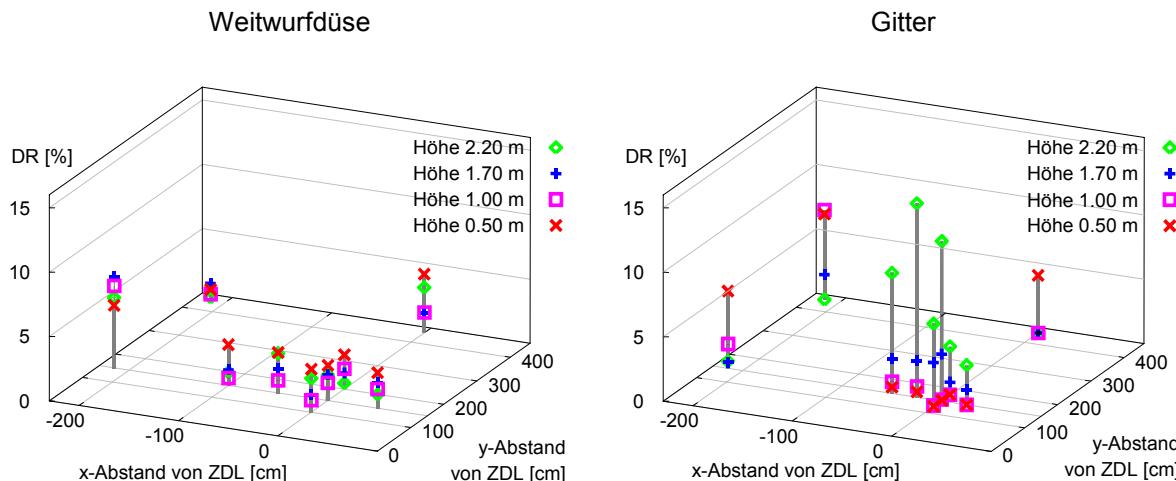
Die CFD-Rechnungen von [Schwarz] wurden für einen Raum ähnlicher Grösse durchgeführt. Den Rechnungen zufolge bildet sich bei Anordnung der Weitwurfdüse an der Aussenwand gegenüber der Überströmöffnung ein Bereich kühlerer Luft am Boden in der Nähe der Aussenwand. Bei der Anordnung von Weitwurfdüse und Überströmöffnung an der gleichen Wand ist demgegenüber die Vermischung der Raumluft besser. Ein Heizkörper an der Innenwand und eine Weitwurfdüse darüber angeordnet bewirken eine stabile Konvektionswalze, und sind damit der kritischste Fall bezüglich thermischem Komfort.

4.4. Zugluftrisiko

Eine Voraussetzung für thermischen Komfort ist die Abwesenheit von Zugerscheinungen. Das Zugluftrisiko (draught risk *DR*) nach [SN EN ISO 7730:1995] beschreibt empirisch den Prozentsatz Unzufriedener,

$$DR = (34 - \vartheta_L)(\bar{v} - 0.05)^{0.62}(0.37 \cdot \bar{v} \cdot Tu + 3.14)$$

in Abhängigkeit von der Lufttemperatur ϑ_L , der mittleren Luftgeschwindigkeit \bar{v} und dem Turbulenzgrad Tu (in %). Als Begrenzung wird eine maximale Quote von 15% empfohlen. Dieses Kriterium wird im Folgenden verwendet.



Figur 4-3: Zuglufttrisiko für Zuluftdurchlässe bei Zulufttemperatur 16°C, links für Weitwurfdüse, rechts für Gitter.

Die x-y-Ebene der Diagramme entspricht einer horizontalen Ebene des Messraums. Die x-Achse bei $y = 0$ entspricht der Wand mit Tür und ZLD. Die Mitte des letzteren befindet sich bei $x = 0$ in 2.60 m Höhe, siehe auch Tabelle 4-1.

Auf der z-Achse der Diagramme ist das Zuglufttrisiko aufgetragen, das bei Position x-y gemessen wurde. Die verschiedenen Höhen, in denen gemessen wurde, werden durch unterschiedliche Symbole charakterisiert

Unterhalb 2 m Höhe treten keine kritischen Werte ($DR = 15\%$ oder mehr) auf. Über 2 m Höhe wird der kritische Wert von 15% nur direkt im Kaltluftabfall des Zuluftstrahls aus dem Gitter gemessen.

Messungen LSK

Für den thermischen Komfort der Anordnung des Zuluftdurchlasses an der Wand unter der Decke, wie in der Luftströmkammer realisiert, ist der kritische Fall die Zuführung der Zuluft mit Untertemperatur. Dieser wurde daher ausführlicher vermessen.

Bei Zulufttemperatur 40°C treten grössere Geschwindigkeiten lediglich oberhalb der Türöffnung auf. In Höhe der Oberkante der Tür sind die Luftgeschwindigkeiten bei beiden ZLD bereits so gering, dass das Zuglufttrisiko praktisch vernachlässigbar ist. Damit ist das Zuglufttrisiko auch im Aufenthaltsbereich (bis 1.80 m Höhe) nicht merklich.

Figur 4-3 zeigt das Zuglufttrisiko an verschiedenen Orten im Messraum bei Zulufttemperatur 16°C. Die Maximalwerte sind in Tabelle 4-2 angegeben. Es ergibt sich bei beiden Durchlässen ein messbares Zuglufttrisiko im Kaltluftabfall, aber auch an den Aussenwänden. Für die Weitwurfdüse ergeben sich an den Aussenwänden sogar die grösseren Werte. Durch das radiale Ausblasen besitzt die Zuluft einen merklichen Impuls in Richtung seitliche Außenwand, der an der Wand nach unten abgelenkt wird. Deshalb ist das Zuglufttrisiko fast unabhängig von der Höhe.

Die durch das Gitter einströmende Zuluft hat kaum Impuls in Richtung Außenwand. Das Zuglufttrisiko an der seitlichen Außenwand ist daher weitgehend bestimmt durch den geringen Kaltluftabfall an der Außenwand. Entsprechend der Luftgeschwindigkeit nimmt das Zuglufttrisiko daher in Bodennähe zu. Im Kaltluftabfall des Zuluftstrahls zeigt das Gitter die grösseren

Tabelle 4-2: Maximalwerte des Zuglufttrisikos und zugehörige Raumtemperatur und Luftgeschwindigkeit

	Weitwurfdüse			Gitter		
	DR	ϑ_L [°C]	\bar{v} [m/s]	DR	ϑ_L [°C]	\bar{v} [m/s]
Nach Höhe im Kaltluftabfall						
220 cm	1 - 3%	25.8 - 25.7	0.05 - 0.08	9 - 15%	24.9 - 24.6	0.14 - 0.20
170 cm	2%	25.9	0.06	3%	25.6	0.11
100 cm	1%	25.8	0.05	1%	25.8	0.10
50 cm	3%	25.8	0.05	0.5%	25.9	0.08
Nach Ort						
Kaltluftabfall	3%	25.8	0.05	15%	24.6	0.20
Aussenwand	7%	25.3	0.12	7%	25.5	0.13

Werte ($DR < 15\%$). Allerdings wird die kritische Grösse $DR = 15\%$ nur einmal in 2.2 m Höhe (dies entspricht 0.8 m unterhalb der Decke) erreicht, und nach unten nimmt das Zuglufttrisko sehr schnell ab. Die vom Kaltluftabfall des Zuluftstrahls betroffene Fläche ist auch – entsprechend dem Querschnitt des Zuluftstrahls – relativ klein. Demgegenüber ist das Zuglufttrisko bei der Weitwurfdüse zwar geringer, wegen der radialen Ausbreitung findet der Abfall aber über einer grösseren Bodenfläche statt.

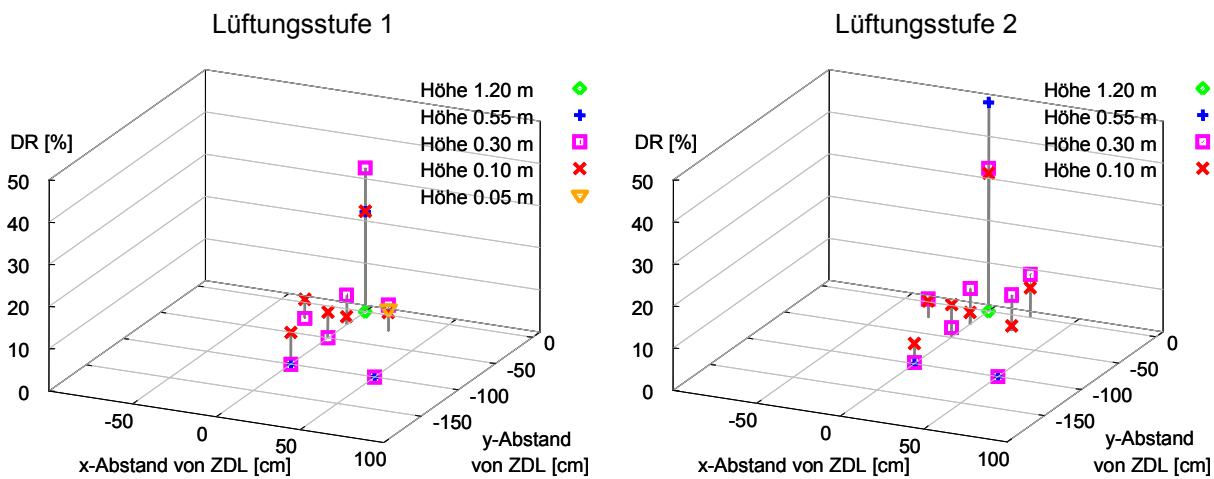
Messungen Passiv-Mehrfamilienhaus "Im Wechselacher"

Figur 4-4 zeigt das Zuglufttrisko für den Fall kühler Zuluft im Nahbereich um einen Bodenauslass im Passiv-Mehrfamilienhaus "Im Wechselacher".

Ein hinten im Raum befindlicher Elektroheizkörper in einer Verschalung übernahm während der Messung die Heizfunktion. Die im hinteren Raumbereich aufsteigende Warmluft sorgte zusammen mit der durch die gegenüberliegenden Bodenauslässe einströmenden kühlen Zuluft für eine ausgeprägte Konvektionswalze.

Bei der in der Messung erreichten Temperaturdifferenz von 5 K zwischen Raumluft und Zuluft ist ausser in unmittelbarer Umgebung des Durchlasses kein Zuglufttrisko vorhanden. Schon in einer horizontalen Entfernung von etwa 1 m stimmten Temperatur und Luftgeschwindigkeit weitgehend mit den Werten in der Mitte des Wohnbereichs überein. Auch in einem Meter Höhe über dem Durchlass wurden die diese Werte weitgehend erreicht. Das bedeutet (wahrscheinlich), dass die kältere Zuluft über dem Durchlass bis maximal 1 m Höhe aufsteigt, und sich dann wieder absinkend in seitlicher Richtung ausbreitet. Dafür spricht auch, dass die Luftgeschwindigkeit in 30 cm Höhe monoton mit der Entfernung abnimmt, in 10 cm Höhe aber ab einer Entfernung von einem halben Meter zunächst wieder ansteigt.

Es lässt sich auch der Schluss ziehen, dass der Strahl aus dem Bodenauslass bei Lüftungsstufe 1 weniger hoch steigt als bei Lüftungsstufe 2. Schon bei einer Entfernung von mehr als 25 cm vom Durchlass liegt das Zuglufttrisko in jedem Fall unter 10%. Die Werte in der Mitte des Wohnbereichs



Figur 4-4: Zuglufttrisko im Bereich des Bodendurchlasses bei Zulufttemperatur 17°C, Raumlufttemperatur 23°C. Links bei Volumenstrom 30 m³/h (Lüftungsstufe 1), rechts bei 35 m³/h (Lüftungsstufe 2).

Die x-y-Ebene der Diagramme entspricht einer horizontalen Ebene des Messraums.

Der ZLD befindet sich mit seinem Mittelpunkt bei $x = 0$ und $y = 0$ im Boden.

Auf der z-Achse der Diagramme ist das Zuglufttrisko aufgetragen, das bei Position x-y gemessen wurde. Die verschiedenen Höhen, in denen gemessen wurde, werden durch unterschiedliche Symbole charakterisiert

Direkt über dem ZLD werden Werte von 20% bis 50% erreicht. Aber schon etwa einen Meter vom ZLD entfernt unterscheidet sich das Zuglufttrisko nicht mehr von dem in der Mitte des Wohnbereichs.

beträgen 5% oder weniger. Direkt über dem Durchlass werden Werte von 20% bis maximal etwa 50% erreicht. Der Durchlass befindet sich aber direkt an der Fensterwand (Abstand Mitte Durchlass - Wand 9 cm), und damit ausserhalb des Aufenthaltsbereichs (siehe Abschnitt 1.1). Damit sind auch die relativ hohen Werte des Zuglufttriskos über dem Durchlass unkritisch.

Die Luftgeschwindigkeiten in Bodennähe liegen aufgrund der Konvektionswalze, verursacht durch die konvektive Heizung, bei der Messung eher höher als im Fall solarer Gewinne. Letztere würden zunächst verschiedene Oberflächen im Raum erwärmen, vor allem auch den Boden, und erst dann würde sich die Luft erwärmen. Daher ist zu erwarten, dass im "Normalbetrieb" das Zuglufttrisko eher noch niedriger ist.

Literatur

[Schwarz] nimmt an, dass bei Raumtemperaturen um 22°C und niedrigem Turbulenzgrad Luftgeschwindigkeiten bis 0.2 m/s zulässig sind. Bei keiner der untersuchten Konfigurationen wurde dieser Wert im Aufenthaltsbereich überschritten.

Bei dem in dem Haus der Passivhaus-Reihensiedlung "Wegere" in Nebikon [Amrein] verwendeten Schlitzauslass wurden die Lamellen so eingestellt, dass die Zuluft schräg in Richtung Decke ausgeblasen wird. Dadurch legt sich der Zuluftstrahl auch im isothermen Fall an die Decke an. Auch hier wurden im Aufenthaltsbereich sehr niedrige Luftgeschwindigkeiten gemessen, sodass ein Zuglufttrisko ausgeschlossen werden kann.

4.5. Luftaustauschwirkungsgrad

Die Lüftung soll dafür sorgen, dass frische Luft dem Raum zugeführt wird, und verbrauchte, belastete Luft möglichst effizient aus dem Raum abgeführt wird. Der Idealfall der Kolbenströmung mit Luftaustauschwirkungsgrad 1.0 ist in der Praxis nicht erreichbar. Bei vollständiger Durchmischung der Luft ist der Luftaustauschwirkungsgrad gleich 0.5. Die durchschnittliche Verweilzeit der Luft ist dann doppelt so gross wie die nominale Zeitkonstante, die gleich dem Kehrwert der nominalen Luftaustauschrate (Verhältnis zugeführter Volumenstrom/Raumvolumen) ist.

Ein Luftaustauschwirkungsgrad von 0.5 allein stellt jedoch noch nicht sicher, dass vollständige Durchmischung vorliegt. Auch eine Kombination mit Anteilen von Kurzschlussströmungen und Totzonen könnte insgesamt auf einen Wert nahe 0.5 führen. Deshalb wurde auch die lokale Luftaustauschkennzahl an verschiedenen Stellen im Raum ausgewertet. Es ergab sich, dass in allen betrachteten Fällen auch die lokalen Werte eine gute Durchmischung anzeigen.

Tabelle 4-3: Luftaustauschwirkungsgrad η_a

IW: Innenwand, AW: Außenwand, o: oben, u: unten,
D: Durchgang, M: Mitte Raum, WQ: interne Wärmequelle, ,
W: Weitwurfdüse horizontal ausblasend,
G: Abdeckgitter, V: vertikal ausblasend über Prallplatte,
L: Rechteckdurchlass mit verstellbaren Lamellen
n.A.: nicht angegeben

Datenquelle	Position ZLD	Position Überströmöffnung	Typ	Sonstiges	Zulufttemperatur	Volumenstrom	Luftaustauschwirkungsgrad
LSK Messung	IWo	IWu	W	mit WQ nahe IW	40	30	0.52
	IWo	IWo	W	mit WQ nahe IW	40	30	0.49
	IWo	IWo	W	mit WQ nahe IW	16	30	0.51
	IWo	IWo	W		40	30	0.51
	IWo	IWu	G	mit WQ nahe IW	40	30	0.51
	IWo	IWo	G	mit WQ nahe IW	40	30	0.45
	IWo	IWo	G	mit WQ nahe IW	16	30	0.52
	IWo	IWo	G		40	30	0.54
[Schwarz] CFD	IWo	Iwu	W		40	n.A.	0.50
	AWo	Iwu	W		40	n.A.	0.50
	AWo	Iwu	V		40	n.A.	0.44
	IWo	Iwu	W	mit Heizkörper	20	n.A.	0.45
	IWo	Iwo	W		40	n.A.	0.46
	AWo	Iwo	W		40	n.A.	0.41
	AWo	Iwo	V		40	n.A.	0.46
[Amrein] Messung	IWo	IWD	L		n.A.	n.A.	0.45
	IWo	IWD	L	mit WQ M	n.A.	n.A.	0.35
	IWo	IWD	L	mit WQ nahe AW	n.A.	n.A.	0.55
[Amrein] CFD	IWo	IWD	L	?	n.A.	n.A.	0.53

Für die Lüftungseffizienz der Anordnung in der Luftströmkammer ist der kritische Fall die Zuführung der Luft mit Übertemperatur, weil die Luft länger im oberen Bereich des Raums verbleibt. Für diese Konstellation wurden mehrere Messungen durchgeführt. Gemessen wurde der Verlauf der Konzentration eines Tracer-gases, das der Zuluft beigemischt wurde, sowie das Abklingen der Konzentration nach Ende der Dosierung.

In Tabelle 4-3 sind die daraus abgeleiteten Werte für den Luftaustauschwirkungsgrad aufgeführt. Sie liegen alle recht nahe beim Wert für vollständige Durchmischung. In der gleichen Tabelle sind auch die Werte aus den anderen oben genannten Untersuchungen eingetragen.

Messungen LSK, Zulufttemperatur 40°C

Mit offenem Türspalt unten ergeben sich für beide Durchlässe leicht bessere Werte, mit offenem Türspalt oben etwas schlechtere Werte als für vollständige Mischlüftung.

Die Luftaustauschwirkungsgrade für Türspalt oben sind mit interner Wärmequelle schlechter als ohne zusätzliche interne Wärmequelle. Lokal ergeben sich allerdings mit interner Wärmequelle für die Weitwurfdüse die besseren Kennzahlen als ohne. Das bedeutet, dass die Wärmequelle zu einer stärkeren Durchmischung zwischen Deckenschicht und Aufenthaltszone führt. Das Gitter zeigt ohne interne Wärmequelle die besseren Werte. Dafür konnte noch keine plausible Interpretation gefunden werden.

Die lokal gemessenen Werte der Luftaustauschkennzahl liegen im Aufenthaltsbereich grundsätzlich unter dem Wert für vollständige Durchmischung. Im Bereich der Decke werden dagegen besonders grosse Werte registriert. Dies zeigt, dass die warme Luftsicht unter der Decke eine leichte Tendenz zur Ausbildung einer Kurzschlussströmung hat, insbesondere wenn die Luft den Raum in Höhe dieser Schicht verlassen kann.

Messungen LSK, Zulufttemperatur 16°C

Mit offenem Türspalt oben ergeben sich für beide Durchlässe leicht bessere Werte als für vollständige Mischlüftung.

Die lokal gemessenen Werte der Luftaustauschkennzahl liegen sehr nahe beim Wert für vollständige Durchmischung.

Literatur

Auch bei [Schwarz] sind die Anordnungen einer Weitwurfdüse oben mit Überströmöffnung oben im Heizfall ungünstiger als mit Überströmöffnung unten. Besonders wenn sich die Durchlässe gegenüber liegen, ist deutlich ein Anteil Kurzschlussströmung zu erkennen. Bei der Düse mit Prallplatte, die die Zuluft sowohl nach oben als auch nach unten lenkt, ist der Luftaustauschwirkungsgrad in beiden Fällen ähnlich.

Die Messungen in dem Haus der Passivhaus-Reihensiedlung "Wegere" [Amrein] zeigen, dass die Position der Wärmequelle (und eventuell andere nicht erfasste Einflüsse) den Luftaustauschwirkungsgrad stark beeinflussen können.

4.6. Temperaturgradienten

Messungen LSK

Die Gradienten der Lufttemperatur wurden ca. 2 m von der Zwischenwand mit ZLD und ca. 0.8 m seitlich von der Strahlachse des ZLD gemessen.

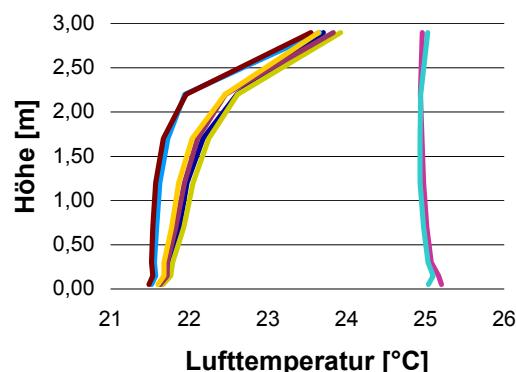
Zulufttemperatur 40°C: Bei der Weitwurfdüse ebenso wie beim Gitter beträgt die Temperaturdifferenz zwischen 0.05 m und 2.20 m Höhe höchstens 1 K (Figur 4-5, Kurven links). Die Temperaturgradienten liegen somit weit unter den kritischen Werten. [SN EN ISO 7730:1995] gibt als kritischen Wert einen (positiven) Gradienten von 3 K/m von 0.1 m bis 1.1 m an.

Zulufttemperatur 16°C: Bei der Weitwurfdüse ebenso wie beim Gitter beträgt die Temperaturdifferenz zwischen 0.05 m und 2.20 m Höhe ausserhalb des Kaltluftabfalls weniger als 0.5 K, wobei die höheren Temperaturen in Bodennähe anzutreffen sind (Figur 4-5, Kurven rechts). Auch innerhalb des Kaltluftabfalls lagen die Temperaturen in 0.50 m Höhe rund 0.5 K über denen in 2.20 m Höhe.

Literatur

Bei [Schwarz] zeigt die Variante mit Heizkörper an der Innenwand und Weitwurfdüse darüber wie erwartet den grössten Gradienten infolge der stabilen Konvektionswalze. Aber auch diese Variante ist mit 1.7 K Differenz zwischen Boden und 1 m Höhe gerade noch im zulässigen Komfortbereich.

Wenn die Zulufttemperatur etwa der Raumlufttemperatur entspricht, ist der Temperaturgradient in dem Haus der Passivhaus-Reihensiedlung "Wegere" [Amrein] über die Geschosshöhe im EG kleiner als 1 K, und im OG praktisch kaum noch messbar. Auch der Unterschied zwischen EG und OG ist sehr gering. Auch im Heizfall sind die gemessenen Gradienten mit 2 K bzw. 0.5 K über die Geschosshöhen sehr gering.

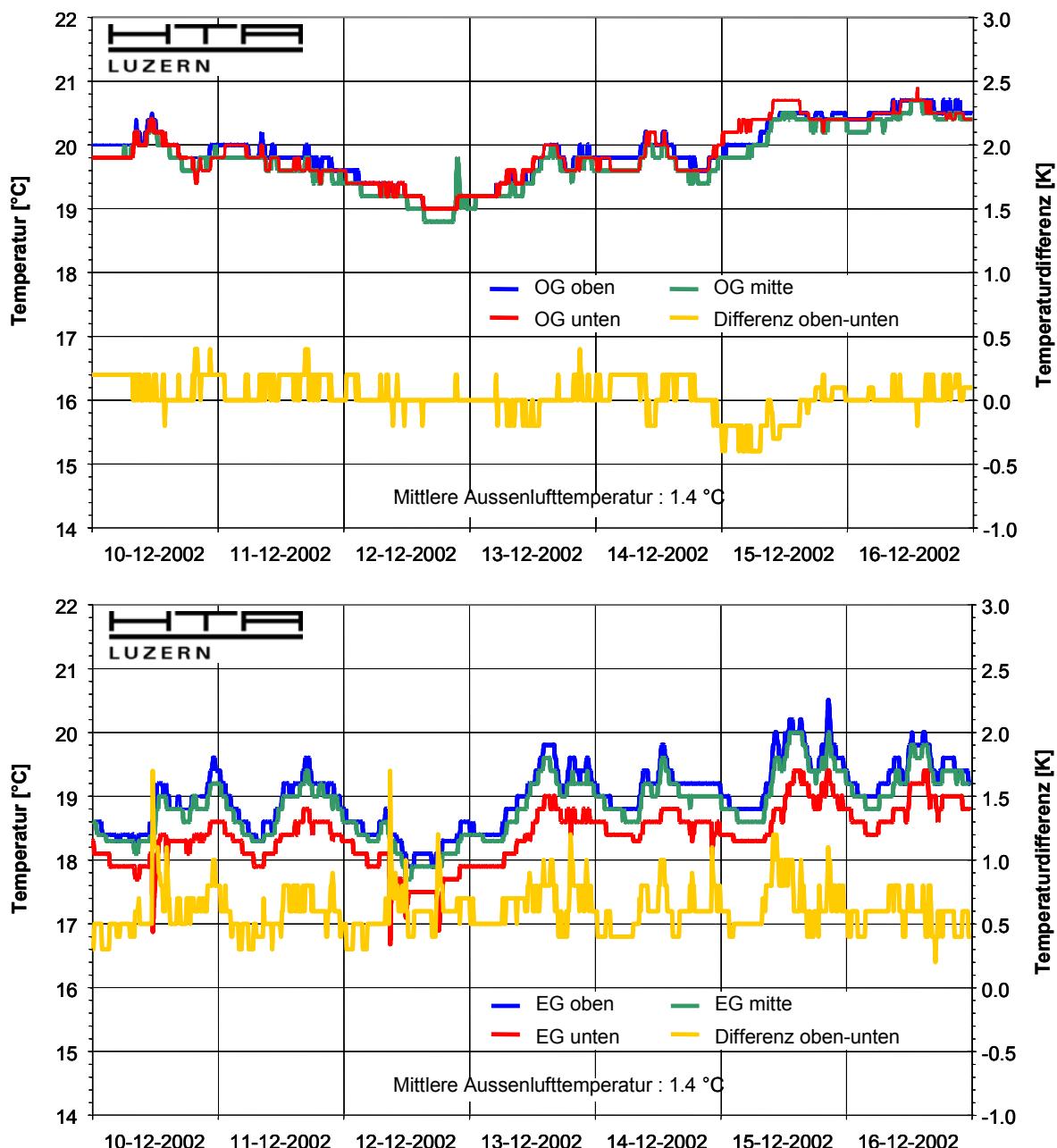


Figur 4-5: Temperaturgradienten in der LSK.

Linke Kurven: bei Zulufttemperatur 40°C (Raumlufttemperatur ca. 22°C), die beiden tiefer liegenden Kurven wurden ohne interne Wärmequelle gemessen;

rechte Kurven: bei Zulufttemperatur 16°C (Raumlufttemperatur ca. 25°C).

Die Gradienten unterscheiden sich nicht, je nachdem, ob die Weitwurfdüse oder das Gitter als ZLD verwendet wurde.



Figur 4-6: Gemessener Temperaturverlauf im Erdgeschoss und im Obergeschoss der Maisonetewohnung im Passiv-MFH "Im Wechselacher" [StansLuft].

Oben: Obergeschoss

Unten: Erdgeschoss

Zeitraum: 10. bis 17. Dezember 2002.

Mehrgeschossigkeit

Im Winter 2002/2003 und im Frühjahr 2003 wurden Langzeitmessungen der Lufttemperatur im Erdgeschoss und im Obergeschoss einer Maisonettewohnung im Passiv-MFH "Im Wechselacher" in Stans durch den Wissens- und Technologietransfer HLKS der HTA Luzern durchgeführt [StansLuft]. Die Messfühler waren jeweils 0.1 m, 0.95 m und 1.8 m über dem Boden positioniert. Im Erdgeschoss befand sich das Messstativ im hinteren Teil des Wohnraums. Im Obergeschoss waren die Fühler direkt neben dem Treppenaufgang platziert.

Während der ganzen Messdauer traten nur minimale Temperaturgradienten in den einzelnen Geschossen auf. Der Gradient im Erdgeschoss betrug in den beiden näher betrachteten Wochen 0.6 K bzw. 0.8 K. Der Gradient im Obergeschoss war extrem klein, er lag zwischen 0 K und 0.3 K zwischen 0.1 m und 1.8 m, und damit im Bereich der Auflösung des Messfühlers. Figur 4-6 zeigt einen Ausschnitt aus dem Messzeitraum vom 10. bis 17. Dezember 2002.

Die Differenz zwischen Erdgeschoss und Obergeschoss war ebenfalls sehr klein, die Differenz schwankte zwischen 0.3°C und 0.9°C.

Damit liegen die Gradienten, wie bei den anderen Messungen auch, weit unter den Grenzwerten, und der Komfort bezüglich Temperaturgradienten kann insgesamt als sehr gut bezeichnet werden. Insbesondere lässt sich aus den Messungen schliessen, dass auch die offene, zweigeschossige Bauweise nach Passivhausstandard keine besonderen Anforderungen zur Vermeidung von Temperaturgradienten stellt.

Die spezielle Situation, wenn im unteren Geschoss grosse Wärmelasten – seien es interne, solare, oder durch eine Zusatzheizung eingebrachte – anfallen, wird in Kapitel 5 noch näher untersucht.

4.7. Erkenntnisse

Da alle Zuluftzustände etwa gleich häufig vorkommen, gibt es bei einer Lüftungsanlage mit Lufterwärmung im Passivhaus keine "typische" Situation, für die der Komfort durch geeignete Wahl von Typ und Position des ZLD optimiert werden könnte. Andererseits haben eigene Untersuchungen gezeigt, dass der Komfort selbst bei den maximalen bzw. minimalen Zulufttemperaturen gewährleistet ist, und damit die Notwendigkeit entfällt, eine solche Optimierung vorzunehmen.

Für die Anordnung eines ZLD über der Tür, die gleichzeitig als Überströmöffnung fungiert, lassen sich folgende Schlüsse aus den Messungen in der Luftströmkammer ziehen:

- Beide ZLD gewährleisten unter den getesteten Bedingungen einen sehr guten Komfort und einen guten Luftaustausch. Die Weitwurfdüse zeigt im Lüftungsbetrieb nur mit WRG-Temperatur im Kaltluftabfall deutlich bessere Komfortwerte. Aber auch der Komfort, der mit einem einfachen Zuluftgitter erreichbar ist, liegt innerhalb der normalen Anforderungen.
- Im Heizfall ist der Luftaustauschwirkungsgrad etwas besser, wenn die Abluft durch den Türspalt unten geführt wird, und damit eine Durchströmung von oben nach unten forciert wird.
- Bei grösseren und / oder tieferen Räumen bzw. grösseren Volumenströmen sind deutlichere Vorteile für die Weitwurfdüse zu erwarten. Bei kleinen Räumen kann eine Wechselwirkung mit einem leichten, aber für den Komfort nicht relevanten, Kaltluftabfall auftreten. Dadurch kann sich eine "Konvektionswalze" ausbilden, und die Zuluft vermischt sich etwas weniger gut mit der Luft im Aufenthaltsbereich.

Da sowohl die Ausprägung der Schichtung der warmen Zuluft als auch die Intensität des Kaltluftabfalls bei Untertemperaturen von der Differenz zur

Raumlufttemperatur abhängen, kann aus den Messungen in der Luftströmkammer für zwischen den Extremen liegende Zuluftzustände geschlossen werden, dass bei diesen der Komfort jeweils besser als in den – an sich auch schon unproblematischen – Extrempfälten ist.

[Schwarz] zieht aus seinen Untersuchungen den Schluss, die Anordnung einer Weitwurfdüse über der Tür kombiniert mit einem Türspalt unten sei derjenigen der Anordnung an der Wand gegenüber der Tür vorzuziehen, auch wenn die Komfortbedingungen bei allen Varianten eingehalten werden.

Für einen Bodenauslass lassen sich folgende Schlüsse ziehen

- Ein nach oben ausströmender Bodenauslass weist nur im Bereich unmittelbar über dem Auslass einen verminderten Komfort auf. Insbesondere bei Untertemperatur dürfte ein Bodenauslass damit deutliche Vorteile gegenüber einem in Bodennähe platzierten Wandauslass haben.
- Wenn der Bodenauslass in weniger als 1 m Abstand vor Fenstern, oder weniger als 0.5 m vor Wänden angebracht ist, befindet er sich ausserhalb des Aufenthaltsbereichs. Im Aufenthaltsbereich sollten dann die Komfortbedingungen erfüllt sein.
- Gerade bei zweigeschossigen Wohnungen liegt es nahe, eine Zuluftleitung in der mittleren Geschossdecke zur gemeinsamen Versorgung der oberen Zimmer (über Bodenauslässe) und des Wohnzimmers (über Deckenauslässe) zu realisieren. Bei Verwendung von Bodenauslässen in Kinderzimmern sollte die Komfortsituation um den Bodenauslass jedoch sorgfältig abgeklärt werden.
- Aus Gründen des Schallschutzes sollte in unmittelbarer Nähe des Bodenauslasses kein Bett aufgestellt werden (können).
- Die Situation mit Übertemperatur wurde nicht untersucht, aber auch hier ist zu erwarten, dass ausserhalb des unmittelbaren Bereichs über dem ZLD die Komfortbedingungen eingehalten werden.

Allgemein gilt:

- Die Strömung im Raum wird einerseits durch die Anordnung der ZLD und die Oberflächentemperaturen der Umhüllungsflächen bestimmt; diese Verhältnisse sind noch relativ gut vorhersehbar, und die Anordnung könnte entsprechend optimiert werden. Andererseits können interne Gewinne, offen stehende Türen (siehe Abschnitt 3.4) und die Anwesenheit von Personen Konvektionsströme bewirken, die mehrfach grösser sind, aber noch viel weniger vorhersehbar.
- An den Aussenwänden und Fenstern ist zwar kein eigentlicher Kaltluftabfall festzustellen, dennoch sinkt die Luft an den etwas kühleren Oberflächen langsam ab; zusammen mit entsprechenden Auftriebskräften in gegenüberliegenden Raumbereichen können sich Konvektionswalzen ausbilden, die aber im Allgemeinen nicht kritisch für den Komfort sind.
- Kurzschlussströmungen sollten vermieden werden; dabei zeigt sich die Anordnung an gegenüber liegenden Wänden auf gleicher Höhe als kritischer als die Anordnung nahe beieinander an der gleichen Wand; die Anordnung nahe beieinander an der gleichen Wand ist auch für wenig oder nicht induktive Auslässe unkritisch.

- Im Zusammenhang mit den beiden zuvor genannten Punkten können Weitwurfdüsen in relativ kleinen (wenig tiefen) Räumen sogar eher Nachteile als Vorteile haben.
- Die Auswahl des Typs und der Position des ZLD im Raum ist durch Komfortbedingungen kaum eingeschränkt. Andere Aspekte können bei der Entscheidung Priorität haben: Minimierung der Kanallänge, Akustik, Ästhetik etc.
- Einfache ZLD können verwendet werden, zu empfehlen sind aber einstellbare ZLD um den Abgleich der Anlage zu erleichtern; wenn der ZLD nicht einstellbar ist, ist eine andere Einstellmöglichkeit für den Abgleich des Kanalnetzes vorzusehen.

5. Ergänzungsheizung

Die Kriterien zur Erfüllung des Passivhaus-Standards sollen gewährleisten, dass ein Gebäude über die Zuluft beheizbar ist. Jedoch ist die Heizfunktion der Lüftungsanlage kein "Muss", auch jede andere Art der Beheizung für ein Gebäude nach Passivhausstandard ist zulässig.

Neben konventionellen Zentralheizungen ist für Gebäude mit sehr niedrigem Energiebedarf auch eine Beheizung mit einer Einzelraumfeuerung denkbar. Voraussetzung bei der Nutzung von Holz als Brennstoff ist, dass das Holz einer nachhaltigen, regionalen Waldnutzung entstammt. Solange Holz nachhaltig genutzt wird, d.h. nicht mehr Holz geschlagen wird als nachwächst, kann Holz als eine erneuerbare Energieressource betrachtet werden. In der Schweiz wächst seit längerem mehr Holz nach als genutzt wird.

Wenn eine Solaranlage vorhanden ist, und daneben Holz als Brennstoff verwendet wird, bietet sich die Chance, die Wärmeversorgung eines Passivhauses komplett aus erneuerbaren Energien zu bestreiten. Der Vorteil, erneuerbare Energien zu nutzen wird allerdings etwas geschränkt durch den grösseren Aufwand, der nötig ist, um bei Holzfeuerungen eine wirklich saubere Verbrennung zu garantieren, und durch die höheren Emissionen, vor allem von Staub, PM10 und Kohlenmonoxid [BUWAL 2001]. Eine Übersicht über den Verbrennungsvorgang und seine Parameter gibt [Nussbaumer]. Nach [Nussbaumer 2004] sollte auch keinesfalls Altholz oder Restholz unklarer Herkunft verbrannt werden, da dadurch erhebliche Umweltbelastungen entstehen können, vor allem auch hohe Dioxin- und PAK-Emissionen.

Zudem weisen selbst die kleinsten heute verfügbaren Stückholzöfen, und in geringerem Masse auch Pelletöfen, Leistungen auf, die in der Regel immer noch über dem Bedarf eines Passivhauses liegen.

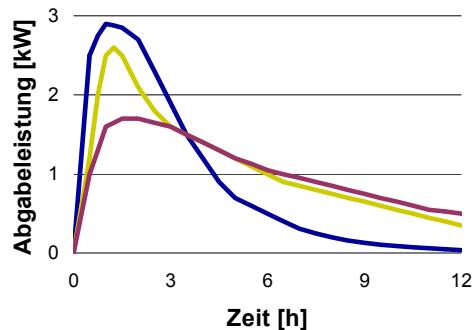
Im Folgenden wird diskutiert, wie und unter welchen Bedingungen die Beheizung eines Passivhauses mit einem Ofen möglich ist. Es wurde nur die Wärmeabgabe eines Ofens an den Aufstellraum untersucht. Eine teilweise Abgabe der Wärme über ein Wassersystem an Radiatoren oder den Warmwasserspeicher, oder über Luftkanäle an andere Räume wird an dieser Stelle nicht betrachtet. Es interessieren zunächst die Grenzen für die Wärmeabgabe einer Ergänzungsheizung an den Raum bei Einhaltung der Komfortbedingungen, sowie Massnahmen zur Verteilung der Wärme in den Räumen.

5.1. Charakteristiken von Holzöfen

Zu direkten Beheizung von Räumen können als Brennstoff im Wesentlichen Stückholz oder Holzpellets verwendet werden. Stückholzöfen können fertig gekauft werden oder vor Ort gesetzt werden. Sie werden manuell eingefeuert. Charakteristisch für Stückholzöfen ist, dass die Dauer des Abbrands nach einem Einfeuerungsvorgang sehr viel kürzer ist als die Zeit der Wärmeabgabe an den Raum. Das Verhältnis hängt von der

Figur 5–1: Typischer Zeitverlauf der Wärmeabgabe eines Stückholzofens.

- P_{Nenn} 6 kW, Gewicht ca. 220 kg
- P_{Nenn} 8 kW, Gewicht ca. 320 kg
- P_{Nenn} 8 kW, Gewicht ca. 420 kg
(Herstellerangaben Tonwerk Lausen AG)



Speicherkapazität des Ofenmaterials ab. Typische Abbrandzeiten sind ein bis zwei Stunden, während die Wärmeabgabe über einen Zeitraum von bis zu 12 oder sogar 24 Stunden erfolgt. Als Beispiel sind in Figur 5–1 die Leistungsverläufe, die die Tonwerk Lausen AG für ihre Öfen angibt, dargestellt. Moderne Stückholzöfen erreichen Wirkungsgrade von über 80% [EnergieInnovation9].

Pelletöfen sind in der Bedienung komfortabler, da sie über einen Vorratsbehälter am Ofen verfügen. Die Zündung erfolgt automatisch, und die Leistungsabgabe kann zwischen einem Minimal- und einem Maximalwert geregelt werden. Der Anschluss eines Raumtemperaturfühlers ist möglich. Damit reduziert sich der Bedienaufwand auf das Nachfüllen des Vorratsbehälters und das Leeren des Aschebehälters im Abstand von einigen Tagen. Die kleinsten möglichen Leistungen von Pelletöfen liegen im Bereich 2 kW [Epp] oder knapp darunter. Ist der Wärmeleistungsbedarf geringer, muss der Ofen takten. Pelletöfen besitzen weniger Speichermasse, da sich ihre Leistung regulieren lässt. (Es gibt allerdings auch Einsätze z. B. zum Einbau in Kachelöfen.) Pelletöfen erreichen aufgrund der besseren Regelungsmöglichkeiten Wirkungsgrade über 90%.

Sowohl bei Stückholzöfen als auch bei Pelletöfen ist die minimale Feuerleistung begrenzt durch die Notwendigkeit, eine effiziente und saubere Verbrennung zu gewährleisten. Auch häufige Anfeuervorgänge sollten vermieden werden, da diese durch hohe Schadstoffemissionen und geringere Wirkungsgrade gekennzeichnet sind.

Vor Ort gesetzte Öfen, die noch an weitere Räume grenzen, können ihre Wärme direkt an mehrere Räume auf derselben Etage abgeben. Öfen mit Satellitenspeichern geben nur einen Teil ihrer Wärme im Ofen selbst ab. Die Rauchgase gelangen über einen Kamin in einem Satelliten, einem massiven Speicher in einem höher gelegenen Raum, und geben einen Teil ihrer Wärme erst dort ab.

Manche Öfen verfügen über Wärmetauscher mit der Möglichkeit, über diese einen Teil der Wärme an Radiatoren in anderen Räumen oder an einen Warmwasserspeicher abzugeben. Üblich war bisher die Anordnung des Wärmetauschers im Ofen innerhalb der Speichermasse des Ofens. Eine neue Variante ordnet den Wärmetauscher ausserhalb der Speichermasse unter einer Verkleidung an. Die Entwicklung zielt darauf ab, die Aufteilung der Wärmeabgabe zwischen Raum und Wassersystem variabler zu ge-

stalten, und die Spitzen in der Leistungsabgabe an das Wassersystem zu reduzieren [Huber 2002].

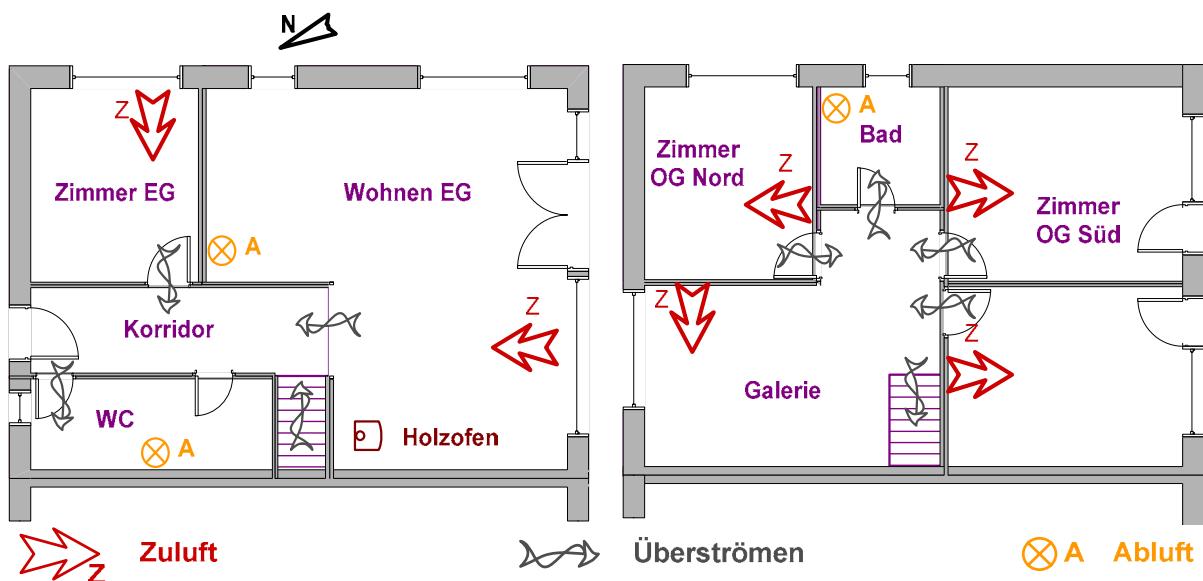
Eine weitere Möglichkeit besteht in der teilweisen Weiterverteilung der Ofenwärme über ein ofeneigenes Warmluftsystem. Raumluft wird am Ofen erwärmt und über eigene Kanäle oder Muro- und Hypokausten mittels Schwerkraftprinzip oder Umwälzung mittels Ventilator aus dem Ofenraum in andere Räume gebracht.

5.2. Temperaturverteilung in der Wohnung mit Ofenbetrieb

Modellwohnung und thermische Simulation

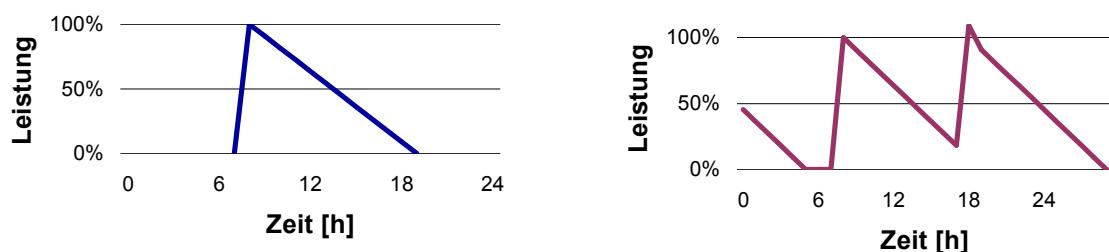
Der Einfluss der Ofencharakteristik und der Einfuerungszyklen auf die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung in einer Wohnung wird anhand von Simulationen analysiert. Um Extremfälle abzudecken, wird angenommen, dass der Ofen seine gesamte Wärme an den Raum abgibt. Die Aufteilung der Wärmeabgabe mittels eines Wärmetauschereinsatzes und eine mögliche Kopplung an weitere Radiatoren oder einen Warmwasserspeicher wird nicht untersucht.

Das Wohnungsmodell für die Simulationsrechnungen basiert auf dem Beispiel einer Maisonette-Wohnung von ca. 130 m² im schon erwähnten Passiv-Mehrfamilienhaus "Im Wechselacher" in Stans [Humm]. Der Grundriss mit der Luftführung ist in Figur 5-2 gezeigt. Der Bereich Wohnen/ Korridor/ Treppe/ Galerie ist nicht durch Türen unterteilt. Nach den Planungsunterlagen ergibt sich ein Zuluftüberschuss im Obergeschoss von ca. 30 m³/h bei einer Gesamtluftmenge von 180 m³/h.



Figur 5-2: Simulation Ofen Maisonettewohnung, Modellgrundriss der Wohnung.

Wohnen im EG, Korridor, Treppe und Galerie im OG bilden einen nicht durch Türen abgetrennten, offenen Bereich. Die Zuluft wird zur Hälfte im OG zugeführt, und zu zwei Dritteln im EG abgeführt. Damit ergibt sich ein Zuluftüberschuss im Obergeschoss von ca. 30 m³/h bei einer Gesamtluftmenge von 180 m³/h.



Figur 5–3: Simulation Ofen Maisonettewohnung, Zeitverlauf der Wärmeabgabe des modellierten Ofens.

Links: einmaliges Einfeuern morgens, rechts: zweimal täglich Einfeuern.

Die reale Wohnung ist nicht mit einem Ofen ausgestattet. Im Rahmen des Messprojekts [StansMess] bestand jedoch die Möglichkeit, punktuelle Messungen vorzunehmen. Zwei Heizzyklen mit einer konvektiven Heizung mit 2 kW Heizleistung erlauben grobe Aussagen über die Grösse des konvektiv angetriebenen Luftaustauschs.

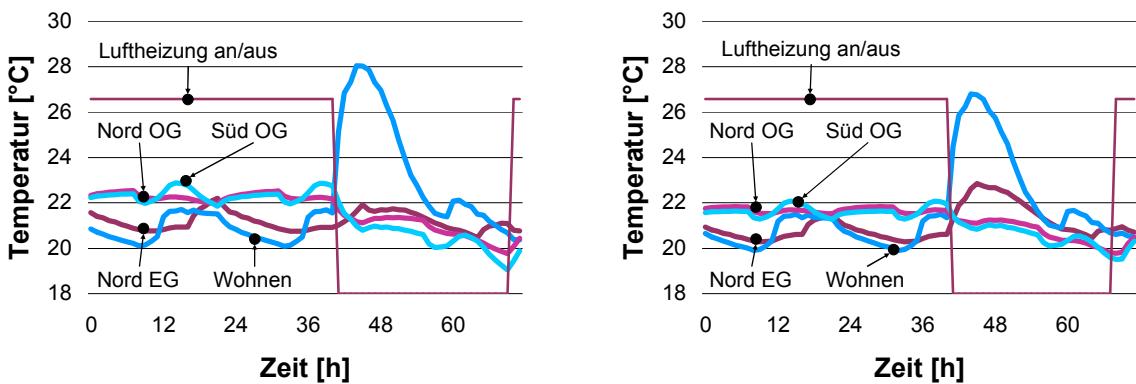
Die gekoppelten thermischen und Luftaustausch-Simulationen wurden mit Trnsys/Trnflow [TRNSYS] durchgeführt. Die ermittelten konvektiven Luftströmungen wurden mit dem Messergebnis und einer CFD-Rechnung auf Plausibilität überprüft.

Um die Wirkung der Ofenheizung deutlich zu machen, wurden die Umgebungsbedingungen konstant gesetzt: die Aussentemperatur beträgt -2°C, die Einstrahlung ist rein diffus und beträgt horizontal 1.3 kWh/(m²d), verteilt über neun Stunden am Tag, und die Windgeschwindigkeit wurde auf Null gesetzt. Die internen Gewinne wurden entsprechend einer angenommenen Nutzung auf die Räume verteilt und jeden Tag identisch wiederholt. Ihre Tagessumme betrug 8.8 kWh/d. Die Solltemperatur der Räume wurde auf 21°C festgesetzt.

Es wurde angenommen, dass sich der Ofen im Wohnraum befindet. Die Leistungsabgabe erfolgte zu 50% konvektiv, und zu 50% radiativ. Die Verteilung der Strahlungsleistung auf die Hüllflächen erfolgte nach Flächenanteil. Der zeitliche Verlauf der Leistungsabgabe orientiert sich an dem eines Stückholzofens und ist in Figur 5-3 dargestellt. Die Leistungsspitze wurde so skaliert, dass die innerhalb von 24 h vom Ofen abgegebene Energie gerade dem Heizwärmebedarf in diesem Zeitraum entspricht. Bei der Variante "einmaliges Einfeuern", im Bild links, ist daher die absolute Leistungsspitze doppelt so hoch wie bei der Variante "zweimal täglich Einfeuern", im Bild rechts: knapp 4 kW gegenüber knapp 2 kW.

Einmaliges Einfeuern

Figur 5-4 zeigt den Verlauf der Raumtemperaturen und das an/aus-Signal der Lufnachheizung für den Fall, dass jeweils längere Zeit ausschliesslich über die Zuluft geheizt wird, und der Ofen nur an einzelnen Tagen eingefeuert wird. Dargestellt sind die Temperaturen im Wohnbereich und in den Zimmern. Das Ausschalten der Lufnachheizung fällt zusammen mit dem



Figur 5–4: Simulation Ofen Maisonettewohnung, Zeitverlauf ausgewählter Raumtemperaturen bei längerfristiger Beheizung über die Zuluft und Beheizung über den Ofen mit einmaligem Eifeuern an einem Tag.

Links: Situation bei geschlossenen Zimmertüren, rechts bei geöffneten Zimmertüren.

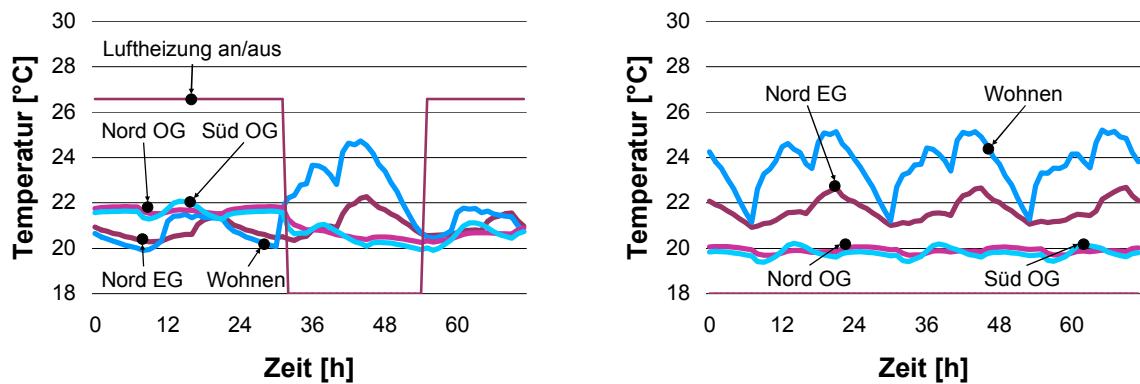
Einheizen des Ofens. Das linke Diagramm gilt für geschlossene Zimmertüren, das rechte für geöffnete Zimmertüren.

Es tritt während 10 h bei geschlossenen, bzw. 8 h bei offenen Zimmertüren, eine starke Überhitzung (mehr als 25°C) im Wohnzimmer auf. Da der zusammenhängende Luftbereich schon einen relativ grossen Teil der Wohnung einnimmt, vermindert eine Öffnung der Zimmertüren (auch der Ablufträume) den Spitzenwert der Raumtemperatur im Wohnzimmer nur um etwa 1 K auf ca. 27°C. Auch die anderen Räume im Erdgeschoss, wie das nordorientierte Zimmer, erfahren einen leichten Temperaturanstieg. Bei geöffneten Türen ist dieser um ca. 1 K höher als bei geschlossenen Türen. Die Zimmer im Obergeschoss, vor allem die über dem Wohnzimmer liegenden, kühlen in beiden Fällen leicht aus, die tiefsten Werte liegen um 19°C.

Die Raumtemperaturen in den Zimmern und in den Nebenräumen bleiben damit zwar im komfortablen Bereich (auch 19°C können bei praktisch gleichen Luft- und Oberflächentemperaturen noch akzeptiert werden), aber die Situation im Wohnzimmer ist nicht akzeptabel. Dies gilt umso mehr, wenn nicht nur an eine sporadische Nutzung des Ofens gedacht ist.

Verbessern lässt sich der Komfort im Wohnzimmer durch eine Vergleichsmässigung der Wärmeabgabe. Dies kann durch Erhöhung der Speicherkapazität des Ofens geschehen oder aber durch die Wahl eines kleineren Ofens und mehrmaliges tägliches Eifeuern.

Figur 5-5 zeigt die Verhältnisse, wenn die Maximalleistung halbiert wird und der Ofen zweimal täglich eingefeuert wird. Dies reduziert die Überhitzung im Wohnzimmer erheblich. Die Kurven gelten für geöffnete Zimmertüren in der gesamten Wohnung. Im Fall, dass der Ofen nur an einzelnen Tagen benutzt wird (linkes Diagramm), beträgt die Maximaltemperatur im Wohnzimmer nun unter 25°C, das sind 2 K weniger als bei einmaligem Eifeuern mit entsprechend gröserer Maximalleistung. Auch der Temperaturabfall im Obergeschoss vermindert sich damit, die Temperaturen fallen nicht mehr



Figur 5–5: Simulation Ofen Maisonettewohnung, Zeitverlauf ausgewählter Raumtemperaturen.

Die Zimmertüren sind in beiden Fällen geöffnet.

Links: längerfristige Beheizung über die Zuluft und Beheizung über den Ofen mit zweimal Eifeuern an einem Tag.

Rechts: ständige Beheizung über den Ofen mit zweimal Eifeuern an einem Tag.

unter 20°C. Damit kann die Situation insgesamt als noch komfortabel bezeichnet werden.

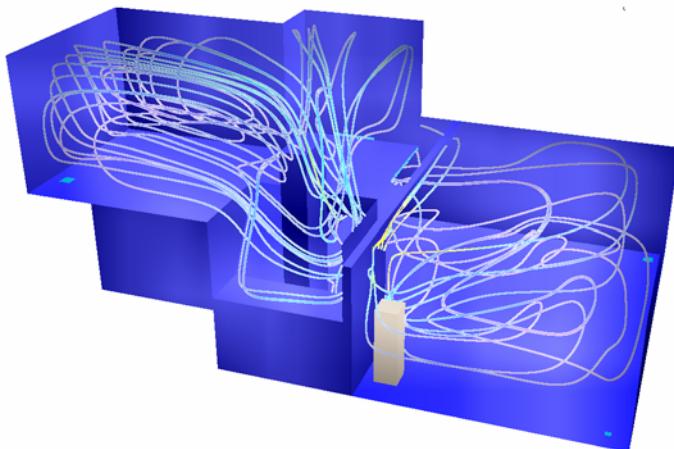
Heizen mit Ofen über eine längere Periode

Das Diagramm rechts in Figur 5-5 zeigt den Fall, dass die Wohnung für längere Zeit ausschliesslich über den Ofen beheizt wird. Im Vergleich zur Situation bei nur gelegentlicher Benutzung des Ofens steigen die Temperaturspitzen im Erdgeschoss leicht an. Im Wohnzimmer beträgt die Temperatur für 3 h pro Tag um 25°C, im Erdgeschoss sonst sind die Temperaturen komfortabel. Das Obergeschoss ist dauerhaft etwa 2 K kühler, weist aber immer noch ca. 20°C auf. Hier wird nun ständig Zuluft mit Untertemperatur, nämlich der Zulufttemperatur nach dem Wärmetauscher, zugeführt. Da die internen Gewinne nur zu etwa einem Drittel im Obergeschoss anfallen und auch keine grossen solaren Gewinne angesetzt wurden, muss die fehlende Wärme statt von der Zuluft über Konvektion aus dem Erdgeschoss bezogen werden.

Luftströmung und Wärmeverteilung

CFD Rechnung

Figur 5-6 zeigt die Strömungssituation gemäss einer CFD-Rechnung [FLOVENT]. Berechnet wurden die Strömungspfade im Bereich Wohnen (rechts unten)/ Korridor/ Treppe (Mitte)/ Galerie (links oben) bei geschlossenen Zimmertüren. Helle Flecke und Spalte am Boden bezeichnen ZDL bzw. Überströmöffnungen (Türspalt). Aus der thermischen / Luftaustausch-Simulation wurden die Luftmengen übernommen, die über Durchlässe bzw. die Türpalte in den Bereich eintreten oder ihn verlassen. Randbedingungen für eine bestimmte Stunde sind die konvektive Leistungsabgabe des Ofens, die Oberflächentemperaturen der Umschliessungsflächen und die Zulufttemperaturen der ZLD bzw. der benachbarten Räume. Es wurde ein Datensatz aus der Simulation ausgewählt, der im Temperaturmaximum des Wohnbereichs bei zweimaligem Eifeuern liegt.

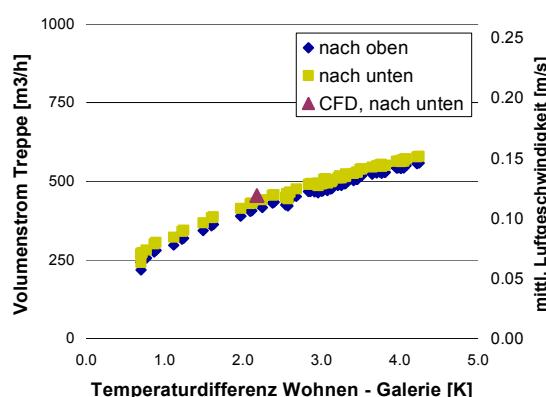


Figur 5–6: Simulation Ofen Maisonettewohnung, CFD-Rechnung der Strömungssituation. Strömungspfade im Bereich Wohnen (rechts unten)/ Korridor/ Treppe (Mitte)/ Galerie (links oben) bei geschlossenen Zimmertüren. Der graue Quader im Wohnbereich stellt den Ofen dar. Blickrichtung von Westen (von unten in Figur 5–2).

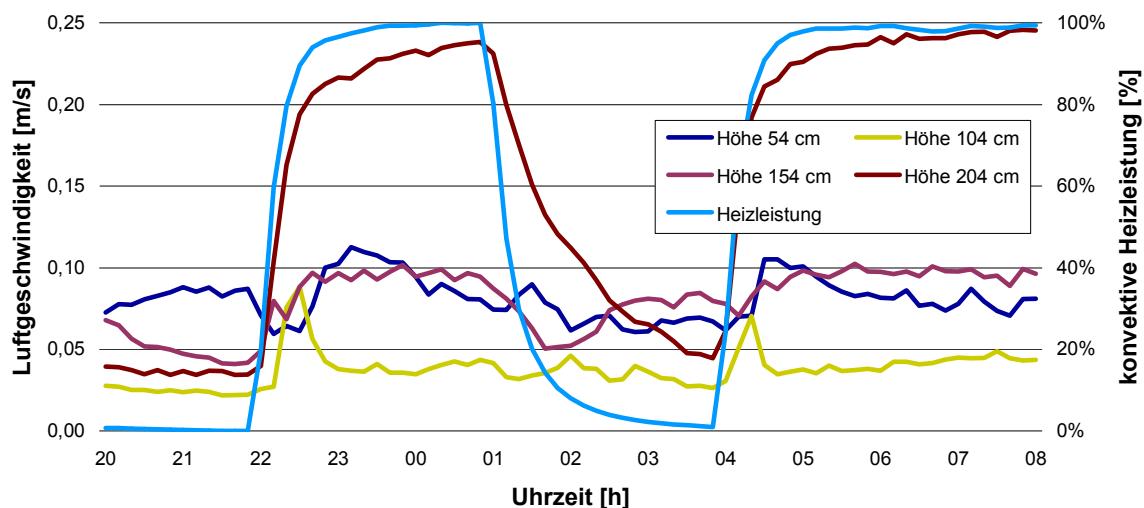
Warme Luft strömt beim Ofen (Quader im Wohnbereich, grün dargestellt) nach oben, unterhalb der Decke im EG letztlich in Richtung Treppe, und steigt dort in der Öffnung senkrecht bis fast zur Decke des Obergeschosses auf. Die kühlere Luft vom Obergeschoss strömt der Rampe der Treppenstufen entlang ins Erdgeschoss und breitet sich dort am Boden aus.

Vergleich CFD - thermische Simulation

Werden nun die Luftmengen verglichen, die sich aus der thermischen / Luftaustausch-Simulation ergeben, mit denen, die bei der CFD-Rechnung aus der Bilanz in einem Kontrollvolumen im Treppenbereich ermittelt werden, so zeigt sich zunächst keine gute Übereinstimmung. Dies liegt allerdings zum guten Teil daran, dass die Raumlufttemperaturen von der CFD nicht genau reproduziert werden. Unter der Annahme, dass der konvektive Luftaustausch hauptsächlich von den Lufttemperaturen in den verschiedenen Bereichen und erst in zweiter Linie von den Oberflächentemperaturen und anderen Einflussgrößen abhängt, wurde das Diagramm in Figur 5–7 erstellt.



Figur 5–7: Simulation eines Ofens in der Maisonettewohnung: Vergleich der Luftvolumenströme zwischen Erdgeschoss und Obergeschoss aus thermischer / Luftaustausch-Simulation (Rauten und Quadrat) und CFD-Rechnung (Dreieck). Die Differenz wurde zwischen den mittleren Zonen-Raumlufttemperaturen berechnet.



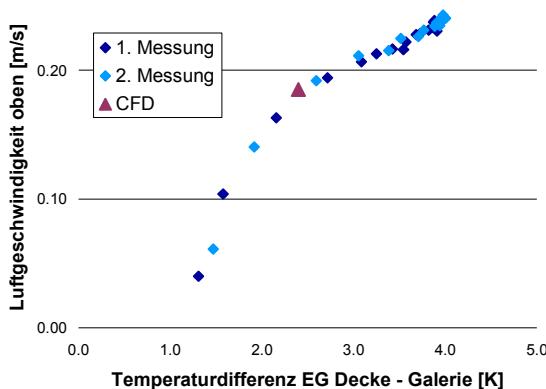
Figur 5–8: Messung Maisonettewohnung Stans, Luftgeschwindigkeiten in vier Höhen im Durchgang vom Korridor im Erdgeschoss zur Treppe, sowie relative Heizleistung der konvektiven Wärmequelle.

Treibende Kraft ist die Temperaturdifferenz zwischen Erdgeschoss und Obergeschoss. Als repräsentative Differenz wurde diejenige zwischen dem Wohnzimmer und der Galerie gewählt. Darüber aufgetragen sind die Werte der Luftvolumenströme in beiden Richtungen, wie sie sich aus der thermischen / Luftaustausch-Simulation ergeben. Es zeigt sich eine eindeutige Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz. Der Luftvolumenstrom, der sich aus der CFD-Rechnung ergibt, liegt praktisch genau auf dieser Kennlinie. Bei gleichen Differenzen Lufttemperatur stimmen die Ergebnisse also sehr gut überein.

Vergleich CFD – Messungen in der Wohnung

Ein ähnlicher Vergleich lässt sich nun auch noch zwischen der CFD-Rechnung und Resultaten aus Messungen in der Wohnung durchführen. Von Interesse waren vorwiegend die konvektiven Luftströmungen, die sich bei einer starken Wärmequelle im Wohnbereich zwischen EG und OG einstellen. Daher wurde bei den Messungen nicht versucht, die radiative und konvektive Wärmeabgabe eines Ofens exakt nachzubilden. Vielmehr wurde anstelle eines richtigen Ofens eine konvektive Wärmequelle eingesetzt. Die Maximalleistung entsprach in etwa der halben maximalen Ofenleistung bei einmaligem Einfeuern in der Simulation.

Bei der Messung wurde nicht der Volumenstrom ermittelt, sondern die Luftgeschwindigkeit in vier Höhen im Durchgang vom Korridor im Erdgeschoss zur Treppe. Diese sind zusammen mit der konvektiven Heizleistung in Figur 5-8 aufgetragen. Die Geschwindigkeit an der zweituntersten Stelle ist durchwegs die geringste. Zum Boden hin nimmt die Geschwindigkeit leicht zu, hier strömt die Luft in das Erdgeschoss. Nach oben hin nimmt sie erst leicht und dann stark zu. Ausser an der obersten Stelle in etwas mehr als 2 m Höhe werden aber keine kritischen Werte erreicht. Die im Durchgang gemessenen Geschwindigkeiten passen sehr gut zusammen mit dem Strömungsbild, das mittels CFD berechnet wurde.



Figur 5–9: Messung in der Maisonettewohnung Stans; Luftgeschwindigkeiten nahe der Decke des Erdgeschosses im Durchgang vom Korridor im Erdgeschoss zur Treppe aus den Messungen (Rauten) im Vergleich mit dem Wert aus der CFD-Rechnung (Dreieck). Die Differenz wurde zwischen dieser obersten Messstelle im Durchgang und einer Stelle im hinteren Teil der Galerie (nahe der Nordwand) ermittelt.

Die gemessenen Luftgeschwindigkeiten an der obersten Messstelle im Durchgang sind in Figur 5-9 gegen die Temperaturdifferenz zwischen dieser Stelle und einer Stelle im hinteren Teil der Galerie aufgetragen. Beide Ofenzyklen zeigen dieselbe Charakteristik, und wiederum stimmt die CFD-Rechnung auch sehr gut mit den Messdaten überein. Damit sind die mit der thermischen / Luftströmungssimulation ermittelten Werte gut reproduzierbar.

Schlussfolgerung

Eine Temperaturdifferenz zwischen Wohnraum und Galerie von 1 K bis 3 K ist verbunden mit einem Luftvolumenstrom von 250 m³/h bis 500 m³/h in jede Richtung. Damit beträgt der Wärmestrom nach oben zwischen knapp 100 W und knapp 500 W. Der genaue Wert des Luftvolumenstroms dürfte noch von der Anordnung der Räume, des Ofens im Raum und nicht zuletzt vom Querschnitt des Treppenbereichs abhängen. Sicher ist allerdings der von der Lüftungsanlage aufgeprägte Strom (in diesem Fall 30 m³/h von oben nach unten) klein gegen die thermisch bewegten Luftmassen.

5.3. Betrieb eines Holzofens in einem Passivhaus

Zuführung der Verbrennungsluft

Für den Betrieb eines Holzofens in einem Passivhaus ergeben sich einige Unterschiede zum Betrieb in konventionellen Gebäuden. Normalerweise wird die Verbrennungsluft aus der Raumluft entnommen. Das dem Ofen zur Verfügung stehende Luftvolumen muss eine bestimmte Grösse haben, und das Nachströmen der Luft in den Aufstellraum muss gewährleistet sein. Im Passivhaus müsste die Hülle also eine zusätzliche Öffnung bekommen, oder die Lüftungsanlage müsste in der Lage sein, im Ofenbetrieb die zusätzliche Verbrennungsluft bereit zu stellen. Über den Kamin besteht normalerweise eine zusätzliche Leckage, die Wärmeverluste verursacht, wenn der Ofen nicht in Betrieb ist. In einem Passivhaus sind Undichtigkeiten in diesem Ausmass aber nicht tolerierbar.

Sicherheit

Es kann zudem immer (ungewollte) Situationen geben, in denen Luft aus dem Ofen in den Raum gelangt (zu geringer Zug im Kamin). Im Normalfall tritt dies vor allem beim Einfeuern bzw. Nachlegen von Holz auf, und wird damit direkt bemerkt. Im Parallelbetrieb mit einer Lüftungsanlage kann auch

durch nicht vorhergesehene Betriebszustände der Lüftungsanlage, im Extremfall dem Ausfall des Zuluftventilators, Luft aus dem Ofenraum in den Wohnraum gelangen, was unter Umständen nicht sofort bemerkt wird.

Rauchgase enthalten Schadstoffe, insbesondere Kohlenmonoxid, das schon in relativ geringen Konzentrationen tödlich sein kann. Ein Rückströmen von Rauchgasen in den Wohnraum muss daher unter allen Umständen vermieden werden.

Raumlufunabhängiger Betrieb

Die einzige sichere Lösung besteht in der luftdichten Abtrennung des Feuerraums vom Gebäudeinneren. Das "Gehäuse" des Ofens muss luftdicht sein. Ofentüren (Feuerung und Aschekasten) müssen im geschlossenen Zustand entsprechend dicht sein und sollten eine selbsttätige Verriegelung haben. Auch alle Anschlüsse müssen luftdicht ausgeführt werden.

Damit ist es auch erforderlich, die Verbrennungsluft raumlufunabhängig zuzuführen. Dies geschieht über eine Luftleitung von aussen mittels eines kleinen Lüfters. Auch für die Abfuhr der Rauchgase empfiehlt sich eine Unterstützung durch einen Rauchabzugventilator.

Lüftungsanlage und Luftdichtigkeit

Durch die raumlufunabhängige Zuführung der Verbrennungsluft und die Abdichtung des Verbrennungsraums gegen das Gebäudeinnere ist gleichzeitig mit der Sicherheit auch gewährleistet, dass sich Ofen und Lüftungsanlage nicht gegenseitig beeinflussen.

Es entstehen auch keine zusätzlichen Wärmeverluste durch die Zuführung der Verbrennungsluft über die Raumluft, oder durch die direkte Verbindung über den Kamin mit der Aussenluft. Einzig die Auskühlung des Feuerraums durch eine dauerhaft vorhandene Verbindung zwischen Feuerraum und Aussenluft führt, wenn der Ofen nicht in Betrieb ist, noch zu zusätzlichen Wärmeverlusten. Da dies immer noch nicht unerhebliche Verluste sein können, sollten daher auf jeden Fall dichtschliessende Klappen in der Verbrennungsluftzufuhr eingesetzt werden. Falls zulässig, sollten auch dichtschliessende Rauchklappen im Kamin eingebaut werden.

Wärmeabgabe und -verteilung vom Ofen

Zeitliche Aspekte

Die Wärmeabgabe eines Holzofens variiert zeitlich sehr stark. Die Leistungsspitze kann vermindert werden durch eine Erhöhung der Wärmespeicherfähigkeit des Ofens, oder durch eine kleinere Leistung (weniger Holz) und häufigeres Einfeuern. Während die Abgabeleistung des Ofens schnell ansteigt und ihr Maximum nach ca. ein bis zwei Stunden erreicht, wird das Maximum der Raumtemperatur später erreicht. Die Verzögerung hängt ab von der Ofenleistung im Verhältnis zur Raumgröße, und von der Speicherfähigkeit der Umhüllungsflächen. Im gerechneten Beispiel (massive Innenwände, ansonsten Leichtbauweise) war das Maximum der Abgabeleistung nach einer Stunde erreicht, das Maximum der Raumtemperatur im Raum trat mit ca. 3 bis 4 h Verzögerung auf.

Räumliche Aspekte

Während der Beheizung über die Lüftungsanlage mit Lufterwärmung wird die Wärme verteilt in mehrere Räume eingebracht. Die Temperaturdifferenzen sind im Allgemeinen gering, und sind auch durch die Nutzung und die solaren Gewinne mitbestimmt. Im Beispiel ist das Obergeschoss im Mittel um ca. 1 K wärmer, weil dort mehr Luft – und damit Wärme – eingebracht wird, und zudem die Verluste geringer sind (kein Boden gegen Keller). Vor allem bei ständiger Beheizung mit einem Ofen kehren sich die Verhältnisse um. Wärme wird nur noch im Wohnraum im Erdgeschoss eingebracht, im Obergeschoss, und in geringerem Mass im nordorientierten Zimmer im EG, entsteht dagegen zusätzlicher Heizbedarf, um die Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluft auszugleichen. Dadurch liegen die Temperaturen im Obergeschoss nun unter denjenigen der Räume im Erdgeschoss. Die Temperaturdifferenzen zwischen dem Wohnraum mit Ofen und den anderen Räumen haben sich nach etwa einem Tag etabliert. Trotz der sehr ungleichen Wärmeeinspeisung treten aber nur geringe Temperaturdifferenzen: im Mittel beträgt die Differenz zwischen Wohnen und Zimmer im EG Nord ca. 2 K, diejenige zwischen Wohnen und OG (alle Räume im OG sind im Mittel relativ gleich) ca. 4 K, und zwischen EG und OG ca. 2.5 K. Interne und solare Gewinne bestimmen in den Räumen im OG immer noch wesentlich die Schwankungen der Raumlufttemperatur, während ihr Mittelwert von der Wärmeverteilung in der Wohnung bestimmt wird.

6. Weitere Systemfragen

Da die Luftheizung ein Teil des Lüftungssystems ist, kann sie nicht getrennt von diesem betrachtet werden. Es ist aber nicht Sinn und Zweck dieses Berichtes, auf die vielen Fragen im Zusammenhang mit der Auslegung einer Lüftungsanlage im Passivhaus im Detail einzugehen. In diesem Sinne konzentrieren sich die folgenden Ausführungen vor allem auf den Unterschied zwischen einer Lüftungsanlage mit Lufterwärmung und einer einfachen Lüftungsanlage ohne Lufterwärmung. Im Vordergrund steht dabei der Winterbetrieb mit Heizung. Fragen des Lüftens in der Übergangszeit (Bypass Wärmetauscher etc.) und vor allem im Sommer (passive Kühlung durch Nachtlüften) werden nicht angesprochen.

Normen, Richtlinien, Merkblätter

Grundlegend sind sicher die Publikationen des PHI: [AKKP 17], speziell [Feist 1999b], [Werner], und [PHI 99/7]. In der Schweiz war die Lüftungsnorm SIA 382/1 bei Drucklegung dieses Berichtes in Überarbeitung, und auch ein spezielles Merkblatt des SIA zur Wohnungslüftung war erst am Entstehen [SIA 2023]. Zudem sind die meisten der neueren Publikationen in der Schweiz auf das Gebäude gemäss MINERGIE-Standard ausgerichtet. Viele darin aufgelistete Punkte gelten natürlich auch für ein Passivhaus-Lüftungssystem. So kann z.B. der Planer Kit [KL-A] und die technischen Ergänzungen dazu [KL-L], auch für Passivhäuser angewendet werden.

Auch in den Bereichen Schallschutz und Brandschutz werden die Normen und Richtlinien momentan überarbeitet: Dies gilt für die SIA 181 [SIA 181], und auch die überarbeiteten Richtlinien des VKF sind erst 2004 verfügbar (siehe Abschnitt Brandschutz).

6.1. Lüftung

Küchenabluft, erhöhter Luftwechsel

Weil die Gebäudehülle des Passivhauses sehr dicht ist, muss eine Erhöhung der Abluftrate in einem Raum durch eine entsprechende Erhöhung der Zuflutrate ausgeglichen werden, ein sonstiges Nachströmen findet nicht statt. Somit muss also das gesamte Lüftungssystem (Gerät, Heizregister, Kanäle, Durchlässe) auf die gewünschten Luftraten dimensioniert werden.

Insbesondere Abzughäuben über dem Herd haben hohe Abluftarten, und die Abluft ist stark verschmutzt. Es macht also wenig Sinn, das ganze Lüftungssystem auf die Küchenabluft auszurichten. Eine Lösung steht deshalb im Vordergrund: Die Umluftabzugshaube. Diese kann eine hohe Absaugleistung haben, ohne dass das Lüftungssystem (und die Raumheizung) beeinflusst werden. Wird eine Haube mit separater Fortluftführung eingesetzt, ist unbedingt eine separate Nachströmöffnung in der Küche vorzusehen. Je nach dem, wie lange die Haube betrieben wird, ist zudem mit einer Absenkung der Raumtemperaturen (nicht nur in der Küche!) zu rechnen, die eventuell infolge der begrenzten Heizleistung nicht sofort wieder auf das gewünschte Niveau gebracht werden können. Eine Fortluftshaube kommt somit in Wohn-

küchen kaum in Frage. Wichtig ist auch, dass die Türen zu den Nachbarräumen geschlossen werden, wenn die Fortlufthaube in Betrieb ist.

Fensterlüftung

Eine kurzfristig grosse Luftbelastung in einem Raum kann durch ebenfalls kurzzeitige Fensterlüftung (Stosslüftung), am besten als Querlüftung, abgeführt werden. Damit verbunden ist natürlich eine temporäre Beeinträchtigung des thermischen Komforts im betroffenen Raum (oder Räumen), die aber akzeptiert wird, weil die Stosslüftung ja durch den Bewohner selber bewusst initiiert wird. Auch hier ist wichtig, dass die Türen zu den Nachbarräumen in diesem Zeitraum geschlossen sind.

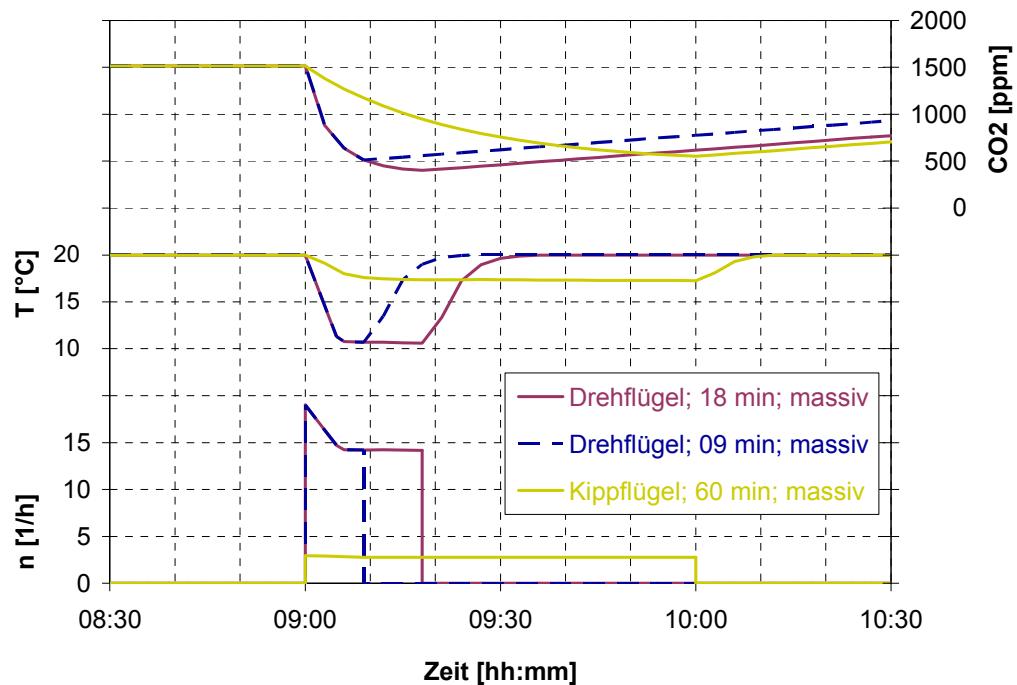
Bei der Stosslüftung wird nur die Raumluft durch (kalte) Aussenluft ersetzt, die Wände und sonstige Einrichtungen kühlen sich aber in dieser kurzen Zeit (10 – 15 min) nicht ab und bleiben auf der ursprünglichen Raumtemperatur. Damit wird aber nach Schliessen des Fensters die Luft auch rasch wieder erwärmt.

Figur 6-1 zeigt den Verlauf der Raumlufttemperatur und der CO₂-Konzentration in einem Raum bei einer Stosslüftung nach einer hohen Belastung. Dazu ist jeweils noch der Luftwechsel aufgetragen. Die Drehflügel werden für 9 bzw. 18 Minuten geöffnet, der Kippflügel wird für eine Stunde geöffnet. Bei dem Drehflügel ist es nicht sinnvoll, länger als 9 Minuten zu Lüften, da danach die Konzentration nur noch marginal sinkt. Die Lüftung mit Kippflügel erreicht denselben Wert der CO₂-Konzentration erst nach etwa einer Stunde.

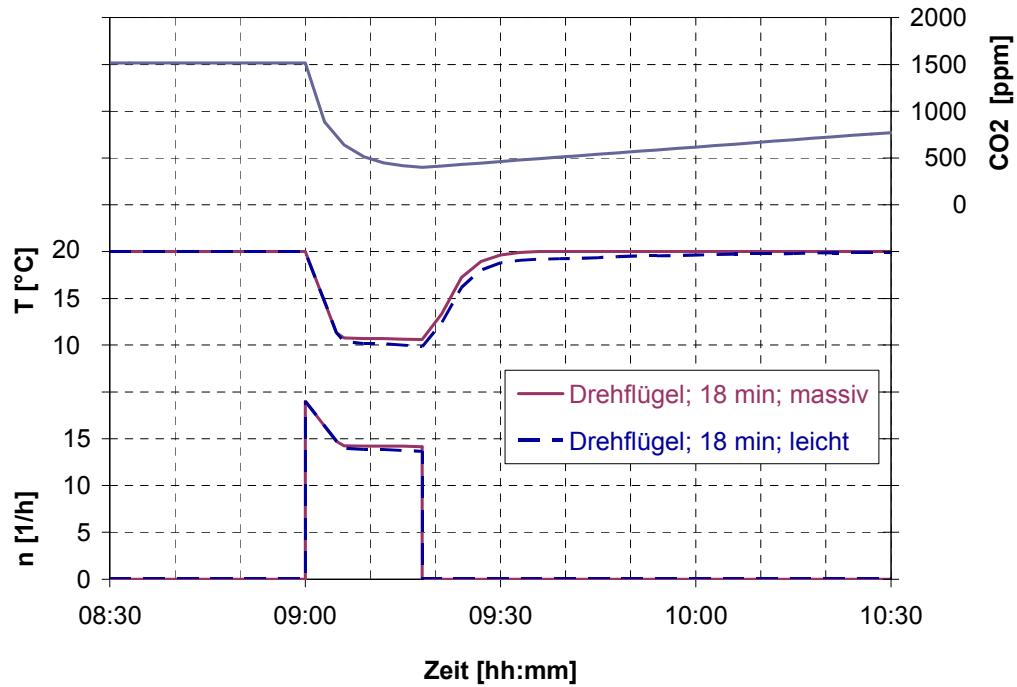
Figur 6-2 zeigt die Unterschiede zwischen Massivbau und Leichtbau bei einer Stosslüftung von 18 Minuten. Der erste steile Abfall der Temperatur und der Konzentration ist praktisch identisch. Erste, wenn auch sehr kleine Unterschiede zeigen sich, wenn auch die Wände anfangen auszukühlen. Allerdings ist auch hier die unterschiedliche Speicherfähigkeit kaum zu sehen. Grössere Unterschiede gibt es erst beim Wiederaufheizen. Der Leichtbau braucht deutlich länger, um die ursprüngliche Temperatur wieder zu erreichen. Die Unterschiede in der Temperatur betragen aber dennoch höchstens 1 K.

Kurzes Stosslüften ist damit auch im Passivhaus eine geeignete Methode, um kurzfristige hohe Belastungen der Luft effizient abzutransportieren.

Sind die Belastungsquellen aber eher lang andauernd vorhanden, ist ein kontinuierlicher Abtransport (mit dem mechanischen Lüftungssystem) wirksamer als die Stosslüftung. Dies gilt insbesondere für Belastungen, die in einem Austausch (Adsorption/ Desorption) mit den Wänden und den Einrichtungen stehen (Feuchte, teilweise auch Schadstoffe). Hier verhält es sich wie mit den Temperaturen: Eine Stosslüftung senkt die Konzentration rasch (auf die Aussenkonzentration), aber nach Schliessen des Fensters wird durch die Desorption von den Wänden bald wieder der ursprüngliche langzeitliche Gleichgewichtszustand erreicht. Siehe hierzu auch die Resultate von Messungen in Gebäuden [Münzenberg], [Münzenberg2].



Figur 6-1: Verlauf der CO₂-Konzentration (oben) und der Raumlufttemperatur (Mitte), sowie des Luftwechsels (unten), in einem Raum bei einer Stößlüftung. Die Drehflügel werden 9 bzw. 18 Minuten geöffnet, der Kippflügel wird 1 h geöffnet



Figur 6-2 Verlauf der CO₂-Konzentration (oben) und der Raumlufttemperatur (Mitte), sowie des Luftwechsels (unten), in einem Raum bei einer Stößlüftung von 18 Minuten mit einem Drehflügel. Dargestellt ist der Verlauf bei einem Massivbau und bei einem Leichtbau.

6.2. Schallschutz

Wichtig ist, dass die Schallschutzmassnahmen am Gebäude integral geplant werden. Die Massnahmen in der Lüftungsanlage müssen dem Anforderungsniveau des Gebäudes und somit den restlichen Schallschutzmassnahmen im Gebäude entsprechen.

Im Passivhaus bestehen keine wesentlichen Unterschiede zur normalen Lüftungsanlage. Auch hier wird das Prinzip der Kaskadenlüftung angewendet. Dazu kommt lediglich, dass die Räume mit Zuluft auch mit Wärme versorgt werden, die dann über die Lüftung, Konvektion (bei offenen Türen) und Transmission an die Räume ohne Zuluft weitergegeben wird (siehe Abschnitt 3.4).

Damit ergeben sich auch bezüglich des Schallschutzes nur wenige Unterschiede im Vergleich zur einfachen Lüftungsanlage (ohne Heizfunktion).

Allerdings muss beachtet werden, dass die hoch gedämmte Aussenhülle des Passivhauses in aller Regel auch eine grosse Dämmung gegen Außengeräusche gewährt. Damit ist aber der Hintergrundschallpegel in den Räumen sehr tief. Geräusche im Innern werden deshalb intensiver wahrgenommen, was auch für Anlagengeräusche gilt. Insbesondere für Schlafzimmer ist deshalb ein Schalldruckpegel der Lüftungsanlage von unter 25 dBA erforderlich. Für Überströmzonen und Ablufträume sind 30 dBA genügend.

Dies entspricht auch in etwa den Angaben in [Werner] und [KL-L]. Auch hier ist jedoch zu beachten, dass die entsprechenden Normen Richtlinien und Merkblätter noch in Bearbeitung sind, und die Anforderungen im Detail noch nicht feststehen.

6.3. Brandschutz

Verbindlich für Fragen des Brandschutzes sind die Brandschutznorm [VKF-N] der Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen (VKF). Eine Neufassung dieser Brandschutznorm, die auch für Wohnungslüftungssysteme gelten soll, ist zurzeit in Vernehmlassung. Sie tritt voraussichtlich 2004 in Kraft und wird von allen Kantonen anerkannt [Läng]. Weitere Angaben finden sich in der Brandschutzrichtlinie "Lufttechnische Anlagen" [VKF-R]. Zusätzlich zu obigen Richtlinien besteht ein Arbeitspapier "Anforderungen an Lüftungsleitungen" (angewendet u.a. im Kt. Zürich), das auch Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser betrifft.

Zudem gelten aber zum Teil Vorschriften auf Ebene Kanton (z.B. Kt. Zürich [VbB]) und sogar Gemeinde. Generell gültige Aussagen sind deshalb schwierig zu machen.

Beim Luftheizsystem betreffen die Fragen des Brandschutzes vor allem die Kanäle und Schalldämpfer (Material) und das Heizregister (maximale Temperatur). In einem Infoblatt [AFS] steht u.a., dass die Temperaturbegrenzung so sein soll, dass Zuluft 40°C nicht übersteigen kann. Die Verbindlichkeit dieses Infoblattes ist aber unklar.

Bezüglich Anordnung der Luftverteilung sind gemäss unseren Erkenntnissen keine Unterschiede zum normalen Lüftungssystem auszumachen.

Für Mehrfamilienhäuser wesentliche Punkte sind dabei:

- Verteilung innerhalb der Wohnung oder des Brandabschnitts kann wie im EFH ausgeführt werden.
- Brandschutzklappen oder feuerwiderstandsfähige Kanäle, um
 - Feuerausbreitung über Lüftungsanäle zu verhindern
 - Fluchtweglüftung zu sichern

6.4. Kanalnetz

Belastungen aus dem Luftheizsystem

Ausser Emissionen infolge höherer Zulufttemperatur (siehe nächster Abschnitt) sind keine grossen Unterschiede zum Lüftungssystem ohne Lufterwärmung feststellbar. Leckagen im Gerät (Wärmetauscher) und in den Kanälen können zu einer Übertragung von Belastungen in der Abluft in die Zuluft führen. Dies ist insbesondere für Mehrfamilienhäuser problematisch. Auch sonstige Leckagen zwischen den Wohnungen (Durchdringungen von Kabeln, gemeinsame Steigschächte etc.) können bei Druckunterschieden zwischen den Wohnungen zu einer Übertragung von Belastungen, insbesondere Gerüchen, führen.

Im neuen SIA Merkblatt über Wohnungslüftung [SIA 2023] und auch in der neuen SIA 382/1 wird diese Problematik behandelt werden.

Temperaturbeständigkeit und Emissionen

Materialien für die Kanäle und die Schalldämpfer müssen im Bereich der erwärmeden Zuluft nach dem Heizregister auf die erhöhten Temperaturen ausgelegt sein. Dies gilt nicht nur bezüglich Temperaturbeständigkeit, sondern vor allem auch bezüglich möglicher Emissionen aus dem Material, die die Zuluft direkt belasten würden. Insbesondere in Schalldämpfern und in innen gedämmten Kanälen könnten problematische Materialien (Schaumstoffe etc) verwendet werden. Häufig wird in diesen Fällen jedoch Mineralwolle bzw. Mineralwolle mit einer Glasvliesabdeckung verwendet, die bezüglich Emissionen unkritisch sind. [Gierzak] verschiedene Auskleidungen von Schalldämpfern, die aus Schaumstoffen bestehen, bzw. organische Verbindungen als Faserbeschichtungen verwenden. Für die untersuchten Materialien werden maximale Temperaturen im Bereich 100°C bis 135°C angegeben. Über Ausgasungen werden keine Angaben gemacht.

Dazu muss man sich bewusst sein, dass ungeachtet des Belastungsgrades warme Luft subjektiv eher als belastet beurteilt, während kalte Luft eher als frisch empfunden wird.

6.5. Nachheizregister

Anforderungen

Die Anforderungen an das Nachheizregister sind ein kleiner Strömungswiderstand und eine effiziente Wärmeübertragung an die Zuluft. Dies soll für alle Luftraten gelten, mit denen das System betrieben wird.

Wärmeträger

Der Wärmeträger und somit auch die Konstruktion des Heizregisters hängen natürlich von der Art der Wärmeerzeugung ab. Daher stehen als Wärmeträger einerseits Wasser aus dem Kombikessel oder dann direkt das Kältemittel der Wärmepumpe im Vordergrund. Zum Thema Wärmeerzeugung siehe Abschnitt 6.6, sowie auch Abschnitt 6.7 (Primärenergiebedarf).

Staubverschwelung

Im Zusammenhang mit der Auslegung von Lüftungsanlagen mit Luftherwärmung für Passivhäuser wird eine mögliche Belastung der Zuluft durch Staubverschwelung bei zu hohen Temperaturen am Luftheritzer und ggf. an der Aussenseite des Luftkanals angeführt. Deshalb soll die Zulufttemperatur auf eine maximale Temperatur von etwa 50°C begrenzt werden.

Aussagen über maximale Temperaturen infolge Staubverschwelung sind in vielen Informationen über Heizung und Heizkörper im Allgemeinen, und der Literatur über Passiv- und Niedrigenergiehäuser, und in Angaben der Gerätehersteller zu finden. Die Temperaturangaben variieren dabei von ca. 50°C bis zu 130°C, mit der Mehrzahl der Angaben bei 50°C bis 60°C. Das Passivhaus Institut zitiert einen Schwellwert von 70°C [Flügge], ohne dies durch eine andere Veröffentlichung oder Messungen zu belegen. Schwelgase werden in diesem Artikel dafür verantwortlich gemacht, dass die Luft bei einer Niederdruckdampfheizung als zu trocken empfunden wird, nicht dagegen bei einem Kachelofen oder einer Warmwasserheizung.

Literaturrecherchen ergaben keine neuen Erkenntnisse, und auch in den einschlägigen Lehr- und Fachbüchern finden sich keine zusätzlichen Aussagen. [Ihle] gibt eine Temperaturbegrenzung auf ca. 60°C an, begründet diese aber mit der Verteilung der Zuluft im Raum (Verkürzung der Wurfweite aufgrund von Auftrieb).

Folgerung

Da es sehr verschiedene Arten von Staub gibt, ist durchaus denkbar, dass Probleme von Staubverschwelung bei unterschiedlichen Temperaturen feststellbar sind. Insgesamt scheint die Postulierung einer Temperaturgrenze von 50°C bis 60°C aus Gründen der Staubverschwelung jedoch vertretbar.

6.6. Wärmeerzeugung

Energiekonzept - Primärenergiebedarf

Die Art der Wärmeerzeugung hängt von dem für das Gebäude gewählten Gesamt-Energiekonzept ab, in dem einerseits der Wärmebedarf für Raumheizung und Warmwasser und andererseits auch der Strombedarf berücksichtigt werden. Als energetisches Beurteilungskriterium gilt der Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie, für dessen Bestimmung die Anteile der einzelnen Versorgungssysteme berücksichtigt werden müssen, siehe Abschnitt 6.7.

Möglichkeiten für die Wärmeerzeugung

Ist Heizen über die Zuluft überhaupt sinnvoll?

Ein Argument gegen die Lüftungsanlage mit Luftherwärmung ist, dass eine Niedertemperatur-Bodenheizung Solarenergie infolge des tieferen Energie-Niveaus besser nutzen könnte. Allerdings muss beachtet werden, dass eben der Energiebedarf für die Warmwasseraufbereitung in der Regel denjenigen für die Heizung übersteigt, und dass Warmwasser auf einem Temperaturniveau von mindestens 50°C bereitgestellt werden muss. Auf eine Nachheizung kann deshalb in den meisten Fällen im Winter schon wegen der Warmwasserbereitstellung nicht verzichtet werden. Sowohl für die Heizungsfunktion als auch für die Warmwasserbereitung kann die Solarenergie jedoch zur Vorwärmung benutzt werden (der Wärmetauscher der Kollektoranlage befindet sich stets ganz unten im Warmwasserspeicher).

Direkt elektrisch

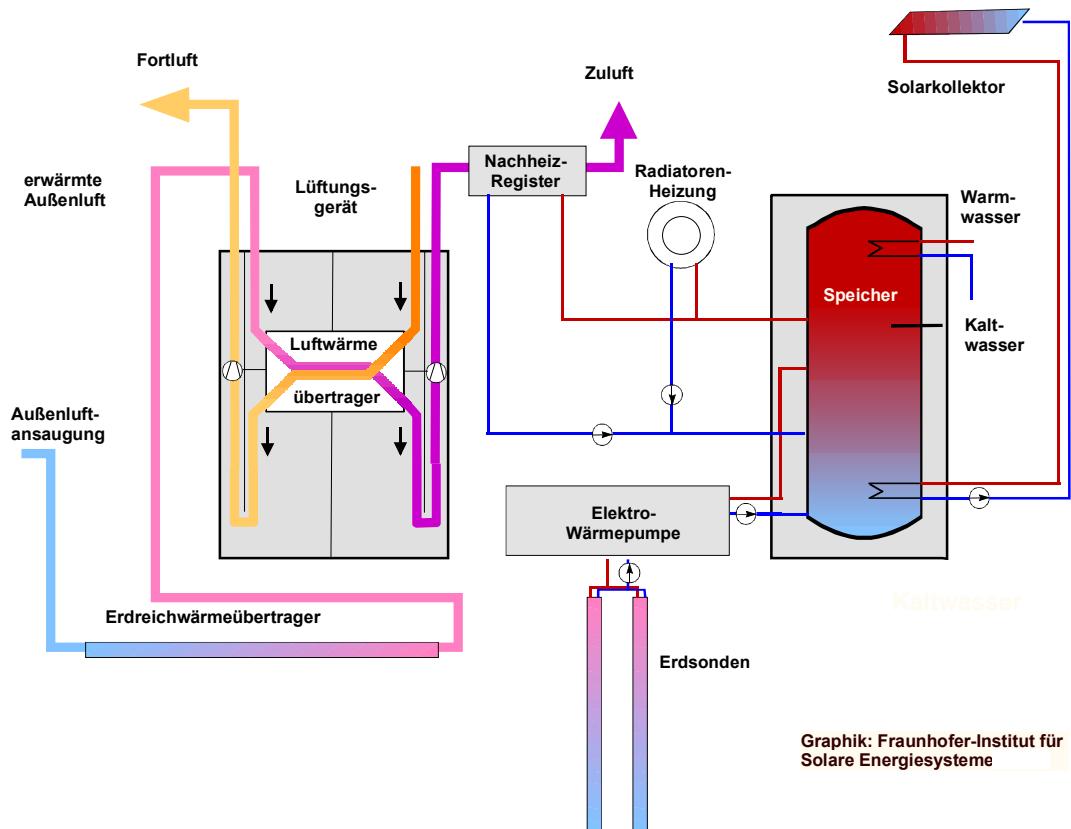
Eine direkte elektrische Erwärmung der Zuluft ist einfach zu installieren, und auch eine dezentrale Erwärmung der Zuluft innerhalb der Wohnung ist leicht möglich. Eine rein direkt elektrische Erwärmung ist aber im Hinblick auf das Ziel einer Gesamt-Energieeinsparung nicht sinnvoll.

Gas- und Öltherme, Holzofen

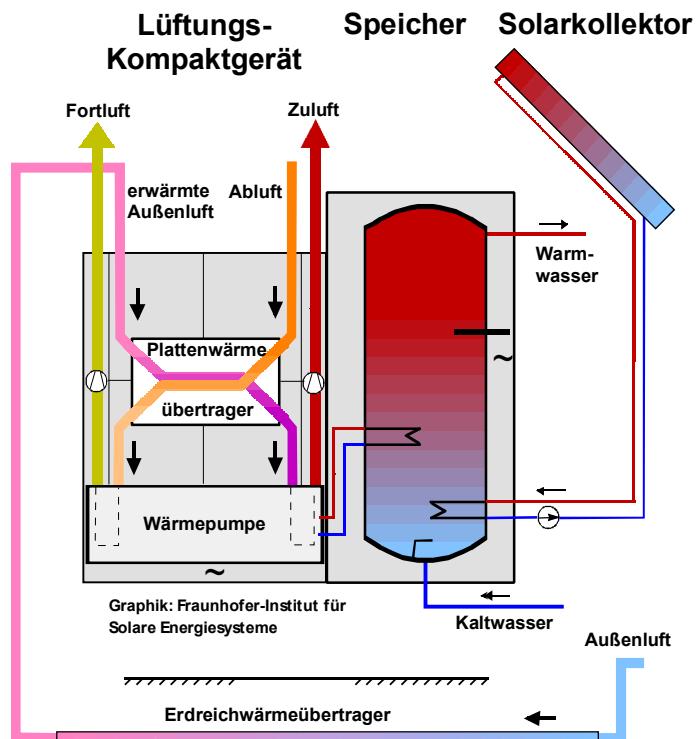
Bei der Wärmeerzeugung mit einer Gas- oder Öltherme, oder auch mit einem Holzkessel, wird ein Kombispeicher verwendet, aus dem einerseits Warmwasser und andererseits das Zuluft-Heizregister gespeist werden. In Kombination mit thermischen Solarkollektoren wird bei beiden Varianten ein Schichtspeicher verwendet.

Wärmepumpensysteme

Für Wärmepumpensysteme sind zwei Varianten der Kombination mit einer Lüftungsanlage mit Luftherwärmung verbreitet: Modulare Systeme und Komplettgeräte. Beim modularen System (Figur 6-3) wird wie bei einem Heizkessel ein Kombispeicher verwendet. Die Wärmepumpe gibt ihre Wärme an den Kombispeicher ab, aus dem einerseits Warmwasser und andererseits das Zuluft-Heizregister gespeist werden. Die Wärmequelle der Wärmepumpe kann frei gewählt werden.



Figur 6-3 Modulares System mit Erdsonden-WP.
Quelle: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme [Bühring 2003].



Figur 6-4 Kompaktgerät mit Abluft-WP.
Quelle: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme [Bühring 2002].

Kompaktgeräte

Kompaktgeräte verbinden die Komponenten für Lüftung, Luftheizung und Warmwasseraufbereitung in einem Gerät. Kompaktgeräte wurden für den Einsatz in Passivhäusern entwickelt. Beim Kompaktgerät (Figur 6-4) wird die Abluft nach der WRG noch als (eine) Wärmequelle genutzt. Ist die Abluft die einzige Wärmequelle für die WP, dann ist in der Regel ein zusätzlicher Heizstab im Speicher erforderlich. Die Wärmepumpe hat meist zwei Kondenser, den einen im Speicher und den anderen direkt im Zuluft-Heizregister. Seit neuestem sind nun auch Geräte für den Einsatz in den einzelnen Wohnungen eines MFH erhältlich. Eine Übersicht über die erhältlichen Geräte findet sich z.B. in [Bühring 2003].

In diesem Beitrag wird auch gezeigt, dass in Messungen an 25 Häusern mit modularen Systemen (mit Erdsonden-WP) der flächenspezifische Haustechnik-Stromverbrauch mit $20.0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ deutlich höher lag als der in 24 Häusern mit Kompaktgeräten (mit Abluft-WP) gemessene mit $16.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Obwohl die Erdsonden-WP eigentlich effektiver sein sollte, ergeben sich durch die Möglichkeit der besseren Abstimmung der Komponenten bessere Werte für die Kompaktgeräte.

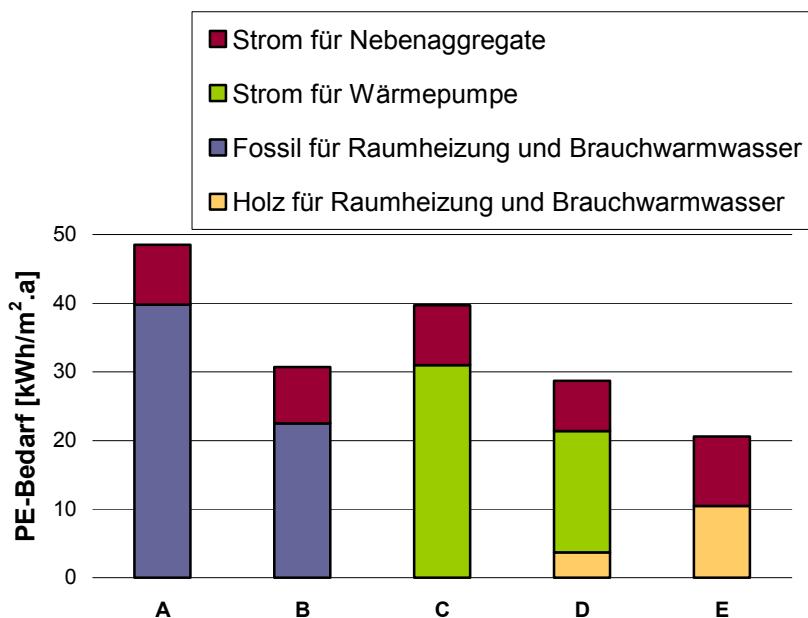
Solarwärme

Standardisierte Solarkollektoranlagen decken heute etwa 60% bis 70% des Warmwasserbedarfs eines EFH. Eine etwas grössere Kollektorfläche und ein etwas grösserer Speicher können auch in der Übergangszeit – und bei entsprechender Orientierung und günstigem Klima auch im Winter – einen namhaften Beitrag zur Raumheizung liefern. Für den Kernwinter wird eine ergänzende Wärmequelle benötigt.

6.7. Primärenergiebedarf - Energieversorgung

Der Primärenergiebedarf hängt stark von der gewählten Art der Versorgung ab. Das Thema "Energieversorgung im Passivhaus" war aber nicht Gegenstand des vorliegenden Projektes. Trotzdem sollen hier einige Gedanken wiedergegeben werden, die die spezifischen Aspekte im Zusammenhang mit der Wärmebereitstellung für eine Lüftungsanlage mit Luft erwärmung im Abschnitt 6.6 (Wärmeerzeugung) ergänzen.

Neben der Umgebungswärme ist Sonnenenergie sicher die hauptsächlichste erneuerbare Energiequelle. Mit Solarkollektoren können wesentliche Teile des Energiebedarfes sowohl für das Brauchwarmwasser wie auch für die Raumheizung gedeckt werden. Mit Photovoltaik (PV) kann auch ein Beitrag an die Stromversorgung geleistet werden. Der Anteil der mechanischen Lüftungsanlage am gesamten Strombedarf im Passivhaus ist recht klein und könnte z.B. mit einer PV-Anlage von $3 - 5 \text{ m}^2$ gedeckt werden (natürlich nur im Mittel, ein Netzanschluss ist für den Ausgleich Tag/Nacht und saisonal nötig).



Figur 6-5 Typischer Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie für verschiedene Energieversorgungskonzepte eines Passivhauses (ohne Haushaltsstrom):

- A Kondensierende Gastherme
- B Kondensierende Gastherme, optimiert und integriert in Kompaktgerät, mit Solarkollektor für Warmwasser
- C Erdreich-Wärmepumpe
- D Holzofen für Raumheizung und Erdreich-Wärmepumpe für Warmwasser
- E Zentraler Holzkessel mit Speicher

Grundlagen und Annahmen siehe [Feist]

Eine direkte elektrische Wärmebereitstellung ist energetisch höchstens dann sinnvoll, wenn mit ausschliesslich oder mehrheitlich regenerativen Ressourcen erzeugter Strom verwendet wird, oder wenn ein Elektroheizstab im Speicher für wenige Tage in der kältesten Zeit zur Spitzenlastdeckung eingesetzt wird. Eine solche Zusatzheizung kann auch im Passivhaus nötig sein, wenn die Heizenergie nur auf einem Temperaturniveau unter 50°C zur Verfügung steht (Solaranlage, Wärmepumpe).

Für normalen Netzstrom ist der Primärenergiefaktor zu hoch. Soll mit Strom geheizt werden, dann ist eine Wärmepumpe einzusetzen.

Eine bessere Kongruenz zwischen Bedarf und Angebot ergibt sich mit kleinen WKK-Anlagen mit Gasmotor, Stirling-Motor oder Brennstoffzelle, dies vor allem in der Winterperiode. Ausserhalb der Heizperiode besteht aber zuwenig Bedarf für die Wärme, die bei lokaler Stromproduktion anfallen würde.

In Mittel- und Nordeuropäischen Ländern bietet sich auch die Nutzung von Holz als erneuerbarer Energiequelle. In diesem Projekt wurde untersucht, inwieweit im Bezug auf thermischem Komfort und Wärmeverteilung ein im Wohnraum aufgestellter Ofen für die Raumheizung eingesetzt werden kann, siehe Kapitel 5.

Figur 6-5 illustriert, welchen Einfluss verschiedene Versorgungskonzepte typischerweise auf den Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie haben können. Bei Holz wurde hier ein Primärenergiefaktor von 0.2 für die Bereitstellung von Holzpellets berücksichtigt. Die Beispiele wurden [Feist] entnommen.

6.8. Inbetriebnahme, Abnahme, Unterhalt

Unterlagen zur Inbetriebnahme und zur Abnahme von Wohnungslüftungsanlagen finden sich in [prEN 14134], [SIA 2023], [KL-Q], [Werner] und sinngemäß [SWKI-96-5]. Allerdings wird darin nicht speziell auf den Aspekt der Luftheizung eingegangen.

Bezüglich Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung zu prüfen sind insbesondere:

- die einwandfreie Funktion der Lüftungsanlage als wesentliche Voraussetzung
 - einzelne Luftraten, Gesamtluftrate
 - Wärmeübertragung und Luftraten am Wärmetauscher
- Leistung des Heizregisters für die verschiedenen Luftraten und die verschiedenen Vorlauftemperaturen
- Zulufttemperaturen in den einzelnen Räumen, zur Kontrolle, ob nicht bereits eine ungewünschte Wärmeabgabe in den Kanälen stattfindet
- Raumlufttemperaturen an kalten Tagen.

Die Überprüfung der Heizungsfunktion bei Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung ist aufwendig. Trotzdem ist sie unerlässlich, da in der Regel keine anderen Systeme vorhanden sind die einen Mangel in der Lufterwärmung ausgleichen können.

Bezüglich Hygiene orientiert man sich an der [SWKI 2003-5]. Allerdings muss im Rahmen der Schweizer Normierung die Anwendung im Wohnungslüftungsbereich noch genauer festgelegt werden.

7. Lüftungsanlage mit Lufterwärmung in "Beinahe-Passivhäusern"

7.1. Allgemeines

In diesem Kapitel soll auf die Unterschiede zwischen der Lüftungsanlage mit Lufterwärmung im Passivhaus und dem Lüftungs- und Heizsystem für ein Gebäude mit tieferem Dämmstandard und somit höherem Heizleistungsbedarf ("Beinahe-Passivhaus") eingegangen werden, wobei die Unterschiede zwischen einer Lüftungsanlage mit Lufterwärmung im Passivhaus und demjenigen für ein "Beinahe-Passivhaus" im Vordergrund stehen.

Im Prinzip stehen für ein "Beinahe-Passivhaus" folgende Lösungen für Lüftung und Heizung zur Auswahl:

- Lüftungsanlage mit Lufterwärmung mit Umluft
- Einfache Lüftungsanlage und separates Heizsystem
- Lüftungsanlage mit Lufterwärmung für die Aussenluft (wie im Passivhaus) und separates Umluftheizsystem
- Lüftungsanlage mit Lufterwärmung für die Aussenluft (wie im Passivhaus) und separates Zusatzheizsystem

Es ist schwierig, allgemeine Aussagen zu machen, wann in einem Gebäude welches System vorteilhafter ist. Dies hängt von vielen Faktoren ab, auf die in diesem Kapitel auch eingegangen werden soll.

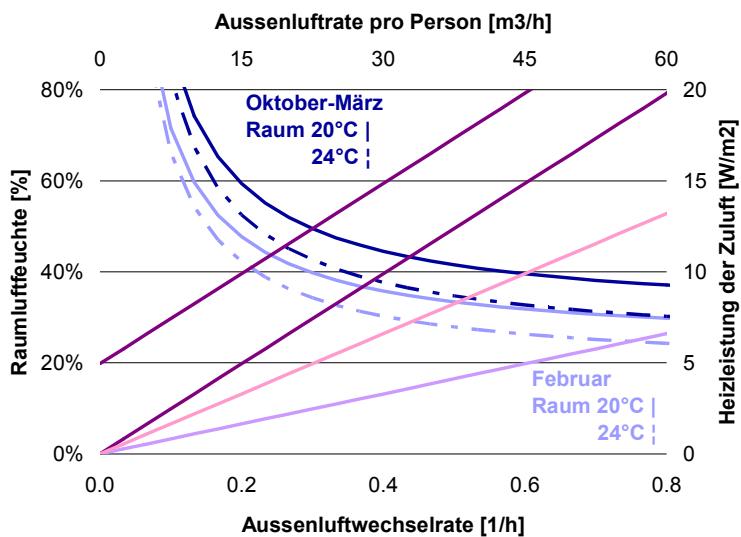
7.2. Unterschiede zur Lüftungsanlage mit Lufterwärmung im Passivhaus

Heizleistungsbedarf

Wie schon in Abschnitt 2.2 ausgeführt, kann mit den Luftraten entsprechend den Luftqualitätsanforderungen eine Heizleistung von ca. 10 W/m² (Nettowohnfläche) erreicht werden. Zudem sollte die Aussenluftrate der Belegung angepasst werden (ohne Feuchterückgewinnung Gefahr tiefer relativer Feuchte im Winter).

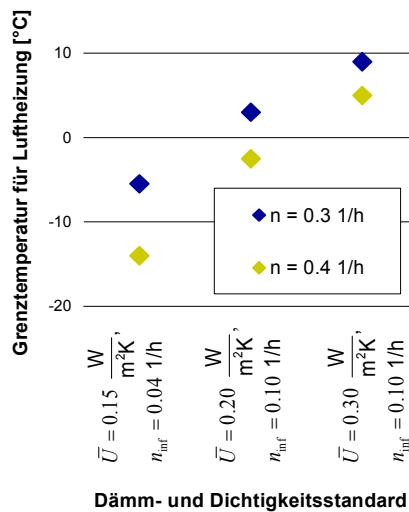
Ist eine höhere Heizleistung erforderlich, muss die zusätzliche Heizleistung mit Umluft eingebracht werden, da die Zulufttemperatur aus verschiedenen Gründen nicht erhöht werden kann (Staubverschmelzung, Temperaturniveau Wärmeerzeugung, Vorschriften) (Figur 7-1).

Für ein Gebäude gemäss MINERGIE-Standard (mit ca. 15 W/m² (Nettowohnfläche) spezifischem Heizleistungsbedarf) wäre demzufolge etwa bei einer Aussenluftwechselrate von 0.4 h⁻¹ und einer Maximaltemperatur der Zuluftnacherwärmung von 50°C ein zusätzlicher Umluftanteil von 50%, und eine totale Luftrate entsprechend einem Luftwechsel von rund 0.6 h⁻¹ erforderlich.



Figur 7-1: Raumluftfeuchte und mögliche Heizleistung als Funktion der Luftraten, mit den Annahmen:
 Wohnfläche $30 \text{ m}^2/\text{P}$,
 Raumluftfeuchte:
 Aussenluft-Feuchte 5 g/m^3 (dunkelblau) bzw. 4 g/m^3 (hellblau),
 interne Feuchteproduktion 78 g/(h.P) .
 Heizleistung (Geraden, von unten)
 Zulufttemperatur 30°C , 40°C und 50°C ohne Umluft, und Zulufttemperatur 50°C mit Umluftanteil 0.2 h^{-1} (oberste Gerade).

Figur 7-2 zeigt, für verschiedene Dämm- und Luftdichtigkeitsniveaus der Gebäudehülle, Grenztemperaturen für die Aussenluft, bei denen mit einer Lüftungsanlage mit Lufterwärmung ohne Umluft gerade noch die erforderliche Heizleistung erbracht werden kann.



Figur 7-2: Grenztemperaturen für die Aussenluft, bei denen mit einer Lüftungsanlage mit Lufterwärmung ohne Umluft gerade noch die erforderliche Heizleistung erbracht werden kann.
 Der Dämm- und Dichtigkeitsstandard entspricht links dem Passivhaus- oder MINERGIE-P-Standard, in der Mitte dem MINERGIE-Standard, und rechts in etwa einem dichten Neubau nach geltendem Standard.

Wärmeverteilung

Im Vergleich zur Lüftungsanlage mit Lufterwärmung im Passivhaus ergeben sich folgende Unterschiede:

- Es kann weniger damit gerechnet werden, dass sich die Temperaturen wohnungsintern stark ausgleichen. Ebenso ist die Trägheit verringert. Die Heizleistung muss somit verstärkt sowohl dem örtlichen wie auch dem zeitlich aktuellen Bedarf angepasst sein.
- Somit müssen die meisten Räume mit Zuluft (und somit eben Wärme) versorgt werden. Das Prinzip der Kaskadenlüftung kann deshalb nur beschränkt angewendet werden. Insbesondere die Küche ist ggf. ebenfalls mit Zuluft zu versorgen.
- In den einzelnen Räumen treten grössere Unterschiede im flächenbezogenen Heizleistungsbedarf auf. Damit ergeben sich auch grössere Unterschiede im Verhältnis zwischen den erforderlichen Luftmengen gemäss Luftqualitätsanforderungen und den erforderlichen Luftmengen gemäss Heizleistungsanforderungen.

Thermischer Komfort

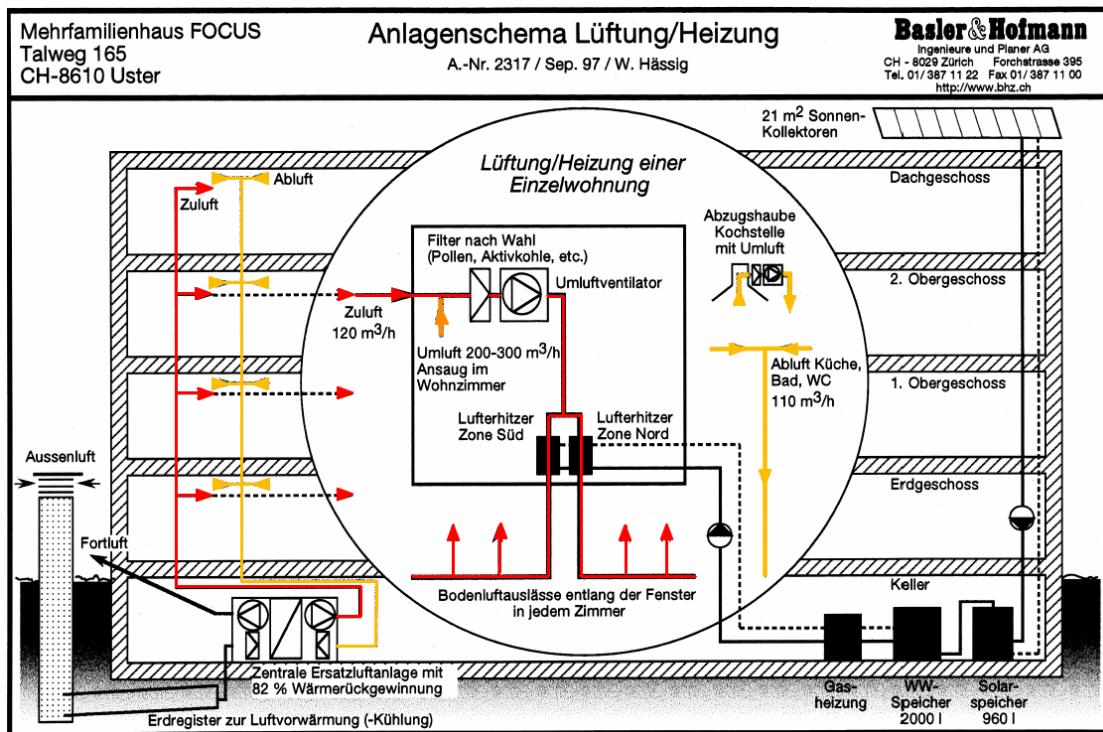
- Durch die weniger stark gedämmte Aussenhülle ergeben sich grössere Strahlungsasymmetrien und eventuell auch einen stärkeren Kaltluftabfall, insbesondere an grösseren Verglasungen.
- Dadurch muss verstärkt auf die entsprechende Positionierung der Zuluftdurchlässe geachtet werden, die Freiheiten in der Wahl der Zuluftführung sind also eingeschränkt.
- Hinzu kommt, dass damit auch verstärkt eine kontinuierliche Zufuhr von warmer Zuluft notwendig ist, ansonsten können die Komfortbedingungen in den Intervallen, wo nicht geheizt wird, kritisch werden.

Schallschutz

Auch hier gilt, dass Schallschutz im Gebäude integral gelöst werden muss, d.h. ein guter Schallschutz der Lüftung auch einen guten Schallschutz des Gebäudes (gleiches Anforderungsniveau) erfordert.

Die Unterschiede zur Lüftungsanlage im Passivhaus bestehen vor allem darin, dass das Prinzip der Kaskadenlüftung nur beschränkt angewendet werden kann, und die Anlage und das Verteilsystem durch die grösseren Luftmengen infolge Umluft auch grösser dimensioniert werden müssen. Damit ergeben sich folgende Unterschiede zu der Lüftungsanlage im Passivhaus und zur „normalen“ Lüftungsanlage (ohne Heizfunktion):

- Dadurch, dass mehr Räume eine Zuluftzuführung haben, ist auch die Gefahr von Telephonie-Erscheinungen zwischen zwei benachbarten Räumen grösser. Es sind deshalb gegebenenfalls mehr Telephonieschalldämpfer vorzusehen.
- Die generell grössere Anlage führt auch zu mehr Platzbedarf für die Schalldämpfer.



Figur 7-3: Beispiel MFH FOCUS in Uster:

zentrale Lüftungsanlage mit WRG und EWT,
Nachheizung wohnungsweise mit zwei Heizregistern (für Zone Süd und Nord) und mit
einer nach Bedarf zuschaltbaren Umluftanlage (vergrössert im Kreis dargestellt).
Zusätzlich farblich hervorgehoben sind Zuluft: rot, Abluft: gelb, Umluft: orange.
Quelle Originalgrafik: [Hässig].

- Sofern keine Abluftfassung im Raum vorhanden ist, gelten bezüglich Überströmöffnungen die gleichen Auslegungsgrundsätze, und somit auch die gleichen Werte für die Schallübertragung.
- Eine schalltechnisch bessere Isolation vom Korridor lässt sich nur mit Zuluft- und Abluftführung im Raum erreichen, wobei für eine Balance zwischen Zuluft und Abluft zu sorgen ist.
- Auch hier wird insbesondere für Schlafzimmer ein Schalldruckpegel der Lüftungsanlage von unter 25 dBA empfohlen. Für Überströmzonen und Ablufräume sind 30 dBA genügend.

7.3. Lüftungsanlage mit Lufterwärmung im "Beinahe-Passivhaus"

Umluftsystem

Das Luftheizsystem muss durch einen Umluft-Strang ergänzt werden. Außenluft und Umluft können zusammengeführt und dann durch das oder die Heizregister geführt werden [Hässig], siehe Figur 7-3. Je nach Situation ist aber ein separates Heizregister für die Umluft sinnvoll. Ebenfalls kann ein separates Umluftsystem sinnvoll sein, z.B. um Wärme von einem Holzofen im Wohnraum zu verteilen [Bienz].

Ansaugstellen für die Umluft sind vorteilhafterweise in folgenden Zonen zu platzieren:

- Zonen mit geringer Belastung
- Zonen mit Wärmegewinn
 - Südseite
 - Oberhalb Holzofen

Auch beim System mit Umluft wird die Abluft in Küche; Bad und WC platziert. Es müssen also deshalb auch hier in allen Räumen Überströmöffnungen vorgesehen werden.

Lüftungsanlage mit Lufterwärmung mit Zusatzheizsystem, ohne Umluft

Nach Figur 7-2 reicht die Heizleistung ohne Umluft bei einem Gebäude mit MINERGIE-Standard bis zu Aussentemperaturen von etwa 0°C (ohne Wind, aber auch ohne solare Gewinne und mit reduzierten internen Gewinnen). Es kann deshalb sinnvoll sein, ein standardisiertes Passivhaus-Luftheizsystem zu verwenden, und mit einem Zusatzheizsystem zu kombinieren, das die erforderliche zusätzliche Heizleistung an diesen – relativ wenigen – Tagen im Jahr übernimmt.

Inwieweit in diesem Falle diese erforderlich Zusatzheizung durch einen Holzofen zu realisieren ist, wurde nicht näher untersucht. Viele der in Kapitel 3 aufgeführten grundlegenden Punkte gelten jedoch auch hier (z.B. konvektiver Austausch durch offene Innentüren).

Im Projekt Sanierung MFH [Viridén] wurde eine Lüftungsanlage mit Lufterwärmung mit zentraler Luft/Luft-Wärmepumpe realisiert. Für die Spitzenlast wurde pro Wohnung ein Holzofen installiert, siehe auch Kapitel 8.

7.4. Vergleich mit separatem Heizsystem

Ob ein Luftsystem mit Umluft oder ein getrenntes Lüftungs- und Heizungssystem eingesetzt werden soll, hängt von vielen Faktoren ab. Vor- und Nachteile für die beiden Lösungen sind unten aufgelistet.

Als wesentlicher Grund für die Wahl einer Lüftungsanlage mit Lufterwärmung werden oft die Kosten genannt. Die Erfahrung zeigt aber, dass die Lüftungsanlage mit Lufterwärmung grössere Kostenvorteile erst bieten wird, vor allem beim MFH, wenn wie bei den Lüftungs- oder Kompaktgeräten für Passivhäuser ebenfalls standardisierte Komponenten angeboten werden. Hier bietet sich sicher ein Entwicklungspotential.

Luftheizsystem

Vorteile

- Kein zusätzliches Heizsystem, dadurch eventuell tiefere Kosten
- Rasche Reaktion auf Wechsel bei internen und externen Wärmegewinnen
- Wärme eines Holzofens kann (beschränkt) auch mit dem Lüftungssystem in der Wohnung verteilt werden.

Nachteile

- Umluft verteilt Raumbelastungen in der ganzen Wohnung
- Generell wärmere Raumluft und kältere Boden- und Wandflächen

- Wärme muss auf hohem Temperaturniveau bereitgestellt werden
- Wenig Möglichkeiten für individuelle Temperaturregelung pro Raum
- Weniger Möglichkeiten, lokal im Raum den thermischen Komfort kontrollieren zu können (z.B. Kaltluftabfall am Fenster)
- Mehr Platzbedarf für Lüftungsgerät, Heizregister, Kanäle, Schalldämpfer, Durchlässe und Überströmöffnungen
- Eventuell weniger Flexibilität in Raumnutzung
- Tiefer Schalldämmung zu Nachbarzonen
- Größerer Aufwand für tiefe Schallemissionen und kleine Schallübertragung
- Die Einregelung ist diffizil (komplexes System).

Getrenntes Lüftungs- und Heizsystem

Vorteile

- Lüftungssystem kann bedarfsgesteuert nach Belegung oder Raumluftqualität betrieben werden, ohne Beeinflussung durch Heizleistungsbedarf.
- Generell tiefer Raumlufttemperatur (und damit höhere relative Feuchtigkeit) mit Möglichkeit der Heizung über Strahlungsflächen
- Möglichkeit der individuellen Raumtemperaturregelung
- Wärme kann auf tiefem Temperaturniveau bereitgestellt werden (Nieder-temperaturheizung), mit besseren Chancen für die Einbindung von Umgebungs- oder Solarenergien
- Der thermische Komfort kann lokal besser kontrolliert werden (z.B. Heizkörper unter Fenster)
- Weniger Platzbedarf
- Mehr Flexibilität in Raumnutzung (mit Fußbodenheizung)
- Bessere Schalldämmung zu Nachbarzonen
- Kleinerer Aufwand für tiefe Schallemissionen und kleine Schallübertragung
- Größere Reserven bezüglich Heizleistung realisierbar

Nachteile

- Ein zusätzliches Wasser-Heizsystem ist erforderlich, dadurch ev. höhere Kosten
- Trägere Reaktion auf Wechsel bei internen und externen Wärmegegewinnen (vor allem bei Fußbodenheizung)

8. Aktuelle P+D

Im Rahmen des *Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprogramms Rationelle Energienutzung in Gebäuden* wurden kurz vor dem vorliegenden Projekt oder zeitgleich mit diesem mehrere Bauvorhaben im Passivhausstandard gefördert. Es sind dies in zeitlicher Reihenfolge:

- Mehrfamilien-Passivhaus mit solarem Luftsystem, Rychenbergstrasse, Winterthur
- Passiv-Acht-Familienhaus, Im Wechselacher, Stans
- 1. Schweizerisches Wohn- und Gewerbehaus im Passivhausstandard, Obermatt Rapperswil
- Wohnen in Sunny Woods, Zürich Höngg
- Passivhaus im Umbau, Zürich Aussersihl
- Passiv-MFH Stämpfli, Unterägeri
- Neubau Zweifamilien-Passivhaus "Im Tal" Bargen SH

Alle Gebäude mit Ausnahme des Letztgenannten werden – zumindest teilweise – über die Zuluft beheizt. Tabelle 8-1 gibt eine Übersicht über die Projekte, die eine Lüftungsanlage mit Lufterwärmung aufweisen.

Die Messprojekte behandeln zum einen Fragen des Komforts bezüglich Raum(luft)temperatur und Feuchte. Zum anderen werden die Energiebilanzen der Gebäude aufgestellt und die Funktion der einzelnen Komponenten der Lüftungsanlage untersucht. Der Aspekt der Lufterwärmung selbst steht aber nirgends im Fokus der Messkampagne, sodass Aussagen über die Lufterwärmung meist nur indirekt getroffen werden können. Im Folgenden wird das jeweilige Konzept kurz beschrieben. Erkenntnisse werden überwiegend nur dann aufgeführt, sofern sie die Lüftungsanlage mit Lufterwärmung berühren.

Tabelle 8-1: Projektübersicht

Abkürzungen:

N: Neubau U: Umbau

G: Gewerbe

B: Boden D: Decke

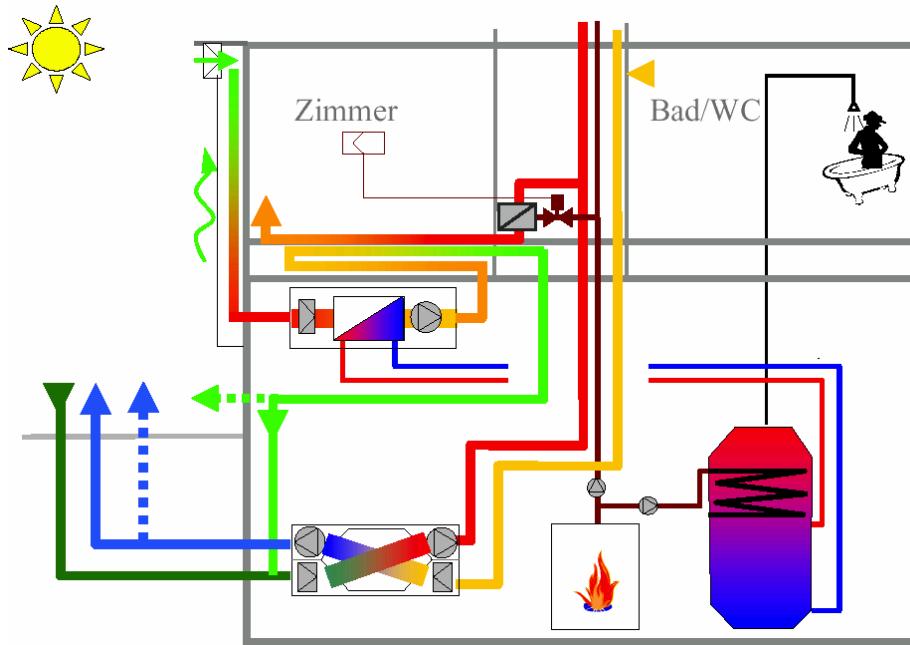
IW: Innenwände

HD: abgehängte Decke

ZUL-Ü: Zuluftüberschuss

L/W: Luft/Wasser

	Passiv-MFH Rychenbergstrasse, Winterthur	Passiv-MFH Im Wechselacher, Stans	Wohn- und Gewerbehaus, Obermatt, Rapperswil	Passiv-MFH Sunny Woods, Zürich-Höngg	Passivhaus im Umbau, Magnusstrasse, Zürich	Passiv-MFH Stämpfli, Unterägeri
Neubau / Umbau	N	N	N	N	U	N
Wohneinheiten	6	8	4+2G	6	4	5
EBF gesamt [m ²]	892	1048	1068	1387	475	696
Bauweise	misch	misch	misch	leicht	misch	misch
Lüftung						
Ventilatoren	zentral	zentral	zentral	dezentral	ZUL dez.	dezentral
WRG	zentral	zentral	zentral	dezentral	dezentral	dezentral
EWT	ja	ja	ja	ja, dez.	nein	ja
Nachheizung	dezentral	dezentral	dezentral	dezentral	dezentral	dezentral
Kanäle	B	D/B	D	isoliert D	HD	HD
Zuluftdurchlässe	B	IW, B	D	B/D	IW	IW
sonstiges	Solarluft- kollektor, alternativ EWT:		Rotations- WT (keine Feuchte)	Umluft	ZUL-Ü, Umluft	Lüftungs- gerät im Treppen- haus
Wärme- bereitstellung	Pellettheiz- kessel, Solarluft- kollektor	Pellettheiz- kessel, Solar- anlage	Gastherme	dez., L/W-WP, Solar- anlage	L/W-WP (AUL/ABL) Holzofen	BHKW, Ofen
sonstiges		PV		PV		



Figur 8-1: Luftführung Rychenbergstrasse [Gütermann].

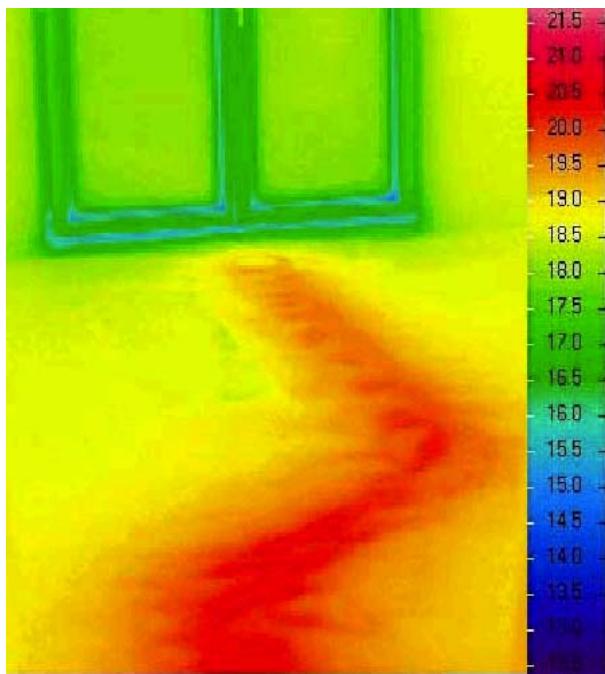
Mehrfamilien-Passivhaus mit solarem Luftsysteem, Rychenbergstrasse, Winterthur

Konzept: [Gütermann] Luft wird im Erdwärmekreislauf oder im Fassadenkollektor vorgewärmt. Im letzteren Fall wird die Wärme zuerst genutzt, um das Warmwasser zu erwärmen. Danach wird der Boden der untersten Wohnungen (Hypokauste) durchströmt und schlussendlich wird die Solarluft über die WRG der Lüftung zugeführt. Ein Pelletkessel wird zur Nachheizung des Speichers für Heizung und Brauchwarmwasser eingesetzt. Die Fortluft wird nach der WRG nochmals durch die Erde geführt und gibt dort noch weiter Wärme ab.

Im Sommer wird die Zuluft im Erdregister leicht gekühlt, die Fortluft direkt nach aussen abgegeben, und die Warmluft aus dem Luftkollektor heizt das Brauchwarmwasser, und wird dann direkt wieder nach aussen geführt.

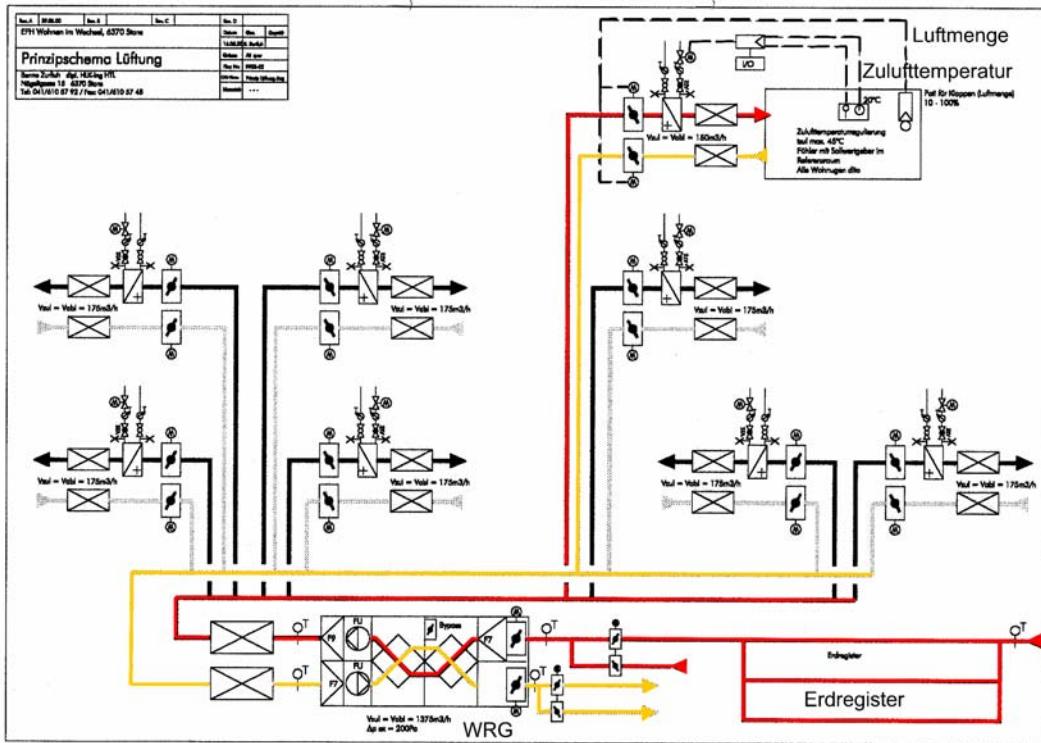
Erkenntnisse: [Gütermann]

- unterdurchschnittliche Belegung führt zu höherem Heizwärmebedarf
- 12% des Heizwärmebedarfs und 36% des Wärmebedarfs für Warmwasser solar gedeckt
- Wärmenutzungskaskade funktioniert gut
- hoher Strombedarf für Ventilatoren, auch nach Optimierung, ETV 3 ... 5
- aufwendige Steuerung erlaubt automatische Umschaltung Winter- / Sommerbetrieb; ohne Automatik liesse sich die Steuerung auch mit Standardkomponenten realisieren
- der Kühleffekt des Erdregisters ist klein und rechtfertigt nicht den Betrieb der Lüftungsanlage im Sommer; das Gebäudekonzept ist viel wichtiger für komfortable Sommertemperaturen
- wohnungsweise Nachheizung, Raumthermostat im Wohnzimmer



Figur 8-2: Wärmeabgabe des Zuluftkanals über den Boden (Messung EMPA) [Gütermann].

- Kostenvorteil der Lüftungsanlage mit Luftherwärmung bei zentraler Wärmebereitstellung und wohnungsweiser Nachheizung gering
- punktuelle Messungen ergaben Temperaturunterschiede von bis zu 4 K zwischen nord- und südorientierten Räumen einer Attikawohnung
- bei den entferntesten Durchlässen wird rund die Hälfte der Wärme der Zuluft über den Boden abgegeben; in der Nähe des Installationskanals wurden Verteilerkanäle zusätzlich isoliert; im Bad wurde der Effekt bewusst genutzt
- Vorlauftemperaturen bis 70°C waren für das Heizregister notwendig, Nacherwärmung mit Pelletkessel ist dann eine gute Lösung.



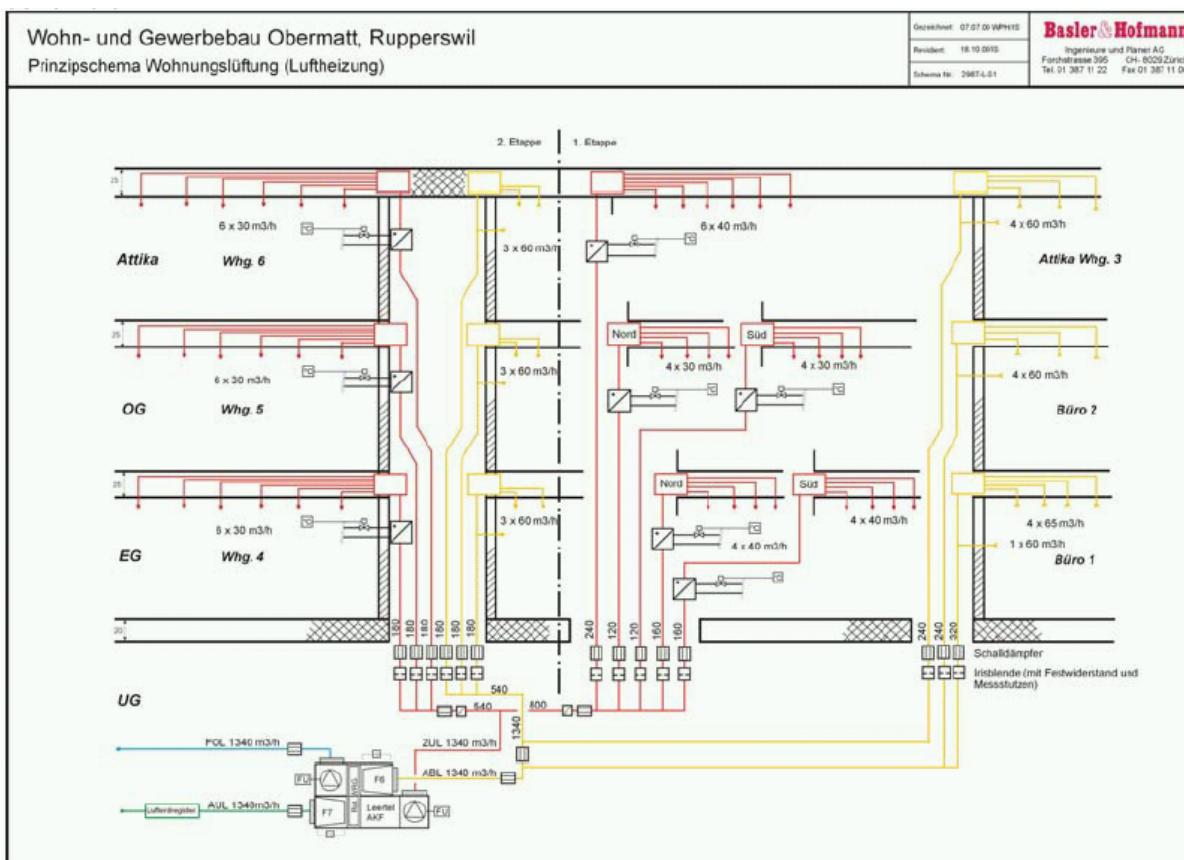
Figur 8-3: Luftführung Passiv-Acht-Familienhaus, Im Wechselacher, Stans [Bossard]. Zentrale Luftaufbereitung und Weiterverteilung zu einer Wohnung hervorgehoben.

Passiv-Acht-Familienhaus, Im Wechselacher, Stans

Konzept: [Humm], [Bossard] Die Aussenluft wird über ein Erdregister in die zentrale WRG geführt; die Ventilatoren sind raumseitig platziert. Die Verteilung erfolgt über Steigleitungen in den Wohnungstrennwänden separat für jede Wohnung. Heizwärme und WW werden mit Holz (Pelletkessel) und Sonne bereitgestellt. Pro Wohnung gibt es ein Nachheizregister mit 1.5 kW (Vorlauftemperatur 50°C, Lufttemperatur 46°C), sowie eventuell einen Handtuchheizkörper im Bad. Die Volumenstromeinstellung pro Wohnung und die Luftverteilung erfolgt über Klappen, der zentrale Ventilator bekommt das Signal der Klappenstellungen und bestimmt damit den notwendigen Volumenstrom.

Erkenntnisse: [Bossard], [StansMess]

- Messungen von Gradienten, Durchlässen und Feuchte im Rahmen des vorliegenden Projekts, siehe Kapitel 2 und 4
- die richtige Einstellung sowie eine Optimierung der Lüftungsanlage ist unverzichtbar; in einem Fall musste die Luftverteilung zugunsten der Heizleistung angepasst werden, in einem Fall war eine Erhöhung der Zulufttemperatur notwendig
- die Beurteilung des Gebäudes durch die BewohnerInnen bezüglich "Wärme" ist trotz eher niedriger Temperaturen "gut", Raumklima und Feuchte werden mit "gut" bis "sehr gut" bewertet
- die Belegung der Wohnung ist eine wichtige Grösse
- die Heizleistung ist etwas höher als berechnet.



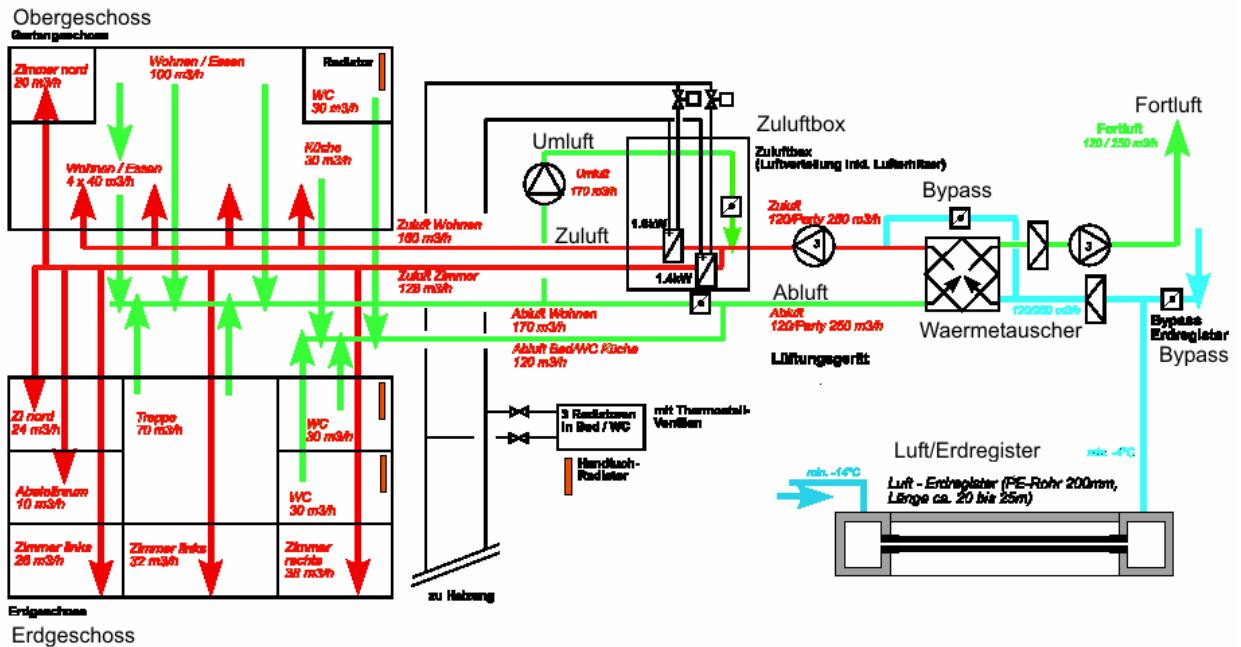
Figur 8-4: Luftführung Wohn- und Gewerbehaus Obermatt, Rapperswil [Setz].

1. Schweizerisches Wohn- und Gewerbehaus im Passivhausstandard, Obermatt Rapperswil

Konzept: [Setz] Die Aussenluft wird über einen EWT und einen Rotationswärmetauscher (ohne Rückfeuchtung) geführt. Die Büros werden in eine Nord- und eine Südzone aufgeteilt, zusammen ergeben sich damit acht Zonen, die über je einen Fühler zur Raumtemperaturregelung und ein Nachheizregister verfügen. In den Nasszellen gibt es zusätzlich Radiatoren. In den Zonen wird die Zuluft über Deckenauslässe verteilt. Die Wärme wird von einer kondensierenden Gastherme bereitgestellt.

Erkenntnisse: [Setz], [Rapperswil]

- die Raumlufttemperaturen im Winter sind relativ hoch ($23^{\circ}\text{C} \dots 25^{\circ}\text{C}$); bei einem Luftwechsel von ca. 0.6 h^{-1} führt dies zu niedrigen Werten der relativen Feuchte von 25% rF (Büronutzung) bis 35% rF (Wohnen).
- bei Beginn der Messungen liefen beide Ventilatoren rückwärts; bei der kurz vorher erfolgten Abnahme war dies nicht bemerkt worden; Zu- und Abluft weichen in einzelnen Zonen um mehr als 10% voneinander ab (meist Zuluftüberschuss), und auch von den Planwerten treten Abweichungen dieser Größenordnung auf
- mit Erdwärmetauscher kann die Aussenluft vor der WRG problemlos auf Temperaturen über 0°C gebracht werden.



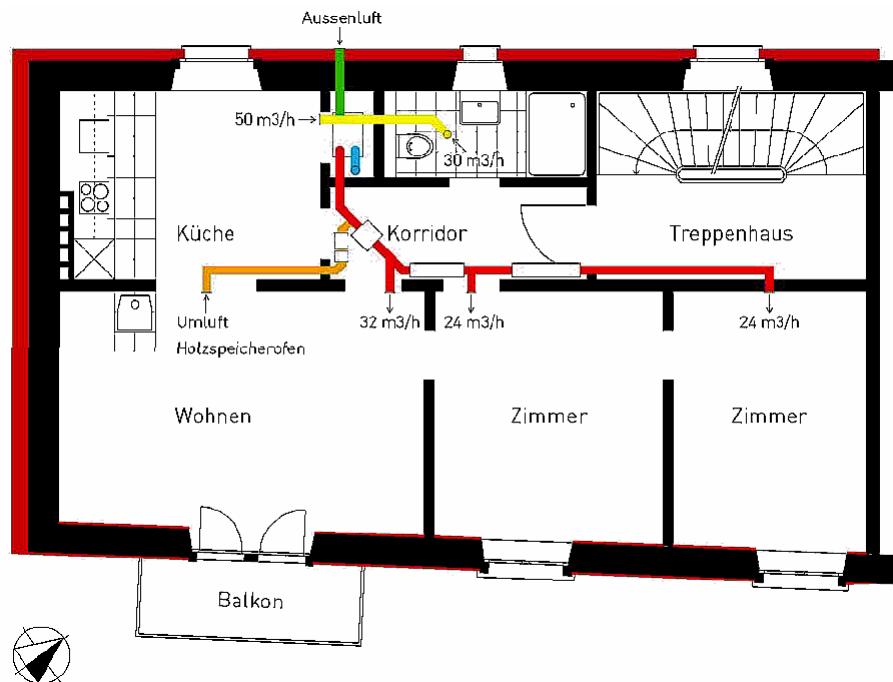
Figur 8-5: Luftführung Sunny Woods [Kämpfen].

Wohnen in Sunny Woods, Zürich Höngg

Konzept: [Kämpfen] Jede Wohnung wird völlig unabhängig versorgt. Die PV-Anlagen (je eine pro Wohnung) produzieren (rechnerisch) den gesamten Strom für die Haustechnik. Die Wärme kommt von Röhrenkollektoren und einer Luft/Wasser-Wärmepumpe. Geheizt wird über die Zuluft. Pro Wohnung gibt es zwei Raumthermostaten, je einer pro Geschoss, und dementsprechend zwei Luftherzter. Umluft wird im Korridor des Schlaftrakts entnommen. Sie wird zugeschaltet, wenn die Ablufttemperatur unter 20°C sinkt. Die Luftkanäle wurden in den Zwischendecken der Wohnungen verlegt, sodass gegebenenfalls Geräusche aus der Lüftungsanlage einer Wohnung nicht in eine Nachbarwohnung übertragen werden können.

Erkenntnisse: [Naef]

- Konkurrenzierung von Wärmepumpe und Solaranlage, der Betrieb der Wärmepumpe hauptsächlich im Winter senkt die Jahresarbeitszahl
- Steuerung der Sonnenstoren über Signal für direkte Strahlung verhindert passive Sonnenenergienutzung
- mit Erdwärmekreislauf kann die Außenluft vor der WRG problemlos auf Temperaturen über 0°C gebracht werden.



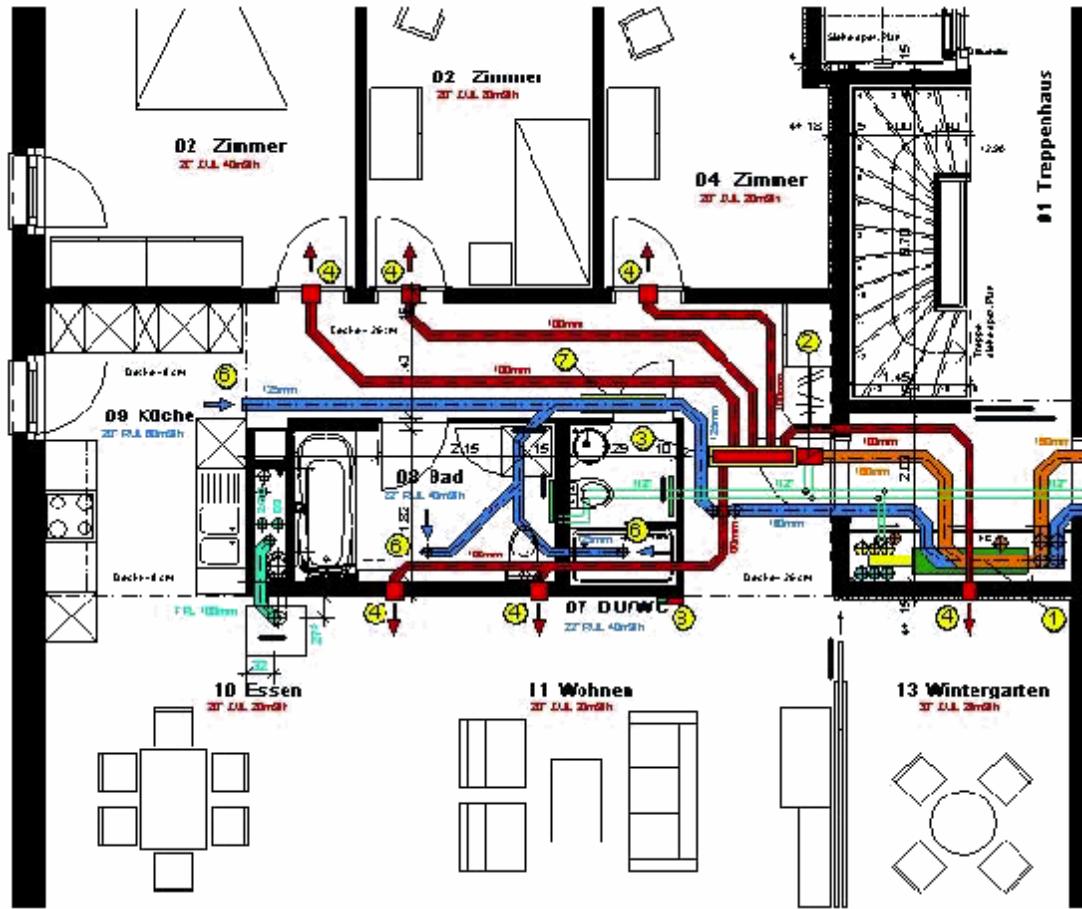
Figur 8-6: Luftführung Passivhaus im Umbau [Viridén].

Passivhaus im Umbau, Zürich Aussersihl

Konzept: [Viridén] Eine Solaranlage und eine Luft/Wasser-Wärmepumpe (Abluft/Aussenluft) beschicken den Speicher (im Keller). Die Aussenluft wird für jede Wohnung separat gefasst, im Wärmetauscher durch die Abluft erwärmt und gegebenenfalls nachgeheizt. Es gibt die Möglichkeit, Umluft zu zuschalten. Die Abluft geht zentral über die Wärmepumpe über Dach. Unter einer Außentemperatur von -2°C reicht die Heizleistung der Zuluft nicht mehr aus. Dann steht ein Holzofen für den Restheizbedarf zur Verfügung. Die Lüftung wird mit einem Zuluftüberschuss von 20 m³/h betrieben, da der Holzofen Verbrennungsluft aus der Raumluft bezieht

Erkenntnisse: [Viridén JB], [Viridén SB]

- 3/4 der Endenergie für Heizung, Lüftung Warmwasser aus erneuerbaren Quellen: Umgebungswärme, Sonne, Holz
- Umluft wenig benutzt, lauter Ventilator, statt dessen werden die Holzöfen häufiger genutzt
- Wärmebereitstellungsgrad der WRG 80%, leicht weniger als möglich wäre, da wegen Zuluftüberschuss nicht optimal
- Bedarfslüftung erreicht damit einen ETV von etwa 10
- Kaskadenlüftung funktioniert gut bei geschlossenen Zimmertüren, bei offenen Zimmertüren mischt sich die Luft in der ganzen Wohnung
- im Winter treten häufig Werte der relativen Feuchte von unter 30% rF auf
- Raumtemperaturen und Luftgeschwindigkeiten bewegen sich im komfortablen Bereich



Figur 8-7: Luftführung Passiv-MFH-Stämpfli (Ausschnitt linke Wohnung und Treppenhaus) [Breu].

Passiv-MFH-Stämpfli, Unterägeri

Konzept: [Breu] Pro Wohnung gibt es ein Lüftungsgerät mit WRG und EWT. Die Geräte wurden im Treppenhaus aufgestellt. Nachgeheizt wird die Zuluft bei Bedarf über Wärmetauscher, die vom zentralen Speicher versorgt werden. Der Speicher wird über eine Solaranlage und ein BHKW beheizt. Jede Wohnung verfügt ausserdem über einen Holzofen. Die Nasszellen (mit Handtuchradiatoren) sind zentral angeordnet. Durch solare Gewinne im Süden soll sich Temperaturgefälle von den Wohnräumen (südorientiert) zu den Schlafräumen im Norden ergeben.

Erkenntnisse: [Stämpfli]

- auch hier waren in der Planung relativ hohe Luftraten vorgesehen
- die Luftmengen waren aber zum Teil noch erheblich höher eingestellt, als in den Planungsunterlagen vorgesehen war
- die relative Feuchte sank zeitweise unter 20% rF, zum Teil bis auf 10% rF ab
- mit Erdwärmemtauscher kann die Aussenluft vor der WRG problemlos auf Temperaturen über 0°C gebracht werden.

9. Referenzen, Literatur

9.1. Referenzen

- [AFS] AFS "Kontrollierte Lufterneuerung". Infoblatt für Feuerschutzbeamte. FSB 7.2, November 1999.
- [AKKP 17] Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase II, Protokollband Nr. 17. Darmstadt, Oktober 1999.
- [AKKP 20] Passivhaus-Versorgungstechnik . Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser Phase II, Protokollband Nr. 20. Darmstadt, September 2000.
- [AKKP 25] Temperaturdifferenzierung in der Wohnung. Arbeitskreis Kosten-günstige Passivhäuser Phase III, Protokollband Nr. 25. Darmstadt, September 2003.
- [Amrein] Amrein, Susan, Betschard, Werner, Ragonesi, Marco: Kostengünstige Passivhaus-Reihensiedlung "Wegere", Nebikon / Schweiz. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 41. Passivhaus Institut. Darmstadt, 2001.
- [Bienz] Bienz, Jürg: P+D-Projekt EFH Grasswil, Kombination von Luftheizung und Holzspeicherofen, Chiquet Energietechnik AG, Ormalingen, 2001.
- [Binz] Binz, Armin, Moosmann, André, Viridén, Karl, Wydler, Judith, Haas, Anne, Althaus, Hans-Jörg: MINERGIE und Passivhaus: Zwei Gebäu-destandards im Vergleich. BFE. EMPA Dübendorf, ZEN. 2002.
- [Bisanz] Bisanz, Carsten: Heizlastauslegung im Niedrigenergie- und Passivhaus. Fachinformation PHI-1999/2. 1. Aufl. Passivhaus Institut. Darmstadt, 1999.
- [Bossard] Bossard, Beda, Zurfluh, Benno, Keiser, Ruedi: Passiv-Acht-Familienhaus Wechsel, Stans. Schlussbericht. BFE. Bern, 2003.
- [Breu] Breu, Christoph: Passiv-MFH Unterägeri. 12. Schweizerisches Status-seminar Energieforschung im Hochbau 2002. S. 339 – 346.
- [Bühring] Bühring, Andreas, Russ, Christel: Lüftungs-Kompaktgeräte: Messergebnisse, Erfahrungen, Hersteller. In: SOFAS Fachtagung das Haus ohne Heizung. SOFAS. Bern, Nov. 2001.
- [Bühring 2002] Bühring, Andreas, Russ, Christel, Kiefer, Klaus: Von der Wärme-pumpe zur Brennstoffzellenheizung. In: Tagungsband 6. Europäische Passivhaus Tagung, 25. bis 26. Jan. 2002. FHBB-IFE. Muttenz, 2002.
- [Bühring 2003] Bühring, Andreas: Lüftungs-Kompaktgeräte: Vom Einfamilienhaus zum Mehrfamilienhaus – Konzepte und Messergebnisse. In: Feist, Wolfgang (Hrsg.): Tagungsband 7. Internationale Passivhaus Tagung, 21. bis 22. Feb. 2003. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003.
- [BUWAL] Arbeitsblatt Emissionsfaktoren Feuerungen. BUWAL. Bern, Mai 2001.

- [CEPHEUS] Schnieders, Jürgen, Feist, Wolfgang, Pfluger, Rainer, Kah, Oliver: CEPHEUS – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, Endbericht. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 22. Passivhaus Institut, Darmstadt 2001.
- [Danner] Danner, Michael: Nutzererfahrungen in der Passivhaussiedlung Lummerlund in Hannover-Kronsberg. In: Feist, Wolfgang (Hrsg.): Tagungsband 7. Internationale Passivhaus Tagung, 21. bis 22. Feb. 2003. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003.
- [element 29] Sagelsdorff, Ralph, Frank, Thomas: Wärmeschutz und Energie im Hochbau. element 29. 2. Aufl. Schweizerische Ziegelindustrie. Zürich, 1993.
- [ENABL] Dorer, Viktor, Pfeiffer, Andreas: Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung (ENABL). Schlussbericht. BFE. Bern 2002.
- [EnergielInnovation9] EnergielInnovation Nr. 9. EnergieSchweiz. Reediton. August 2002.
- [Epp] Epp, Bärbel. Ein Schmuckstück für den Wohnraum. Sonne Wind & Wärme 2002/10 S. 77.
- [ERL7] Filleux, Charles, Krummenacher, S, Aiulfi, Dario, Chuard, Pierre: Zeitgemäss Lüftungssysteme. Dokumentationsreihe Forschungsprogramm „Energierelevante Luftströmungen in Gebäuden (ERL)“. Band 7. VSHL, Zürich, 1994.
- [ETH 2000WG] Wirtschaftsplattform Strategie Nachhaltigkeit im ETH-Bereich (Hrsg.): 2000 Watt Gesellschaft – Modell Schweiz. Ein Projekt der Strategie Nachhaltigkeit im ETH-Bereich. Dezember 1998.
siehe auch www.novatlantis.ch
- [Feist 1997] Feist, Wolfgang: Primärenergie und CO₂-Bilanzen von Passivhäusern mit unterschiedlicher Versorgungstechnik. Fachinformation PHI-1997/1. 1. Aufl., Darmstadt, Februar 1997.
- [Feist 1999a] Feist, Wolfgang: Wäschetrocknen im Trockenschrank. In: Tagungsband 3. Passivhaustagung, 19. bis 20. Februar 1999. Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn, 1999.
- [Feist 1999b] Feist, Wolfgang: Anforderungen an die Wohnungslüftung im Passivhaus. In: [AKKP 17], S. 1 – 24.
- [Feist] Feist, Wolfgang: Varianten für die Wärmeversorgung von Passivhäusern im Vergleich. In: [AKKP 20], S. 91 – 176.
- [Flügge] Flügge, Richard: Die Luftfeuchtigkeit beheizter Räume. Gesundheits-Ingenieur 54 (1931) Heft 15, S. 230 – 231.
- [Gierzak] Gierzak, John B.: Duct Liner Materials & Acoustics. ASHRAE Journal Dec. 2003, S.46 – 49.
- [Glück] Glück, Bernd: Wärmeübertragung. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1989.

- [Gütermann] Gütermann, Andreas: Mehrfamilien-Passivhaus mit solarem Luftsystem - Lüftung/Luftheizung/WRG/Solarfassade an der Rychenbergstrasse, Winterthur. Schlussbericht. BFE. Bern 2002.
- [Hallmann] Hallmann, Sylke: Wohnzufriedenheit und Wohnerfahrungen in der Siedlung Wiesbaden-Lummerlund. In: Feist, Wolfgang (Hrsg.): Tagungsband 7. Internationale Passivhaus Tagung, 21. bis 22. Feb. 2003. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003.
- [Hartmann] Hartmann, Thomas, Reichel, Dirk, Richter, Wolfgang: Feuchteabgabe in Wohnungen – alles gesagt? Gesundheits-Ingenieur 122 (2001) Heft 4, S. 189 – 195.
- [Hässig] Hässig, Werner: Erfolgskontrolle im Mehrfamilienhaus FOCUS in Uster. Basler&Hofmann AG Zürich, 1999.
- [HolzCh] Holzenergie Schweiz: Holzheizungen mit Qualitätssiegel.
www.holzenergie.ch
- [Huber] Huber, Heinrich: Kontrollierte Wohnungslüftung; Unterlagen zum Weiterbildungskurs, HTA Luzern, Februar 2001.
- [Huber 2002] Huber, Heinrich, Frei, Beat, Kropf, Sven, Maquat, Yves, Gaegau, Christian: Entwicklung neuartiger Holz-Hybridheizsysteme – Speicheröfen mit Wasserabsorber. Schlussbericht. BFE. Bern 2002.
- [Humm] Humm, Othmar: Ein Passivhaus nach Schweizer Art. Gebäudetechnik Nr. 1/02, 2002.
- [Ihle] Ihle, Claus: Lüftung und Luftheizung. Schriftenreihe der Heating-ingenieur Band 3. 6. Aufl. Werner Verlag. Düsseldorf, 1997.
- [Jones] Jones, A. P.: Asthma And Domestic Air Quality. Soc. Sci. Med. Vol. 47, Nr. 6, S. 755 - 764, 1998.
- [Kämpfen] Kämpfen, Beat, Naef, René: Sunny Woods - ein Nullheizenergiehaus am Stadtrand von Zürich. 12. Schweizerisches Statusseminar Energieforschung im Hochbau 2002. S. 323 – 333.
- [Knissel] Knissel, Jens: Verbessertes Modell zur Simulation des Fensterluftwechsels. In: Feist, Wolfgang (Hrsg.): Tagungsband 7. Internationale Passivhaus Tagung, 21. bis 22. Feb. 2003. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003.
- [Koschenz] Koschenz Markus, Pfeiffer, Andreas: Energie- und Gebäudetechnik für die 2000 Watt-Gesellschaft – Modell Schweiz. Novatlantis Bericht. EMPA Dübendorf. 2004.
- [Läng] Läng, Hans-Peter, Freitag, Alfred: Die Qual der richtigen Wahl. Haus Tech 7/8 – 2003, S. 46 – 49.
- [MINERGIE] MINERGIE/MINERGIE-P - Energiestandard für mehr Lebensqualität und tiefen Energieverbrauch. www.minergie.ch.
- [Münzenberg] Münzenberg, Uwe, Thumulla, Jörg: Gekippt oder geregelt? - Bau-physikalische Erkenntnisse über das Lüften. Wohnung+Gesundheit 103, 06/2002, S. 38 -40.

- [Münzenberg2] Münzenberg, Uwe, Thumulla, Jörg: Raumluftqualität in Passivhäusern. In: Feist, Wolfgang (Hrsg.): Tagungsband 7. Internationale Passivhaus Tagung, 21. bis 22. Feb. 2003. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003.
- [Naef] Naef, René, Widmer, Petra: Wohnen in Sunny Woods, Zürich Höngg. Schlussbericht. BFE. Bern, 2003.
- [Nagda] Nagda, Niren L., Hodgson, Michael: Low Relative Humidity and Aircraft Cabin Air Quality. Indoor Air Vol. 11 Iss. 3, S. 200 – 214. 2001.
- [NEFF357] Frank, Thomas, Püntener, T. W.: Thermischer Komfort bei variablen Bedingungen. NEFF Projekt Nr. 357. EMPA. Dübendorf, 1990.
- [Nussbaumer] Nussbaumer, Thomas: Holzenergie Teil 1: Grundlagen der Holzverbrennung. Schweizer Baudokumentation. Blauen, 2000.
- [Nussbaumer 2004] Nussbaumer, Thomas: Dioxin- und PAK-Emissionen der privaten Abfallverbrennung. BUWAL. Bern, 2004.
- [Paul] Paul, Eberhard: Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung für Einfamilienhäuser – Varianten, Konstruktionsprinzipien, Gerätebewertung, Testverfahren und deren Verwendung
In: Fachartikelsammlung, <http://www.paul-lueftung.de>
- [Pfluger] Pfluger, Rainer: Projektierungswerzeuge für Passivhaus-Lüftungsanlagen. In: [AKKP 17], S. 55 - 67.
- [PHI 99/7] Pfluger, Rainer, Feist, Wolfgang, Schnieders, Jürgen: Luftführung in Passivhäusern. CEPHEUS Projektinformation Nr. 8. Fachinformation PHI-1999/7. 1. Aufl., Darmstadt, März 1998.
- [PHPP 02/03] Feist, Wolfgang et al: Passivhaus Projektierungs Paket 2002. Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser. Passivhaus-Institut. Darmstadt, 2002
mit
Passivhaus Projektierungs Paket 2003. Beiheft zum Handbuch PHPP 2002. Passivhaus-Institut. Darmstadt, 2003.
- [PHQ] Passivhaus Qualitätsanforderungen. Passivhaus Institut, Oktober 2003. http://www.passivehouse.com/01_dph/St-dph/Qualit/Qual_F.htm
- [Recknagel 2001] Recknagel, Hermann, Sprenger, Eberhard, Schramek, Ernst-Rudolf: Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik, Ausgabe 01/02. Oldenbourg Industrieverlag. München, 2001.
- [REHVA] REHVA Guidebook: Displacement Ventilation in non-industrial premises. REHVA, Ravenstein 3, B-1000 Brüssel. 2002.
- [Rietschel] Rietschel, Hermann, Esdorn, Horst: Raumklimatechnik. 1. Grundlagen. 16. Auflage. Springer Verlag. Berlin Heidelberg, 1994.
- [Rapperswil] Huber, Heinrich, Frei, Beat: Bericht Nr.: 414782. Objekt: Gewerbe- und Wohnhaus Obermatt, 5102 Rapperswil. Messbericht zu [Setz].
- [Schnieders] Schnieders, Jürgen. Temperaturdifferenzen gezielt herstellen – wie geht's?. In: [AKKP 25].

- [Schwarz] Schwarz, Michael: Numerische Simulation von Luftströmungen in Wohnräumen mit mechanischer Lüftungsanlage.
In: [AKKP17], S. 75 - 89.
- [Setz] Setz Werner: 1. Schweizerischer Wohn- und Gewerbebau im Passivhausstandard. Schlussbericht. BFE. Bern, 2003.
- [SIA-ÖkoDek] www.sia.ch, den Links "praxis", dann "Bauproduketedeklaration" folgen (www.sia.ch/d/praxis/bauprodukte/index.cfm?Lang=d&ID=5456408).
- [Stämpfli] Stämpfli, Armin: Pilotobjekt Passiv-MFH Stämpfli in Unterägeri/ZG. Schlussbericht. BFE. Bern, 2003.
- [StansMess] Huber, Heinrich, Frei, Beat, Reichmuth, Florian: Bericht Nr. 414781. Objekt: Passiv-Mehrfamilienhaus „Im Wechsel“ 6370 Stans. Anhang Messbericht zu [Bossard].
- [StansLuft] Huber, Heinrich, Frei, Beat, Reichmuth, Florian: Optimierte Luftheizung für Passivhäuser, „PH Luft“. Bericht Nr. 414786. Objekt: Passivhaus „Im Wechsel“, 6370 Stans. Messbericht zum vorliegenden Projekt.
- [Tanner 2004] Tanner, Christoph: Luftdichtigkeitsmessungen: Das Dilemma bei der Beurteilung. Schweizer Energiefachbuch 2004.
- [Task28] Handbook: Design of High Performance Housing (Arbeitstitel).
Erscheint in 2005. Siehe auch <http://www.iea-shc.org/task28>
- [UVEK] Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, und Konferenz kantonaler Energiedirektoren: Stand der Energiepolitik in den Kantonen. BFE. Bern, 2003.
- [Viridén] Viridén, Karl: Umbau Richtung Passivhaus. 12. Schweizerisches Statusseminar Energieforschung im Hochbau 2002. S. 347 – 352.
- [Viridén JB] Viridén, Karl, Ammann, Thomas, Hartmann, Peter, Huber, Heinrich, Naef, René: Pilot-Projekt Passivhaus im Umbau. Jahresbericht 2002. BFE. Bern, 2003.
- [Viridén SB] Viridén, Karl, Ammann, Thomas, Hartmann, Peter, Huber, Heinrich, Naef, René: P+D-Projekt Passivhaus im Umbau. Schlussbericht. BFE. Bern, 2003.
- [Werner] Werner, Johannes, Laidig, Matthias: Grundlagen der Wohnungslüftung im Passivhaus. In: [AKKP 17], S. 25 - 54.

9.2. Normen, Vorschriften, Richtlinien

- [CR 1752] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): Lüftung von Gebäuden – Auslegungskriterien für Innenräume. DIN-Fachbericht 79, Deutsche Fassung des CEN-Berichtes CR 1752. 1. Aufl. 1999. Beuth Verlag GmbH. Berlin Wien Zürich, 1999.
- [DIN 1946-2] Raumlufttechnik – Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregel). DIN1946 – 2 Raumlufttechnik Teil 2. Ausgabe:1994-01. Beuth Verlag GmbH. Berlin Wien Zürich, 1994.
- [DIN 1946-6] Lüftung von Wohnungen. Anforderungen, Ausführung, Abnahme (VDI-Lüftungsregel). DIN1946 – 6 Raumlufttechnik Teil 6. Ausgabe 1998-10. Beuth Verlag GmbH. Berlin Wien Zürich, 1998.
- [DIN 4109] Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise. DIN 4109. Ausgabe 1989-11. Beuth Verlag GmbH. Berlin Wien Zürich, 1989.
- [DIN 4797] DIN 4797 Nachströmöffnungen - Bestimmung des Strömungswiderstandes. Ausgabe 1986. Beuth Verlag GmbH. Berlin Wien Zürich, 1986.
- [KL-A] Planer-KiT für den Architekten - Komfortlüftung für Wohnbauten. EnergieSchweiz. Best. Nr. 805.282.2d.
- [KL-L] Komfortlüftungen – Technische Ergänzungen für den Lüftungsplaner. Ergänzung zu Planer Kit Komfortlüftung. EnergieSchweiz. Best. Nr. 805.282.3d.
- [KL-Q] Qualitätssicherungs-Paket Komfortlüftungen – Für die Bauherrschaft. Besteller-Kit Komfortlüftungen. EnergieSchweiz. Best. Nr. 805.282.4d.
- [MuKEN 2000] Konferenz kantonaler Energiedirektoren und Konferenz kantonaler Energiefachstellen: Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEN). Ausgabe 2000.
- [prEN 12237] Lüftung von Gebäuden -- Luftleitungen - Festigkeit und Dichtheit von Luftleitungen mit rundem Querschnitt aus Blech. SN EN 12237, Ausgabe:2003-08. Schweizerische Normen-Vereinigung. Zürich, 2003.
- [prEN 13779] Lüftung von Gebäuden - Leistungsanforderungen für raumlufttechnische Anlagen. (Norm-Entwurf) DIN EN 13779, Ausgabe:2000-02; Deutsche Fassung der prEN 13779:1999. Schweizerische Normen-Vereinigung. Zürich, 2000.
- [prEN 14134] Lüftung von Gebäuden - Leistungsprüfung und Einbaukontrollen von Lüftungsanlagen von Wohnungen. Norm-Entwurf prEN 14134, Ausgabe:2003-06. Schweizerische Normen-Vereinigung. Zürich, 2003.
- [SIA 180] Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau. SIA 180 Ausgabe 1999 und Schweizer Norm SN 520 180. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Zürich, 1999.
- [SIA 181] SIA 181. Schallschutz im Hochbau. Ausgabe 1988

- [SIA 380/1] Thermische Energie im Hochbau. SIA 380/1:2001 und Schweizer Norm SN 520 380/1. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Zürich, 2001.
- [SIA 382/1] Technische Anforderungen an lüftungstechnische Anlagen. SIA Empfehlung V 382/1 und Schweizer Norm SN 546 382/1. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürich, 1992.
- [SIA 382/2] Kühlleistungsbedarf von Gebäuden. SIA Empfehlung V 382/2, Ausgabe 1992 und SN 546 382/2. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürich, 1992.
- [SIA 382/3] Bedarfsermittlung für lüftungstechnische Anlagen. SIA Empfehlung V 382/3, Ausgabe 1992 und SN 546 382/3. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürich, 1992.
- [SIA 416] Flächen und Volumen von Gebäuden und Anlagen – Definitionen. SIA Norm 416 Ausgabe 1993 und Schweizer Norm SN 504 416. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Zürich, 1993.
- [SIA 384/2] Wärmeleistungsbedarf von Gebäuden. SIA Empfehlung 384/2, Ausgabe 1982 und SN 565 384/2. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Zürich, 1982.
- [SIA 493] Deklaration ökologischer Merkmale von Bauprodukten. SIA Empfehlung 493 Ausgabe 1997 und Schweizer Norm SN 550 493. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürich, 1997.
- [SIA 2023] Wohnungslüftung. SIA Merkblatt 2023. Arbeitsversion Februar 2004.
- [SIA D093] Deklaration ökologischer Merkmale von Bauprodukten nach SIA 493 - Erläuterung und Interpretation. SIA Dokumentation D 093. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Zürich, 1997.
- [SN EN ISO 7730:1995] Gemässigtes Umgebungsklima - Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit. SN EN ISO 7730:1995. Schweizerische Normen-Vereinigung. Zürich, 1995.
- [SWKI-96-5] Abnahmeprotokoll Lüftungs- bzw. Klima-Anlage. SWKI Richtlinie 96-5 006. Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren SWKI, 3322 Schönbühl.
- [SWKI 2003-5] Hygiene-Anforderungen an Raumlufttechnische Anlagen. SWKI Richtlinie 2003-5, 1. Ausgabe November 2003. Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren SWKI, 3322 Schönbühl.
- [VbB] Verordnung über den baulichen Brandschutz 861.13 (Kanton Zürich). 18. August 1993.
- [VKF-N] Brandschutznorm. Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF, Bundesgasse 20, 3001 Bern (<http://www.vkf.ch>). 1993.
- [VKF-R] Brandschutzrichtlinie "Lufttechnische Anlagen". Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF, Bundesgasse 20, 3001 Bern (<http://www.vkf.ch>) . 1993.

9.3. Berechnungsprogramme

- [TRNSYS] TRNSYS 15, Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory (SEL). University of Wisconsin Madison, USA, 2000.
- [TRNFLOW] Weber, Andreas, et. al. TRNFLOW, a new tool for the modelling of heat, air and pollutant transport in buildings within TRNSYS. In: Building Simulation 2003, Proceedings of the IBPSA Conference. Eindhoven, August 2003.
- [COMIS] COMIS 3.1 . Program for modelling of multizone airflow and pollutant transport in buildings. EMPA Dübendorf. 2001.
- [FLOVENT] FLOVENT 3.1 . Computational Fluid Dynamics (CFD) program for air flow, heat transfer and contamination control simulations within rooms or buildings, Flomerics Ltd., England. 1999.
- [PHLuft] PHLuft - Ein Programm zur Unterstützung von Planern von Passivhaus-Lüftungsanlagen. Version 1.0, Passivhaus Institut. Darmstadt, 1999.