



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 29. Juni 2009

Haustechnik – Kompaktgeräte (Heizen, Warmwasser, Lüften, Kühlen – alles aus einem)

Erkenntnisse aus der Praxis



Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

AXPO Holding AG, Geschäftsbereich Axpo Naturstrom-Fonds, CH-8005 Zürich
Viessmann (Schweiz) AG, Geschäftsbereich SATAG Thermotechnik, CH-9320 Arbon
Josias Gasser Baumaterialien AG, Geschäftsbereich Gasser Passivhaustechnik, 7000 Chur
Credit Suisse Real Estate Asset Management, CH-8070 Zürich

Auftragnehmer:

hässig sustech gmbh
Weiherallee 11a
8610 Uster
www.sustech.ch

Hochschule für Technik und Architektur Luzern (HSLU)
Frankenstrasse 9
Postfach 2969
CH- 6002 Luzern
www.hslu.ch

Autoren:

Werner Hässig, hässig sustech gmbH, haessig@sustech.ch
Simon Streit, hässig sustech gmbH, streit@sustech.ch
Dominique Helfenfinger; Hochschule für Technik und Architektur Luzern (HSLU),
dominique.helfenfinger@hslu.ch
Patrick Keller, Hochschule für Technik und Architektur Luzern (HSLU),
patrick.keller@hslu.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Charles Filleux

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 152875/102262 resp. 153189 /102511 (Korr. 12.4.10)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	3
2. Einleitung.....	5
3. Ausgangslage, Ziel und Vorgehen.....	5
3.1. Ausgangslage	5
3.2. Ziel	7
3.3. Vorgehen.....	7
4. Gesamtsynthese, zusammenfassende Erkenntnisse über alle 3 Gebäude.....	9
4.1. Komfort und Behaglichkeit.....	9
4.2. Energieverbrauch.....	9
4.3. Nutzungsgrade und Basisdaten Minergie.....	12
4.4. Hinweise zur Planung	12
4.5. Verschiedene Erkenntnisse und Folgerungen.....	14
5. Objekt 1: MFH Eichgut, Winterthur	17
5.1. Gebäude-Situationsbeschreibung	17
5.2. Synthese Objekt 1.....	20
5.3. Objekt 1, Wohnung 1	28
5.4. Objekt 1, Wohnung 2	31
5.5. Objekt 1, Wohnung 3	35
5.6. Optimierungsmöglichkeiten	38
6. Objekt 2: MFH Seestrasse 20, Uster	39
6.1. Gebäude-Situationsbeschreibung	39
6.2. Synthese Objekt 2.....	43
6.3. Objekt 2, Wohnung 1	52
6.4. Objekt 2, Wohnung 2	56
6.5. Objekt 2, Wohnung 3	59
6.6. Optimierungsmöglichkeiten	63
7. Objekt 3: MFH Scalettastrasse, Chur	64
7.1. Gebäude-Situationsbeschreibung	64
7.2. Synthese Objekt 3.....	67
7.3. Objekt 3, Wohnung 1	73
7.4. Objekt 3, Wohnung 2	76
7.5. Optimierungsmöglichkeiten	78
8. Literaturverzeichnis	79

Anhang

Dank

Wir bedanken uns bei allen Projektbeteiligten für die Beauftragung und die gute Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht an die Begleitgruppe-Mitglieder (siehe Impressum) sowie an alle Eigentümer, Mieter und Verwaltungen der betroffenen Wohnungen. Speziell danken wir auch den folgenden Organisationen und deren Vertretern, welche das Projekt finanziell unterstützten und ohne die ein Gelingen des Projektes nicht möglich gewesen wäre.

Organisation

Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Energie in Gebäuden, Bern www.bfe.admin.ch	Andreas Eckmanns und Charles Filleux
Axpo Naturstrom-Fonds AXPO Holding AG www.axpo.ch	Jeanine Oswald Stefan Roth
Viessmann (Schweiz) AG Geschäftsbereich SATAG Thermotechnik www.viessmann.ch www.satagthermotechnik.ch	Hansueli Bruderer und Markus Näf
drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh. www.drexel-weiss.at	Christof Drexel
Gasser Passivhaustechnik www.gasser.ch/Passivhaustechnik	Daniel Diggelmann
Credit Suisse Real Estate Asset Management, Zürich www.credit-suisse.com	Torsten Gottsmann

Das Autorenteam

Mitglieder der Begleitgruppe:

Thomas Afjei	FHNW
Daniel Diggelmann	Gasser Passivhaustechnik
Christof Drexel	Drexel und Weiss
Charles Filleux	Bundesamt für Energie
Heinrich Huber	MINERGIE, Agentur Bau
Stephan Moor	Senn BPM AG
Markus Näf	SATAG Thermotechnik AG
Jeanine Oswald	Axpo Vertrieb AG
Stefan Roth	Axpo Holding AG
Stefan Süess	Bauherrentreuhand (im Auftrag Credit Suisse)

1. Zusammenfassung

Zur Erfüllung der Funktionen Heizen, Lüften und Warmwasser werden seit einiger Zeit speziell für Passivhäuser entwickelte Haustechnik-Kompaktgeräte eingesetzt. Diese vereinen Wärmepumpe, Lüftung, Warmwasser (und evtl. Kühlung) in einem einzigen Gerät.

Hässig Sustech GmbH und die Hochschule für Technik und Architektur, Luzern führten im Auftrag des Bundesamtes für Energie, des AXPO Naturstrom-Fonds sowie der involvierten Industrie und Bauherrschaften ein Messprojekt durch. Dieses umfasste Untersuchungen in drei in der Schweiz seit dem Jahre 2006 realisierten MINERGIE-P-Mehrfamilienhäusern und leitet daraus Erkenntnisse für Haustechnik-Planer und Gerätehersteller ab, um die Konstruktion und Anwendung von Kompaktgeräten weiterentwickeln zu können. Die untersuchten Gebäude sind mit Kompaktgeräten der drei Hersteller Viessmann, Drexel und Weiss sowie Nilan ausgerüstet.

Erfasst wurden, über mindestens ein Jahr hinweg, der Heizwärmebedarf, der elektrische Energiebezug, die Luftvolumenströme, die Raumlufthtemperaturen, die relativen Raumlufthfeuchtigkeiten, sowie punktuell der CO₂-Gehalt der Raumlufth in insgesamt acht Wohnungen. Das Verhalten der Bewohner wurde mittels Benutzerprotokollen grob registriert. Eine eigentliche Benutzerbefragung wurde nicht durchgeführt.

Ergebnisse

Die Raumlufthtemperaturen liegen in allen drei Objekten stets in einem äusserst angenehmen Bereich. Zu kühle Raumlufthtemperaturen (< 19 °C) treten nie auf, hingegen kommt es, selbst im Winter, vereinzelt zu hohen Temperaturen von über 22°C. Die Analyse der CO₂-Messungen fällt ebenfalls sehr positiv aus. Auch bei hoher Personenpräsenz gewähren die Komfortlüftungen eine gute Luftqualität. Ein gewisser Grund zur Beanstandung ist die Luftfeuchte, die in allen drei Objekten gelegentlich zu tief ausfällt. Zu hoch eingestellte Luftvolumenströme, welche nicht der Personenpräsenz angepasst wurden, sind dafür hauptverantwortlich. Die Korrelation zwischen genügender Luftfeuchtigkeit an kalten Tagen und dem Luftvolumenstrom wurde gut ersichtlich.

Den MINERGIE-P-Grenzwert von 30 kWh/m² unterschreiten einige Wohnungen mit bis zu 25 % deutlich. Andererseits wird in vier von acht untersuchten Wohnungen dieser Grenzwert nicht ganz eingehalten (in einer Wohnung sogar deutlich überschritten). Die Anforderungen bezüglich des Wärmeenergiebezugs werden in drei von acht Wohnungen überschritten. Die Messungen bestätigen aber auch, dass die elektrischen Energiebezüge der Kompaktgeräte und Zusatzheizungen, die diese Zahlen bestimmen, stark vom individuellen Benutzerverhalten abhängig sind. Aus den vorliegenden Messdaten kann festgestellt werden, dass eine Erhöhung der Raumlufthtemperatur von 21 - 22 °C um nur ein Grad bereits mit einer Zunahme des Elektrizitätsverbrauchs von rund 25% resp. gar 50% bei zwei Grad Erhöhung zu Buche schlägt. Ausserdem ist bei hohen mittleren Raumtemperaturen (d.h. 23 – 24 °C) der Nutzungsgrad der Kompaktgeräte tief.

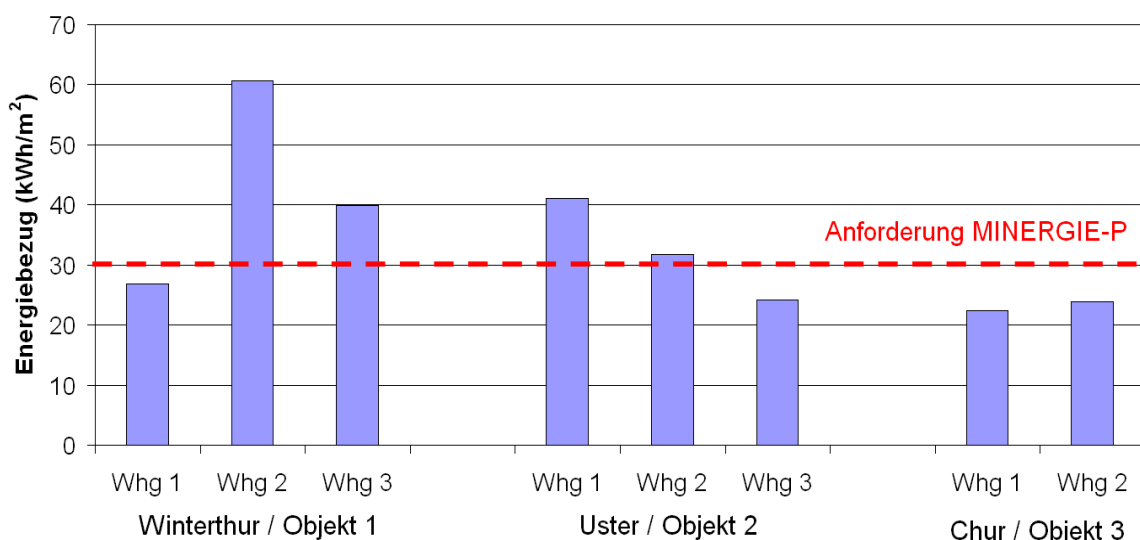


Abbildung: Jährlicher Energieverbrauch (mit MINERGIE-Gewichtung: elektrisch = 2; Alkohol = 1; Holz und Pellet = 0.5) für alle gemessenen Wohnungen; eine detaillierte Darstellung findet sich im Kapitel 4.2

Die Systemnutzungsgrade der drei untersuchten Kompaktgeräte betragen während dem Winterhalbjahr 3.22 (Objekt 1), 2.35 (Objekt 2) und 3.61 (Objekt 3). Tiefere Werte sind vor allem bei Wohnungen mit grossem Anteil Zusatzheizung entstanden.

Die Energiekosten pro Quadratmeter Nettowohnfläche sind wie erwartet sehr bescheiden. Je nach Nutzerverhalten und Stromtarife belaufen sie sich auf 1.90 bis 3.00 oder im Mittel nur gerade 2.20 Franken pro Quadratmeter für Haustechnik (Heizen, Warmwasser, Lüften). Die Stromkosten für den gesamten Haushalt und inklusive Zähler-Fixkosten betrugen zwischen 4.30 – 8.70 CHF/m² Nettowohnfläche. Knapp 40% der gesamten Elektrokosten entfallen auf die Haustechnik.

Schlussfolgerungen

Insbesondere hat die am Gerät eingestellte Raumlufttemperatur einen sehr grossen Einfluss auf den Energiebezug des Kompaktgerätes. Aufgrund der Messwertanalyse kann gesagt werden, dass pro Grad höherer Raumlufttemperatur etwa 20-25 % Mehrenergie beansprucht werden (ab dem Bereich 21-22°C). Umgekehrt reduziert sich der Heizenergieverbrauch stark, wenn man sich mit Raumtemperaturen von 20-21°C zufrieden gibt. Es zeigt sich auch, dass bei hohen mittleren Raumtemperaturen die Nutzungsgrade tief sind. Weiter wurde bemerkt, dass Gewohnheiten wie zum Beispiel tägliches Fensteröffnen den Energiebedarf nennenswert vergrössern und die Raumluft zusätzlich austrocknen.

Deshalb sollen sich die Bewohner von MINERGIE-P Bauten bewusst sein, dass sie eine Wohnung mit grossem passivem Wärmeanteil bewohnen und ihr Nutzungsverhalten andere Auswirkungen hat, als in einer konventionellen Wohnung. Eine Anpassung des Nutzungsverhaltens gelingt aber nur, wenn die Eigentümer/Mieter von den Planern, Bauherren, Liegenschaftsverwaltungen, usw. detailliert informiert werden.

Weiter ergeben sich folgenden Erkenntnisse für Planer von Passivhäusern und Kompaktgeräten:

Der Heizleistungsbedarf soll 10 W/m² nicht übersteigen. Die Wärmeerzeugung soll im beheizten Perimeter aufgestellt werden. Heizungsaggregate haben immer Abstrahlungsverluste, welche in einem MINERGIE-P-Gebäude einen massgeblichen Beitrag leisten können. Insbesondere ist es vorteilhaft, wenn die Nasszelle direkt an den Technikraum angrenzt. So werden die nach SIA geforderten 22 °C in der Regel ohne Zusatzheizung erreicht. Ferner ist eine zentrale Zusatzheizquelle (mit einer Leistung zwischen 2 und 4 kW) zu empfehlen, um plötzliche Wärmeleistungsbedürfnisse und einen allfälligen Restwärmebedarf abzudecken.

Grundsätzlich sind die Luftverteilungen für die Luftheizungen genau gleich zu konzipieren wie für eine klassische Komfortlüftung. Das heisst die Luftmengen werden nicht über das hygienisch notwendige Mass hinaus erhöht. Hingegen lohnt es sich, die Wärmedämmung der Zuluftrohre gezielt zu planen, so dass auch eine konvektive Wärmeabstrahlung statt findet.

Die Drosselung des Luftwechsels sollte automatisch bei Abwesenheit der Bewohner aktiviert werden, beispielsweise über eine CO₂- oder Feuchte-Messung der Abluft. Dies spart Energie und ist im Winter zudem eine wirksame Massnahme gegen zu trockene Raumluft. Die Betriebsweise „nur Abluft“ sollte in jedem Gerät ermöglicht werden, da viele Bewohner im Sommer die Fenster ohnehin geöffnet haben und somit der Stromverbrauch gesenkt werden kann.

Den Beschattungseinrichtungen muss mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden, da etliche Wohnungen an sonnigen Tagen zur Übererwärmung neigen. Elektrisch angetriebene, windfeste aussenliegende Sonnenstoren (z.B. Rafflamellen) sind das absolute Minimum. Aufgrund dieser Arbeit würden wir auch eine automatische Steuerung empfehlen.

Wirtschaftlichkeit:

In der Praxis werden heute oft auch für Minergie-P und Passivhäuser hydraulische Heizsysteme (Bodenheizung) und Erdsonden verbaut. Mit dem Entscheid zu einem einfachen Luftheizsystem mit Abluftwärmepumpe werden grob gerechnet mindestens CHF 10'000.- Investitionskosten pro Wohnung eingespart. Insgesamt erlaubt das Konzept „Luftheizung mit Kompakthaustechnik“ Minergie-P-Gebäude praktisch zum Preis von Minergie-Bauten zu erstellen. Daher sollen diese Haustechnikkonzepte unbedingt weiter verfolgt werden, damit mehr Gebäude in Minergie-P (luftbeheizt mit 10 W/m²) und Passivhaus-Qualität erstellt werden und nicht nur als Minergie-Standard.

2. Einleitung

Der Bericht ist wie folgt aufgebaut:

Zunächst werden Ausgangslage, Ziele und Vorgehen erläutert.

Es folgt die Gesamtsynthese, welche Aussagen über alle drei untersuchten Gebäude darstellt und Schlussfolgerungen sowie Empfehlungen enthält (Kapitel 4).

Es folgen die Betrachtungen zu jedem untersuchten Wohngebäude (=Objekt). Die Objekte werden zuerst vorgestellt und anschliessend werden in einer Objekt-Synthese die wichtigsten Erkenntnisse geschildert. Detailliertere Erkenntnisse zu den Themen Komfort, Behaglichkeit und Energieverbrauch werden anschliessend in kurzen Abschnitten für jede einzelne Wohnung erklärt und mit Abbildungen illustriert. (Kapitel 5, 6 und 7).

Ohne spezielle Nennung sind mit Quadratmetern jeweils Energiebezugsflächen (EBF) gemäss SIA gemeint, also beheizte Flächen (Aussenmasse).

Nach dem Literaturverzeichnis folgt ein Anhang mit weiteren Detailauswertungen und auch Vorschlägen für Optimierungsmöglichkeiten.

Zudem stehen auch die Messwertfiles zur Verfügung, welche den beteiligten Unternehmungen auf Anfrage zugestellt werden.

Minergie® und Minergie-P® sind geschützte Markenbezeichnungen des Vereins MINERGIE. Zur besseren Lesbarkeit wird das Markenschutzzeichen nicht mehr wiederholt. Es ist zu beachten, dass sich alle Ausführungen auf den MINERGIE-P-Standard, wie dieser bis zum Jahre 2007 definiert war, beziehen. Im Jahre 2008 wurde der MINERGIE-P-Standard leicht abgeändert (für Gebäude mit hydraulischen Verteilsystemen gemildert).

3. Ausgangslage, Ziel und Vorgehen

3.1. AUSGANGSLAGE

Für eine nachhaltige Bauweise gemäss den Zielen der 2000-Watt-Gesellschaft (ETH) und des SIA muss in Zukunft weitgehend nach MINERGIE-P gebaut werden. Diese Bauten haben nur noch einen sehr kleinen Heizleistungsbedarf (ca. 10-15 W/m²) und einen etwa vier Mal kleineren Heizwärmebedarf als Neubauten nach gesetzlichen Minimalanforderungen. Zur Erfüllung der Funktionen Heizen, Lüften und Warmwasser werden seit einiger Zeit Haustechnik-Kompaktgeräte mit reiner Luft-Wärmeverteilung (Luftheizung) eingesetzt. Solche Geräte sind als alleinige Versorgung in MINERGIE-Bauten nicht geeignet. In MINERGIE-P (auch Passivhäuser genannt) hingegen scheinen sich diese zu bewähren. Die gegenüber MINERGIE *etwa zwei- bis dreimal bessere gedämmte* Gebäudehülle der MINERGIE-P-Bauten ist für solche Geräte entscheidend wichtig. Der kleine Heizbedarf ermöglicht eine Wärmeverteilung über die Zuluft. Das gesamte hydraulische Heizsystem kann somit entfallen (wenn auch die spezifische Heizleistung unter 10 Watt/m² bleibt), was zu namhaften Kosteneinsparungen führt. Ergänzend werden in der Regel kleine Zusatzheizgeräte (elektrische Handtuchradiatoren, Strahlungsheizkörper oder auch nur Halogenleuchten sowie Zimmeröfen mit Holz, Pellets oder Alkohol) eingesetzt. Die Planung solcher Anlagen ist für die meisten Haustechnik-Planer heute noch weitgehend unbekannt, was zu Problemen führt. Auch die Gerätehersteller sind auf gesicherte Informationen aus der praktischen Anwendung angewiesen, um die Systeme weiter entwickeln zu können.

Kompaktgeräte lassen im praktischen Betrieb zudem einen kleineren Verbrauch erwarten als modular zusammengestellte Haustechniklösungen (Vergleich Abbildung 3.3.1). Eine Marktstudie des Fraunhofer Instituts für solare Energiesysteme im Jahr 2005 zeigte, dass bereits 14 Anbieter existieren und die 5 grössten rund 1800 Kompaktgeräte auslieferten.

Marktrelevanz: Diese neuartige und erst für hochwärmegedämmte Gebäude realisierbare kostengünstige einfache Haustechnik hat eine sehr hohe Marktrelevanz, da auf politischer Ebene in Zukunft MINERGIE-P-ähnliche Bauten breit gefordert werden könnten.

Dieses Projekt wurde auch im Rahmen der Technologievermittlung des energie-clusters.ch mit der Industrie besprochen und abgestimmt.

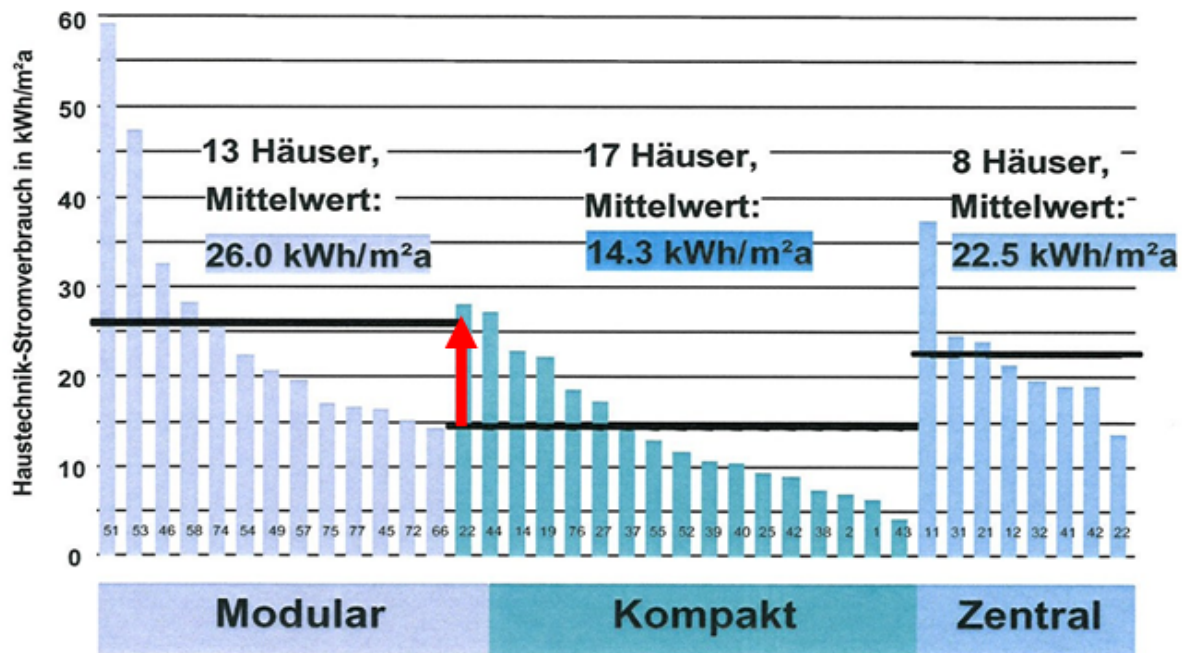


Abbildung 3.3.1 Messungen des Energieverbrauchs von Niedrigenergie-/Passivhäusern in Deutschland. Die Gebäude mit Kompaktgeräten hatten die besten Mittelwerte (Quelle: Fraunhofer Institut)

Abbildung 3.3.1 zeigt, dass Kompaktgeräte in Passivhäusern einen kleineren Verbrauch erwarten lassen als modular¹ zusammengestellte Haustechniklösungen.

¹ Begriffserläuterung: Von einer „modularen“ Lösung spricht man, wenn Wärmepumpe, Lüftung und Boiler getrennt sind. Mit „zentral“ ist eine zentrale Heizung und Lüftung für mehrere Wohnungen gemeint. Letzteres findet nur in Mehrfamilienhäusern Anwendung, während modulare Systeme und Kompaktgeräte auch in Einfamilienhäusern eingesetzt werden können.

3.2. ZIEL

Im Einzelnen werden mit dieser Arbeit folgende Ziele verfolgt:

- Erkenntnisse aus dem Betrieb der ersten grösseren MINERGIE-P Gebäude (MFH) **ohne** hydraulische Heizung
- Messergebnisse zu Komfortparameter mit realen Benutzern
- Messergebnisse zu den Geräteparametern zum tatsächlichen Betrieb
- Basisdaten für MINERGIE-P - Nachweise
- Lehren für die Planung

3.2.1 Absicht

Es geht darum, Erkenntnisse zu Haustechnik-Kompaktgeräte in MINERGIE-P-Bauten zu erhalten:

- a) Betriebsergebnisse bei realisierten Anlagen zu dokumentieren (Erfolgskontrolle)
- b) Hinweise für Geräteoptimierungen
- c) Planungshinweise zu erhalten
- d) Praxisdaten als Basis für das noch zu entwickelnde MINERGIE-P – Nachweis Tool für Kompaktgeräte (das Tool selbst wird in einem separaten Projekt erarbeitet)

Die Arbeiten gliedern sich in eine messtechnische Erfassung, Auswertungen und Berichterstattung.

Im Vordergrund stehen Untersuchungen an den folgenden drei MINERGIE-P Objekten:

- Eichgut, Winterthur (Objekt 1; 90 Wohnungen; Baujahr 2005; Geräte der Fa. Nilan), ZH-007-P
- Seestrasse 20, Uster (Objekt 2; 6 Wohnungen; Baujahr 2006; Geräte der Fa. Viessmann), ZH-008-P
- MFH Los, Scalettastrasse 71 in Chur (Objekt 3; 5 Wohnungen; Baujahr 2007; Geräte der Fa. Gasser Passivhaustechnik / Drexel und Weiss GmbH), GR-007-P

3.3. VORGEHEN

3.3.1 Messungen

Die effektiven Betriebszustände einer Haustechnikanlage sind in hochwärmegeprägten Gebäuden sehr stark von der Einbausituation und von der Nutzung der Räume abhängig. Diese Beobachtung ist bereits vielen Planern und Benutzern von Passivhäusern und MINERGIE-P Objekten bekannt. Das Nutzerverhalten bezüglich Aktivitäten (viel Kochen, Hausarbeit, spielende Kinder, etc.), Anzahl anwesender Personen, Elektrizitätsverbrauch von Geräten (Abwärmen), Nutzung passiver Sonnenenergie (Handhabung der Storen) und Fensterlüftungsverhalten haben einen viel grösseren Einfluss als bei konventionellen Gebäuden. Insbesondere kann es auch häufiger zu Überhitzungssituationen kommen.

Einige dieser Einflüsse können messtechnisch praktisch nur sehr grob erfasst werden (z.B. passive Sonnenenergie/Beschattung, Fenster-/Türöffnungen, Personenpräsenzen und deren Aktivitäten).

Deshalb wurden in acht Wohnungen primär die einfachen Messparameter parallel (gleichzeitig) ermittelt und so unterschiedliche Nutzungssituationen indirekt abgebildet. Die Nutzung selbst wird über Personenpräsenz, Stromverbrauch, Warmwasserverbrauch und Raumtemperaturen erfasst.

Das im Folgenden geschilderte Messprogramm wurde auf die Kompaktgeräte der Firmen Viessmann und Nilan ausgerichtet. Die Firma Gasser Passivhaustechnik ist erst im Verlauf des Messprojektes dazu gekommen. Deshalb starten die Messungen bezüglich Objekt 3 erst im Februar 2008, wurden dafür aber auch bis Februar 2009 fortgesetzt.

Die Messarbeiten gliedern sich wie folgt:

Tabelle 3.1 Messprogramm-Kompaktgeräte: Viessmann Vitotres 343 / Nilan VP18-10P / Aerosmart M

Thema	Messgrössen	Zeitraum	Intervalle	Messmittel
Heizbetrieb	- ZUL-Temp	Juni 07 – Sept 08 (v.a. kalte und heisse Wetter- perioden)	15 Min	„Datataker“
	- ABL-Temp		15 Min	„Datataker“
	- FOL-Temp		15 Min	„Datataker“
	- AUL-Temp		15 Min	„Datataker“
	- Luftgeschw. in ZUL und ABL		15 Min	„Datataker“
	- el. Aufnahme des WP-Gerätes		15 Min	„Datataker“
			15 Min	„Datataker“
Warmwasser	-Warmwasser- verbrauch	Juni 07 – Sept 08	15 Min	„Datataker“
	- WW- und KW- Temp.		10 Liter/Impuls 15 Min	„Datataker“
Raumklima in Wohnungen	- über AbluftTem- peratur	Juni 07 – Sept 08	15 Min	Temp.-Logger
	- rel. Feuchte in Abluft		15 Min	Temp./Feuchte - Logger
	- CO ₂ -Messungen (punktuell)			
Stromverbrauch	- kWh-Zähler (ganze Whg.)	Juni 07 – Sept 08	Monatlich	Zählerablesun- gen
Übrige Zusatz- heizenergie	- Bio-Alkohol - Holz für Holzofen - Pellets	Juni 07 – Sept 08	Monatlich (wöchentlich in relevanten Peri- oden)	Gewichts- erfassung
Nutzungs- protokoll	- Personenprä- senz	Juni 07 – Sept 08	Wöchentlich	Personen- Übernachtungen

Zu beachten sind folgende Abweichungen:

In Uster wird zusätzlich die Leistung der thermischen Solaranlage gemessen.

In Chur werden die Messungen von Februar 08 bis Februar 09 aufgezeichnet. Als Zusatzheizenergie befindet sich ein Pelletofen im Wohnzimmer.

Die Messungen werden in insgesamt acht Wohnungen durchgeführt: 3 Wohnungen in Winterthur (Objekt 1; Nilan-Geräte), 3 Wohnungen in Uster (Objekt 2; Viessmann-Geräte), und 2 Wohnungen in Chur (Objekt 3; Aerosmart-Geräte).

Zusätzlich wird in allen Wohnungen der externe Druck gemessen. Diese Messungen erfolgen auf Wunsch der HSLU (Prof. R. Furter) und ergänzen das *BFE-Projekt „Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs von Klein-Lüftungsanlagen“*.

Detailinformationen zu den Messdaten sind im Anhang aufgeführt.

4. Gesamtsynthese, zusammenfassende Erkenntnisse über alle 3 Gebäude

4.1. KOMFORT UND BEHAGLICHKEIT

Untersucht wurden über das ganze Jahr die Raumlufthtemperatur, die relative Raumlufthfeuchtigkeit, sowie punktuell der CO₂-Gehalt der Raumlufth. Die Raumlufthtemperaturen- und Feuchtigkeit wurden je für Winter und Sommer separat ausgewertet.

Die Raumlufthtemperaturen liegen in allen drei Objekten stets in einem äusserst angenehmen Bereich. Zu unangenehm kühlen Raumlufthtemperaturen kommt es selbst während den kältesten Wintertagen nie. Dagegen treten auch im Winter vereinzelt hohe Raumlufthtemperaturen auf.

Die Auswertung der Messungen über die relative Raumlufthfeuchtigkeit liefert in einigen Fällen etwas weniger erfreuliche Resultate. In allen drei Objekten war das Raumlufthklima immer wieder zu trocken. Am extremsten wurde dieser Umstand in Objekt 3 beobachtet. Grund dafür ist vor allem die Tatsache, dass die Luftvolumenströme nicht der Personenbelegung angepasst wurden (Austrocknung durch Überlüften).

Die Analyse der CO₂-Messungen fällt dagegen wieder sehr positiv aus. Auch bei hoher Personenpräsenz kann durch die Komfortlüftung in den untersuchten Räumen eine gute Luftqualität gewährleistet werden.

4.2. ENERGIEVERBRAUCH

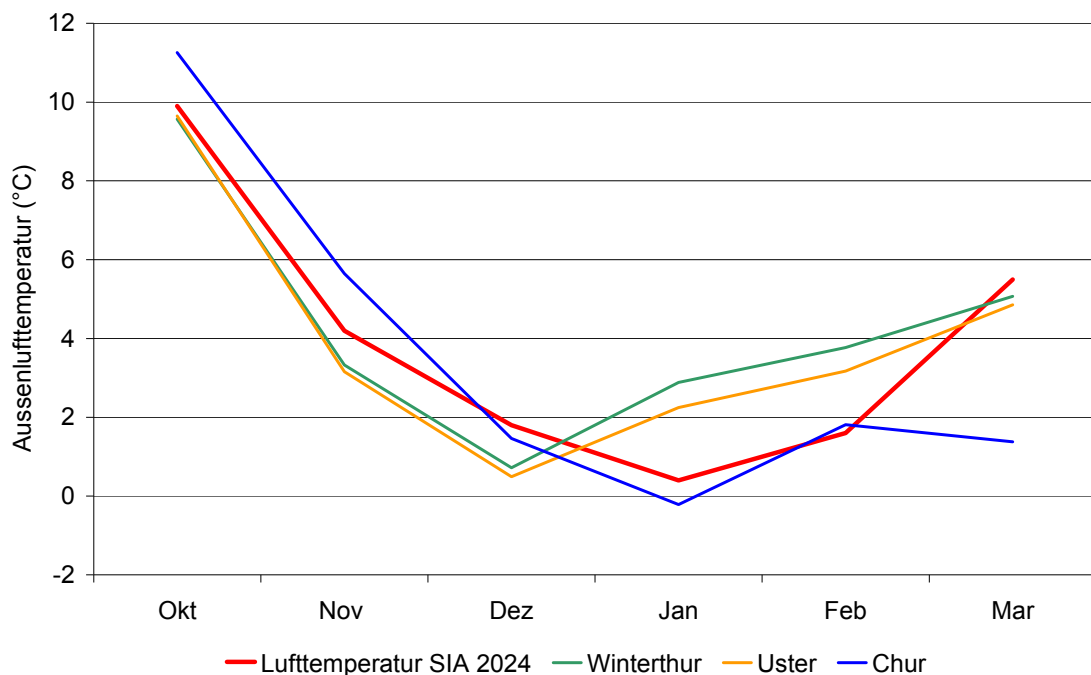


Abbildung 4.1 Während der Messperiode registrierte monatliche Mittelwerte der Aussenlufttemperaturen der drei Objekte. Zum Vergleich sind zudem noch die mittleren Aussenlufttemperaturen nach SIA 2024 in der Region Zürich angegeben.

Abbildung 4.1 zeigt, dass die Aussenlufttemperaturen in Chur doch wesentlich anders verliefen als in Uster und Winterthur, aber über das gesamte Winterhalbjahr betrachtet für alle drei Objekte doch relativ ähnlich sind (mittlere Delta-T). Auch der Vergleich mit den Klimadaten nach SIA 2024 zeigt monatlich etliche Unterschiede, jedoch über das ganze Winterhalbjahr nur geringfügige Abweichungen; d.h. die Mess-Winter in Uster und Winterthur waren nur leicht wärmer als die Referenztemperaturen.

Tabelle 4.1 - Tabelle 4.3 zeigen zusammenfassend den Vergleich zwischen dem IST-Verbrauch, den Planungswerten und den MINERGIE-Anforderungen. In Objekt 1 sind die Energie-Werte mehr oder wenig deutlich überschritten, in Objekt 2 ziemlich genau eingehalten und in Objekt 3 unterschritten. Alle Objekte weisen deutlich höhere Raumlufthtemperaturen und tiefere Warmwassertemperaturen und -verbräuche auf als bei der Planung angenommen wurde.

Tabelle 4.1 Energiekennzahlen (Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerte) sowie weitere technische Informationen von **Objekt 1** (Mittelwerte der gemessenen Wohnungen)

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	8.2	22.6	10.0
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	27.8	42.5	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.6	0.41 h ⁻¹	0.60
Haushaltsgeräte Effizienzkl. A/A ⁺	-	Ja	Nicht geprüft	Ja
Raumlufttemperatur (Winter)	°C	20	22.3	-
Warmwassertemperatur	°C	60	47.6	-
Nettowoohnfläche Whg 1/2/3	m ²	-	90 / 115 / 80	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	99 / 127 / 87	-
Personenbelegung	Pers	-	2 / 2 / 1.7	-
Zuluftvolumenstrom pro Person	m ³ /(h*Pers)	-	60 / 70 / 50	30

Tabelle 4.2 Energiekennzahlen (Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerte) sowie weitere technische Informationen von **Objekt 2** (Mittelwerte der gemessenen Wohnungen)

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	10.8	9.6	11.4
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	28.6	32.3	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.60	0.42	0.60
Haushaltsgeräte Effizienzkl. A/A ⁺	-	Ja	Ja	Ja
Raumlufttemperatur (Winter)	°C	20	22.3	-
Warmwassertemperatur	°C	60	47.9	-
Nettowoohnfläche Whg 1/2/3	m ²	-	173 / 173 / 197	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	203 / 203 / 232	-
Personenbelegung	Pers	-	3 / 3 / 6	-
Zuluftvolumenstrom pro Person	m ³ /(h*Pers)	-	45 / 47 / 24	30

Tabelle 4.3 Energiekennzahlen (Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerte) sowie weitere technische Informationen von **Objekt 3** (Mittelwerte der gemessenen Wohnungen)

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	11.0	9.3	11.1
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	30.0	23.1	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.60	0.5	0.60
Haushaltsgeräte Effizienzkl. A/A ⁺	-	Ja	Nicht geprüft	Ja
Raumlufttemperatur (Winter)	°C	20	21.2	-
Warmwassertemperatur	°C	60	51.8	-
Nettowoohnfläche Whg 1/2	m ²	-	120 / 120	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	160 / 160	-
Personenbelegung	Pers	-	2 / 2	-
Zuluftvolumenstrom pro Person	m ³ /(h*Pers)	-	67 / 71	30

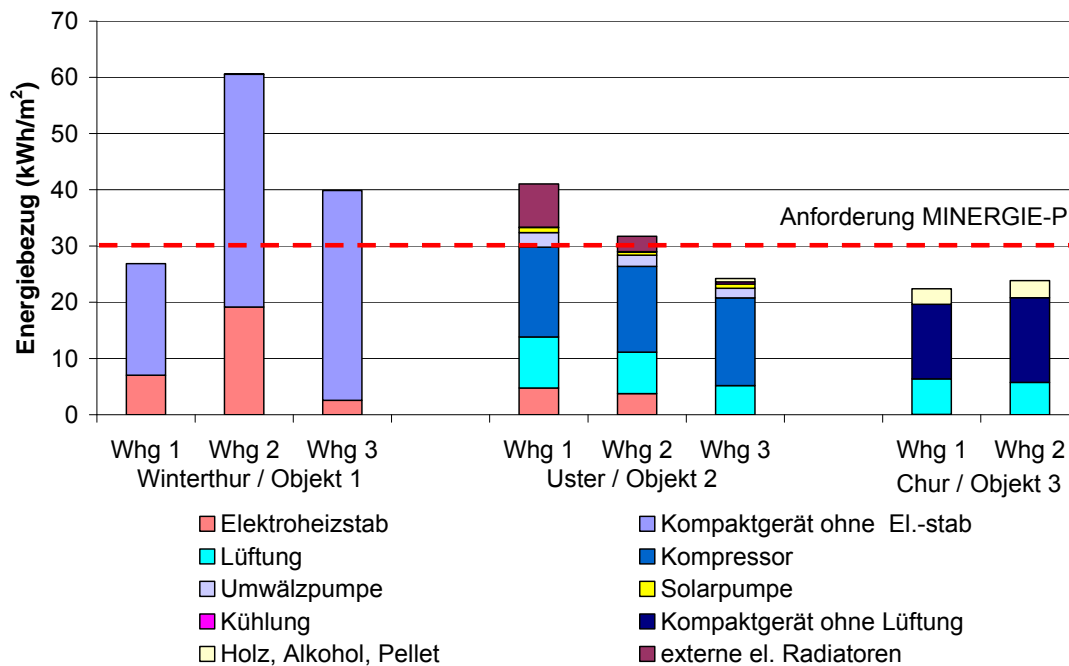


Abbildung 4.2 Energiekennzahl Wärme (nach MINERGIE²) über das gesamte Jahr in den verschiedenen Wohnungen der drei Objekte

Abbildung 4.2 zeigt deutlich, dass die elektrischen Energiebezüge der Kompaktgeräte und Zusatzheizungen von Wohnung zu Wohnung recht stark variieren können. Insgesamt wird der MINERGIE-Grenzwert von 30 kWh/m² leicht überschritten. Wohnung 2 in Objekt 1 (Winterthur) weist den mit Abstand grössten Energiebezug auf. Gründe dafür werden in Kapitel 5.4 gezeigt.

Die Analysen der einzelnen Wohnungen zeigen, dass die eingestellte Raumtemperatur falls höher als etwa 22 °C einen starken Anstieg des Energiebezugs zur Folge hat (z.B. über 100 kWh/Woche bei 24 °C statt 40 kWh/Woche bei 22°C).

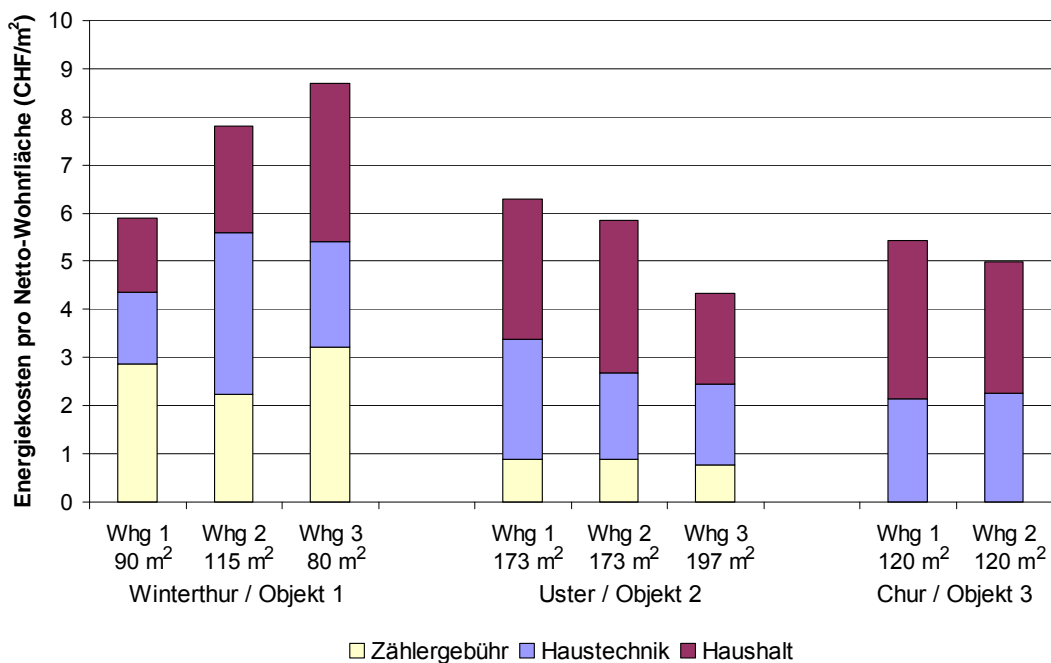


Abbildung 4.3 Energiekosten pro Nettowohnfläche über das gesamte Jahr in den verschiedenen Wohnungen der drei Objekte

Knapp 40% der gesamten Elektrokosten entfallen auf die Haustechnik.

² Gewichtungsfaktoren nach MINERGIE: elektrisch: 2; Alkohol 1; Holz und Pellet: 0.5

4.3. NUTZUNGSRADE UND BASISDATEN MINERGIE

Im Teil „Wärmeerzeugung“ des MINERGIE-Nachweis-Tools können verschiedene Wärmeerzeuger abgerufen werden. Für Kompaktgeräte war es bislang schwierig Daten für die Wärmeerzeugung von den Herstellern zu bekommen, welche nicht auch schon die Wohnungslüftung enthielten.

Die Begleitgruppe legte mit dem Projektteam fest, dass aus diesem Projekt ein Nutzungsgrad ermittelt werden soll, welcher dem Jahresarbeitszahl-Wert (gemäss Minergie-Nachweis) entsprechen könnte. Dieser wird mit Wärmeerzeugungsnutzungsgrad (WNG_{KG-WP}) bezeichnet und lautet:

$$WNG_{KG-WP} = \frac{Q_w + Q_{h-WP} + Q_{hr}}{E_{KG-WP}}$$

(Nutzwärme für WW+Heizung (ohne Erwärmetauscher, EWT + ohne WRG) +Wärmeverluste gegen Umgebung zu aufgewendeter Energie für Solar+Wärmepumpe (WP)+Elektroheizung+Nebenagg.)

Q_w	Nutzenergie Warmwasser
Q_{h-WP}	Nutzenergie Heizung, Kriterium für Heizfall: $t_{ZUL} > t_{ABL}$
Q_{hr}	Wärmeverluste Kompaktgerät gegen Umgebung (Prüfstandsgrösse, fixer Wert, nur im Winterhalbjahr eingerechnet)
E_{KG-WP}	el. Energiebezug Kompaktlüftungsgerät ohne Strom für Lüftung

Analog dazu ein Systemnutzungsgrad: $SNG = \frac{Q_w + Q_v + Q_{hr} + Q_{ZH}}{E_{KG} + E_{ZH}}$ resp. $SNG = \frac{Q_w + Q_v + Q_{hr}}{E_{KG}}$

(Nutzwärme für WW+Heizung+Lüftung mit WRG (inkl. EWT)+Wärmeverluste gegen Umgebung zu aufgewendeter Energie für Solar+WP+Lüftung+Elektroheizung+Nebenaggregate+Zusatzheizung)

Q_w	Nutzenergie Warmwasser
Q_v	Nutzenergie Heizung, Lüftung mit WRG inkl. EWT
Q_{hr}	Wärmeverluste Kompaktgerät gegen Umgebung
Q_{ZH}	Nutzenergie Zusatzheizung (z.B. Elektroöfen, Holzöfen)
E_{ZH}	el. Energiebezug Zusatzheizung
E_{KG}	el. Energiebezug Kompaktlüftungsgerät

Die SNG und WNG_{KG-WP} Werte über das Winterhalbjahr betragen für die drei Gebäude (Mittelwerte der gemessenen Wohnungen):

		SNG	SNG (ohne ext. Zusatzheizung)	WNG_{KG-WP}
A. Nilan VP18-10P	(Objekt 1):	3.22	3.52	1.89
B. Vitotres 343	(Objekt 2):	2.35	2.90	1.76
C. Aerosmart M	(Objekt 3):	3.61	4.87	2.49

Die Ermittlung dieser Werte zeigte die Grenzen von Feldmessungen. Das Projektteam und die Begleitgruppe sind der Ansicht, dass diese Werte zu ungenau sind um mit Jahresarbeitszahlen (JAZ) zu vergleichen. Tendenziell lässt sich sagen: Werte unter 2.0 sind mit den erheblichen Stromanteilen für interne Pumpen und Elektroheizstäbe zu erklären. Gebäude ohne Elektroheizstäbe wiesen durchwegs WNG_{KG-WP} Werte von klar über 2.0 auf.

4.4. HINWEISE ZUR PLANUNG

Die Planung von Luftheizungen ist bekanntlich keine triviale Aufgabe. Beim Einsatz von Luftheizungen in Passivhäusern sind die Anforderungen in bezug auf eine genau abgestimmte Wärmeverteilung auf einzelne Räume jedoch kleiner, da wegen der starken Abtrennung vom Aussenklima sich ohnehin eine sehr ausgeglichene Raumtemperaturverteilung sowie ein sehr träges Verhalten über die ganze Wohnung einstellt. Daraus ergeben sich wichtige Planungshinweise:

4.4.1 Luft- und Wärmeverteilung

Der Heizleistungsbedarf soll 10 W/m^2 nicht übersteigen. Die Wärmeerzeugung soll direkt im beheizten Perimeter stehen. Heizungsaggregate haben immer Abstrahlungsverluste, welche in einem MINERGIE-P-Gebäude einen massgeblichen Beitrag leisten. Da in Kompaktgeräten immer Temperaturen von $45-55 \text{ }^\circ\text{C}$ (Warmwasserspeicher) herrschen, ist auch bei sorgfältiger Wärmedämmung immer eine gewisse Wärmeabstrahlungsleistung vorhanden, die unbedingt dem Gebäude zugute kommen muss. Von besonderem Vorteil ist, wenn in der Grundrissdisposition die Nasszelle direkt angrenzend an den Technikraum gelegt wird. So wird die Nasszelle tendenziell zum wärmsten Raum und die nach SIA geforderten $22 \text{ }^\circ\text{C}$ werden problemlos erreicht, ohne dass eine Zusatzheizung notwendig ist.

Da die Zuluft mit bis zu 55 °C durch den Schalldämpfer, den Luftverteiler und Zimmer-Luftleitungen strömt, und diese wegen Platzmangel nur beschränkt wärmegeklämt sind, ergeben sich auch bei diesen Komponenten erhebliche Wärmeabstrahlungen, welche zu nutzen sind.

Grundsätzlich sind die Luftverteilungen für die Luftheizungen genau gleich zu konzipieren wie für eine klassische Komfortlüftung. Das heisst die Luftmengen werden nicht über das hygienisch notwendige Mass hinaus erhöht und auch werden keine zusätzlichen Räume mit Zuluft versorgt. Das Prinzip der Kaskadenlüftung (Überströmzonen) wird also beibehalten.

Hingegen lohnt es sich das Mass der Wärmedämmung der Zuluftrohre gezielt zu planen. So werden beispielsweise Räume ohne Zuluft (z.B. Wohnzimmer im Überströmbereich) über Wärmeabstrahlung und konvektiv von querenden Zuluftleitungen beheizt. Entsprechend weisen Zuluftrohre in einem gut geplanten Passivhaus nur gezielt in den wichtigen Abschnitten Wärmedämmungen auf. Der Einbezug solcher Wärmeabstrahlung des Zuluftsystems führt zudem zum angenehmen Effekt, dass praktisch in keinem Raum die Zuluft mit einer Temperatur von über 35 °C austritt.

4.4.2 Restwärmebedarf

Wie wird dann ein Restwärmebedarf in einem peripheren Eckzimmer abgedeckt? Nun, wenn man das genau durchrechnet kommt man selten auf eine Restwärmeleistung von etwa 200-300 Watt für ein Zimmer. Die pragmatische Lösung lautet: die Wärmeleistung des Benutzers wird hinzugezogen. Sobald ein Mensch (100 Watt) sich in einem solchen Raum befindet, Licht (60 W) und Geräte (100 W) nutzt, ist nämlich dieser Restheizbedarf abgedeckt. Wohlverstanden soviel Wärme ist auch nur in den kältesten Tagen notwendig. Falls jemand doch eine Lösung möchte, welche auch bei Abwesenheit garantiert Raumtemperaturen von über 20 °C ermöglicht, stehen im Fall der untersuchten Gebäude 1-2 Elektroradiatoren zur Verfügung. In Uster hat es in peripheren Räumen nur thermostatisch gesteuerte Steckdosen. So kann einfach nur eine Beleuchtung (z.B. Halogenlampe mit 100-300 W) angeschlossen werden und sobald es zu kalt wird, schaltet das Licht ein und der Raum wird geheizt, ohne dass ein zusätzliches Heizgerät gekauft wird. Aufgrund der hier vorliegenden Untersuchung kann klar festgehalten werden, dass elektrische Zusatzheizungen die wirtschaftlichste Lösung sind.

Eine zentrale, stärkere Zusatzheizquelle möglichst im Wohnzimmer (wie in Uster und Chur) ist nicht notwendig aber doch zu empfehlen. Aus verschiedenen Gründen (nach Winterferien; wenn doch jemand ein Fenster länger offen liess; Krankheit; evtl. Stromausfall, etc.) können Situationen auftreten, wo die Benutzer die Wohnung möglichst schnell auf eine höhere Temperatur bringen möchten. Pellets- (Objekt 3 in Chur) oder Cheminéeöfen (Objekt 2, Uster) mit Leistungen zwischen 2 bis 4 kW sind für diese Aufgabe geeignet. In Uster sind zudem 3 Wohnungen mit Alkoholöfen ausgerüstet. Mit einer Leistung von 1-2 kW haben auch diese Öfen Akzeptanz gefunden. Allerdings erscheinen uns diese Öfen nicht ungefährlich zu sein, da diese mit Bioalkohol (Brennsprit) befüllt werden, was leicht zu Bränden führen könnte. Inzwischen kann der Brennstoff aber auch in Pastenform erworben werden. Besonders interessant ist, dass diese Öfen keinen Kamin benötigen und auch preislich (ab ca. CHF 800.-) sehr attraktiv sind. Hingegen ist der Brennstoff mit ca. CHF 5.- pro Liter zurzeit noch zu teuer. Die Luftbelastung steigt vor allem durch zusätzliches CO₂ stark an. Zudem sind Schadstoffe durch mangelhafte Verbrennungsqualität nie ganz ausgeschlossen.

Hier orten wir auch einen Innovationsbedarf: Ein Heizgerät, welches mit lagerfähigem günstigem erneuerbarem Brennstoff, ohne Schadstoffe schnell Wärme ungefährlich abgeben kann. Möglichst auf Knopfdruck bedienbar, flexibel einstellbar und in attraktivem Design wären Zusatzwünsche.



Abbildung 4.4 Die beiden in Uster eingesetzten Alkoholöfen (links) und Holz resp. Pelletöfen (rechts)

4.4.3 Planung des Betriebs

Die Luftmenge sollte bei Abwesenheit stark gedrosselt werden. Dies sollte automatisch funktionieren, beispielsweise über eine CO₂-Messung in der Abluft. Eine solche Drosselung spart Antriebsenergie. Im Winter ist eine Drosselung aber vor allem auch eine sehr wirksame Massnahme gegen zu trockene Raumluft. Zudem werden die Lüftungswärmeverluste reduziert. Ein optimiertes Kompaktgerät fährt dann die Luftmenge nur im Heizfall oder bei hohem CO₂-Gehalt hoch. Die direkte Verwendung von Aussenluft auf dem Verdampfer sobald zuwenig Abluft vorhanden ist, wie dies das Gerät der Firma Viessmann (Vitolres 343) ermöglicht, hat diesbezüglich Vorteile, da so auch unabhängig von der Raumlüftung Wärme produziert werden kann.

Einzelraumregulierungen machen in Minergie-P-Gebäuden keinen Sinn mehr, da das Temperaturniveau über alle Räume sehr ausgeglichen ist. Einzelne Räume wärmer oder kühler zu halten ist eigentlich nur über eine entsprechende Zusatzheiz- oder Kühlleistung möglich, was aber kaum je nachgefragt wird.

Generell ist der Stromverbrauch der Kompaktgeräte im Sommer vergleichsweise hoch. In Wohnung 2/3 lief die Lüftung im Sommer während etwa 2-3 Monaten auf reinem Abluftbetrieb und war während drei Wochen ganz ausgeschaltet (Ferienabwesenheit). Dies hat den Stromverbrauch namhaft gesenkt und auch den Nutzungsgrad stark verbessert. Die Betriebsweise „nur Abluft“ sollte in jedem Gerät ermöglicht werden, da viele Bewohner im Sommer die Fenster ohnehin geöffnet haben und damit der Stromverbrauch gesenkt werden kann.

4.4.4 Unerlässliche Beschattung

Etliche Wohnungen zeigen Tendenzen einer Übererwärmung bei sonnigen und nicht allzu kalten Tagen. Das heisst die Beschattungseinrichtungen sind ein wichtiges Element zur Beeinflussung des Raumklimas geworden. Während dem ganzen Sommerhalbjahr herrscht eine latente Überhitzungsgefahr (d.h. Raumtemperaturen von über 26 °C). Je mehr Glasflächen mit Expositionen Ost, Süd und West (und besonders Dachflächenfenster) ohne dauerhafte Beschattungen vorhanden sind, umso grösser ist diese Gefahr. Diese Überhitzungsgefahr war in allen Wohnungen zu beobachten und muss daher sehr ernst genommen werden.

Damit die beweglichen Beschattungseinrichtungen auch wirklich genutzt werden, sind diese zu automatisieren oder zumindest mit elektrischen Antrieben auszurüsten. Eine Automatik, welche zwischen Sommer und Winter, resp. zwischen Sonnenenergie willkommen und „nicht willkommen“ unterscheidet ist unerlässlich. Denn falls Beschattungen auch bei Heizbedarf geschlossen bleiben (weil Bewohner an schönen Wintertagen die Beschattung eventuell nicht öffnen, z.B. weil sie abwesend sind), steigt der Heizbedarf namhaft an.

4.5. VERSCHIEDENE ERKENNTNISSE UND FOLGERUNGEN

Generell wurden in den verschiedenen Wohnungen sehr unterschiedliche Nutzerverhalten festgestellt. Insbesondere hat die am Gerät eingestellte Raumlufttemperatur einen sehr grossen Einfluss auf den Energiebezug des Kompaktgerätes. Abbildung 5.25 beispielsweise zeigt diesen Umstand deutlich. Aufgrund der Messwertanalyse kann gesagt werden, dass pro Grad höherer Raumlufttemperatur etwa 20-25 % Mehrenergie beansprucht werden (ab dem Bereich 21-22°C). Umgekehrt reduziert sich der Heizenergieverbrauch stark, wenn man sich mit Raumtemperaturen von 20-21°C zufrieden gibt. Es zeigt sich auch, dass bei hohen mittleren Raumtemperaturen die Nutzungsgrade tief sind. Weiter wurde bemerkt, dass Gewohnheiten wie zum Beispiel tägliches Fensteröffnen den Energiebedarf nennenswert vergrössern und die Raumluft zusätzlich austrocknen (Whg. 2 in Objekt 1).

Deshalb ist eine wichtige Erkenntnis, dass sich die Bewohner von MINERGIE-P Bauten bewusst sein sollten, dass sie eine Wohnung mit grossem passivem Wärmeanteil bewohnen und ihr Nutzerverhalten andere Auswirkungen hat, als in einer konventionellen Wohnung. Beispielsweise kann, abgesehen von Ausnahmesituationen, auf tägliches Fensterlüften gänzlich verzichtet werden. Eine Anpassung des Nutzungsverhaltens gelingt aber nur, wenn die Eigentümer/ Mieter von den Planern, Bauherren, Liegenschaftsverwaltungen, usw. detailliert informiert werden.

Die Verfasser des Berichts möchten Bewohner von Minergie-P Bauten insbesondere auf folgende Grundsätze aufmerksam machen:

- Die Raumtemperatur sollte, insbesondere in Kälteperioden von unter 0°C, in einem vernünftigen Rahmen gehalten werden. Optimal sind während der kalten Jahreszeit Temperaturen zwischen 21 und 22 °C. (Falls gar 20 °C akzeptiert wird, sinkt der Wärmebedarf auf sehr tiefe Werte)
- Die Luftqualität ist in Bauten mit Komfortlüftungen hervorragend. Deshalb sollten die Fenster nur in Ausnahmesituationen geöffnet werden.
- Überhitzungen können durch die Betätigung der aussenliegenden Beschattungseinrichtungen wirksam vermieden werden (reduziert Einstrahlung um 80-90%)
- Bei längerer Abwesenheit (aber nur ausserhalb der Heizperiode) sollte die Lüftung möglichst ausgeschaltet resp. stark reduziert betrieben werden.
- Der wohnungsinterne Temperatenausgleich kann durch Öffnen oder Schliessen von Zimmertüren um 1 bis 2 Grad Celsius beeinflusst werden.

An die Planer und Gerätehersteller sind folgende Hinweise gerichtet:

Es ist fraglich, ob eine werksmässige Aktivierung der Heizstäbe sinnvoll ist. (Geräte in Objekt 1 und 2). Die Geräte von Drexel & Weiss (Objekt 3) werden bereits heute standardmässig mit deaktivierten Heizstäben ausgeliefert.

Die Kompaktgeräte haben aufgrund der Erkenntnisse in dieser Studie allesamt noch ein gewisses Effizienzverbesserungspotential. Verschiedene Nutzerverhalten sollten auch auf dem Prüfstand durch verschiedene Zyklen simuliert werden. Insbesondere sollten die Geräte auch auf hohe Raumtemperaturen und hohe Warmwasserbezüge getestet werden. Allenfalls könnte auch die Beschattung gesteuert werden.

4.5.1 Gute Latent-Wärmespeicher würden die Effizienz und den Komfort noch verbessern

Die richtige Bewirtschaftung der Wärmegewinne (solar und durch die Nutzung) ist von zentraler Bedeutung in Minergie-P resp. Passivhäusern. Wir denken, dass dies eine zentrale Erkenntnis aus dieser Arbeit ist. Es handelt sich eben wirklich um **Passivhäuser**, das heisst diese Gebäude leben von den eingestrahlenen, resp. vorhandenen Wärmen (passiv).

Neben der geschickten Steuerung des Wärmeangebots (eingestrahlte Sonnenenergie) ist aber auch dem Wärmemanagement im Innern noch vermehrt Beachtung zu schenken. Speichermasse ist zweifelsohne unentbehrlich um Angebotsspitzen auszugleichen. Im Rahmen dieser Messprojekte konnte gut gesehen werden, dass die Perioden von Unterangebot an Wärme (sehr kaltes Wetter ohne Sonne) meistens nur einige Tage dauern. Somit braucht es keine „Saisonspeicherung“ sondern Speicher für einige Tage. Da die Nutzer meistens nur wenige Temperaturschwankungen akzeptieren wollen, sind vor allem **Latentwärmespeicher** mit einem Latentpunkt bei etwa 23 (22-24) °C verstärkt zu erforschen und zu entwickeln. Direkt an den Decken und Wänden angebrachtes Latentspeichermaterial (Phase Change Material, PCM) beispielsweise im Gips gebunden scheint uns ein sehr zweckmässiger Weg zu sein.

4.5.2 Luftheizung - ja oder nein?

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass Passivhäuser mit Luftheizung die energetischen Werte und Erwartungen der Bewohner (Temperaturen) einhalten können. Es kann allerdings vorkommen, dass bei langen Kälteperioden ohne Sonne (Hochnebel-Wetterlagen) und Abwesenheit der Bewohner (keine Abwärme) die Raumtemperaturen kurzzeitig nicht oder nur knapp (20 °C) eingehalten werden können. Die Nutzer, welche wir auf diese Thematik angesprochen haben bestätigten, dass sobald wieder Aktivität in die Wohnung einkehrt, die gewünschten Temperaturen sehr schnell wieder erreicht werden. Dies verlangt eine gewisse Gewöhnung. Dies ist auch nicht verwunderlich, da eine 100 m² grosse Wohnung lediglich 1000 Watt Wärmeleistung (10 W/m² bei Auslegung) benötigt. Die Lüftung selbst bringt bei üblicher Auslegung von beispielsweise 3 x 30 m³/h rund 800 Watt (bei Delta-T von 26.5 Kelvin). Zwei Personen bringen mit je 100 Watt (Körperwärme) den restlichen noch notwendigen Fünftel der Heizlast hinzu.

Angesichts dieser Tatsachen erscheinen uns folgende Voraussetzungen für eine Luftheizung wichtig:

- Der Heizleistungsbedarf soll das Kriterium $< 10 \text{ W/m}^2$ einhalten
- Die Luftmengen werden nicht über das hygienisch notwendige Mass erhöht (Faustregel: $1 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Quadratmeter EBF)
- Eine Zusatzheizung, am besten in Form eines Holz- oder Alkoholorfens (speicherbare, netz-unabhängige Biomasse als Brennstoff) ist mindestens in einem zentralen Raum vorhanden
- Die Benutzer sind über das andersartige Heizsystem informiert
- (falls Behörden/Zertifizierungsstellen auf „Einzelraumsteuerung“ beharren, hat sich das zur Verfügung stellen von thermostatisch gesteuerten Steckdosen bewährt)

Wirtschaftlichkeit:

In der Praxis werden heute oft auch für Minergie-P und Passivhäuser hydraulische Heizsysteme (Bodenheizung) und Erdsonden verbaut. Mit dem Entscheid für solche einfache Luftheizsysteme werden grob gerechnet mindestens CHF 10'000.- Investitionskosten pro Wohnung eingespart. Insgesamt erlaubt das Konzept „Luftheizung mit Kompakthaustechnik“ Minergie-P-Gebäude praktisch zum Preis von Minergie-Bauten zu erstellen.

Oder anders gerechnet: Mit zusätzlichen CHF 10'000.- Investitionskosten pro Wohnung müssten eigentlich mindestens 2400 kWh eingespart werden um nur annähernd eine sinnvolle Wirtschaftlichkeit auszuweisen (Annahme: 20 Rp./kWh und Annuität von 4.8% (30 Jahre; 2.5%)). Der Unterschied zwischen Minergie und Minergie-P beträgt für eine 100 m² grosse Wohnung jedoch lediglich 400 kWh.

4.5.3 Forschungs- und Entwicklungsbedarf für effiziente Zusatzheizungen

Wie bereits gezeigt wurde, spielen kleine Zusatzheizungen in hochwärmegedämmten Gebäuden eine zunehmend wichtige Rolle für den kleinen, meist kurzfristigen zusätzlichen Wärmeleistungsbedarf. Diese Beobachtung wird selbst in Minergie-P-Gebäuden und auch Minergiegebäuden mit klassischer Bodenheizung gemacht, da auch dort das Heizsystem knapp ausgelegt ist und vor allem recht träge ist. Das Bedürfnis nach schnell verfügbarer Heizleistung ist generell beobachtbar. Da Elektrizität als hochwertige Energie möglichst nicht in Widerstandsheizungen verbraucht werden soll, wären Alternativen wünschbar. Im Rahmen der energie-cluster.ch Technologievermittlung wurde eine erste Projektskizze für Emissionsarme Zusatzheizungen basierend auf speicherfähiger Energie erstellt.

5. Objekt 1: MFH Eichgut, Winterthur

5.1. GEBÄUDE-SITUATIONS-BESCHREIB



Abbildung 5.1 Blick auf die Südfassade, Objekt 1

Die Überbauung beinhaltet 90 Miet-Wohnungen, verteilt auf 6 Geschossen. Sie liegt in Winterthur im Quartier Neuwiesen an sehr zentraler Lage (direkt neben dem Hauptbahnhof).

5.1.1 Energiekonzept

Dank innovativem Energiekonzept benötigt eine Wohnung im Eichgut nur einen Fünftel der Heizenergie, die eine konventionell erstellte Wohnung brauchen würde. Geheizt werden die Räumlichkeiten mit der Lüftung. Die Wärmeerzeugung für Raumheizung und Warmwasser erfolgt mittels Wärmerückgewinnung und einer Wärmepumpe zur Nutzung der Abwärme der Abluft. Die Aussenluft wird über ein gemeinsames Lufterdregister angesaugt. Die Zuluft wird über Deckenventile eingeblasen.

Die totale Energiebezugsfläche EBF der Überbauung beträgt 11653 m^2 und das Oberflächen-Volumenverhältnis A/EBF beträgt 0.61.

5.1.2 Gebäudehülle

Die hochwärmegedämmte Gebäudehülle hat folgende Kennzahlen (U-Werte in $\text{W/m}^2\text{K}$):

Aussenwände	0.10 – 0.14
Flachdachbereich	0.07
Fenster U_w	0.81 (Glas U-Wert = 0.5; g = 51%)
Boden gegen unbeheizt	0.2
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	0.41 h^{-1}

5.1.3 Haustechnik

Die Aussenluft strömt über insgesamt neun Schächte zu den dezentralen Kompaktgeräten. Die Geräte sind vom Typ Nilan VP18-10P. In diesen sind 180-Liter-Boiler, Wärmepumpe und Gegenstromwärmetauscher in einem 230 cm hohen Kasten eingebaut (Vergleich Abbildung 5.4). Die Wärmepumpe dient der Nachwärmung der Zuluft und der Wassererwärmung einer Wohnung. Die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe betragen gemäss Hersteller im Heizbetrieb 2.9 und im Warmwasser-Betrieb 3.1. Der Kompressor benötigt zwischen 220 W und 340 W Strom. Zahlreich sind die Vorteile des verwendeten Lufterdregisters (LER). Das LER bannet die Frostgefahr, alimentiert das Lüftungssystem mit Wärme, verbessert so die Gesamtbilanz des Lüfterneuerungssystems und hat schliesslich eine sommerliche Kühlwirkung. Als Zusatzheizenergie verfügen alle Wohnungen über je zwei Elektroradiatoren, die bei Bedarf eingeschaltet werden können. Diese wurden mit einem separaten Elektrizitätszähler erfasst.

Messkonzept Winterthur

Messstellenplan

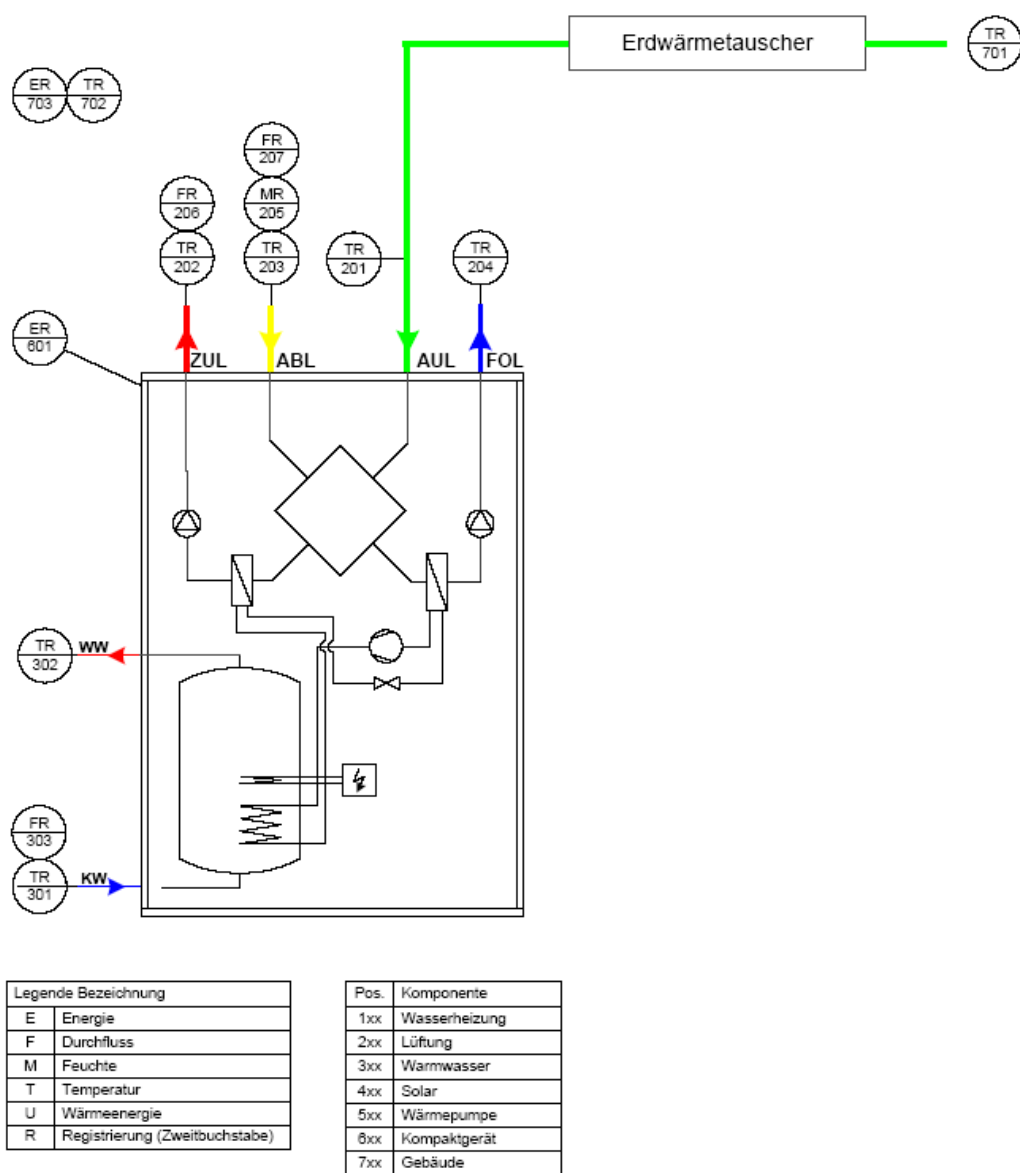


Abbildung 5.2 Messschema des Kompaktgerätes (Nilan/VP18-10P)

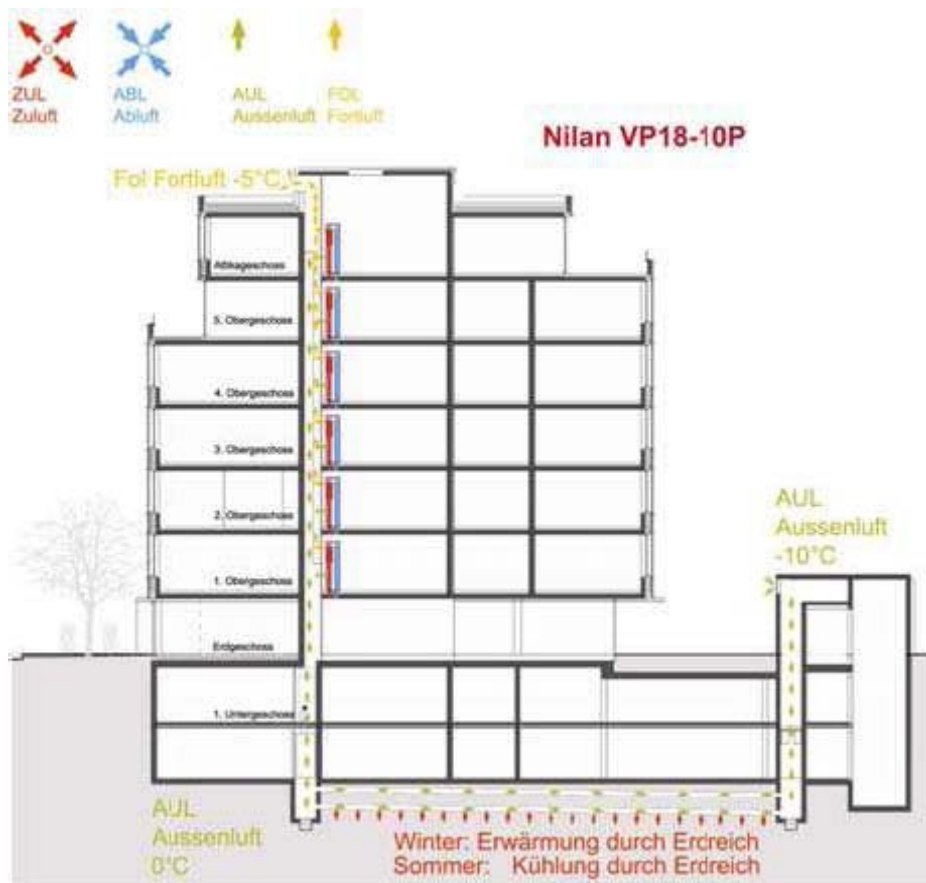


Abbildung 5.3 schematische Darstellung der Lüftung und Heizungskomponenten in Objekt



Abbildung 5.4 Einbauschacht mit Kompaktgerät Nilan VP18-10P

5.2. SYNTHESE OBJEKT 1

Bei den drei untersuchten Wohnungen in diesem Objekt handelt es sich um eine Wohnung (Whg 1) aus einem Mittelgeschoss (3.OG) und zwei Wohnungen aus der obersten Etage (Whg 2 und 3). Wohnung 1 weist eine Nettowohnfläche von 90 m² auf und wird von zwei Personen bewohnt. Wohnung 2 ist mit einer Nettowohnfläche von 115 m² die grösste und wird von zwei Personen genutzt. Wohnung 3 ist mit 80 m² die kleinste analysierte Wohnung von Objekt 1. In dieser Wohnung lebte zunächst eine Person, ab Mitte Dezember zwei Personen.

Die Luftmengen, gemessen in Form der Volumenströme der Zu- und Abluft, betragen in Wohnung 1 120 m³/h (Zuluft) und 95 m³/h (Abluft) und in Wohnung 2 140 m³/h (Zuluft) und 120 m³/h (Abluft). In Wohnung 3 wechselten während der Messperiode die Mieter. Das Nutzungsverhalten der verschiedenen Mieter ist sehr unterschiedlich. Diese Tatsache widerspiegelt sich auch in den gemessenen Volumenströmen. Für die erste Mieterin wurden durchschnittliche Volumenströme von 145 m³/h (Zuluft und Abluft). Bei den Nachmietern wurde ein mittlerer Zuluftvolumenstrom von 100 m³/h und ein durchschnittlicher Abluftvolumenstrom von 85 m³/h registriert. Zu erwähnen ist zudem, dass in allen Kompaktgeräten der drei Wohnungen sowohl ein Elektroheizstab zur Warmwasseraufbereitung (Leistung: 1000 W) als auch einen Elektroheizstab zur Zulufterhitzung (Leistung 700 W) eingebaut und aktiviert ist.

Für alle Wohnungen von Objekt 1 sind im Anhang am Schluss Grundrisspläne beigelegt.

5.2.1 Komfort und Behaglichkeit

Bezüglich des Wohnkomforts spielen die Raumlufttemperatur und die relative Raumluftfeuchtigkeit eine zentrale Rolle. Deshalb wurden alle Wohnungen auf diese beiden Parameter geprüft. In der folgenden Darstellung sind die Ergebnisse der drei Wohnungen von Objekt 1 abgebildet.

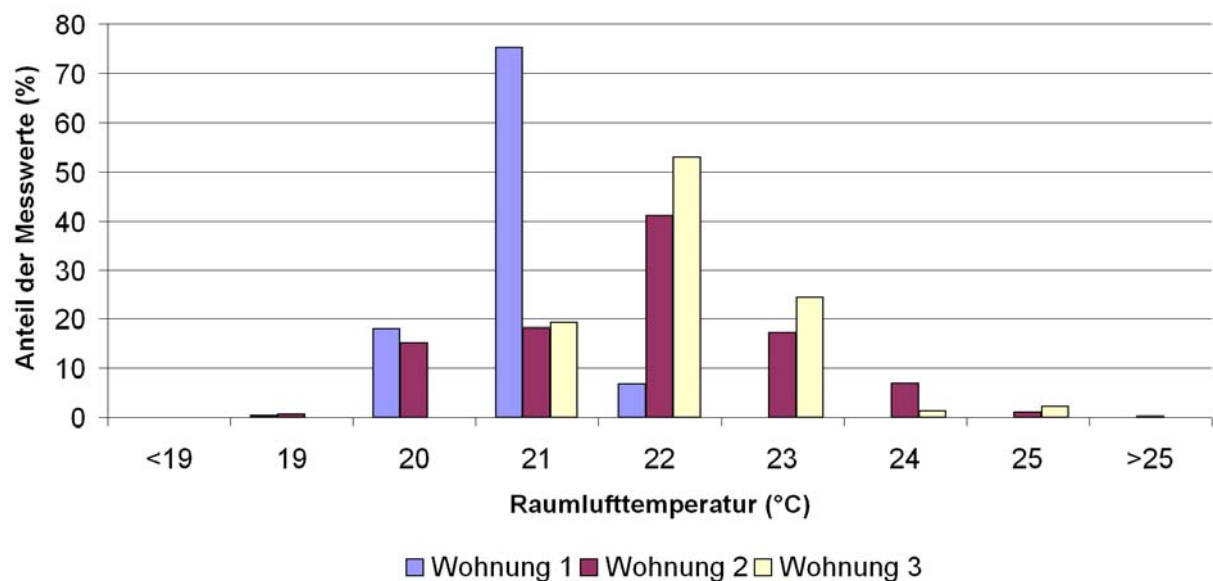


Abbildung 5.5 Häufigkeitsverteilung der Raumlufttemperatur während den vier kältesten Wintermonaten in den verschiedenen Wohnungen von Objekt 1 (1. November 2007 bis 29. Februar 2008)

In allen drei Wohnungen war die Raumtemperatur selbst in der kältesten Jahreszeit immer in einem angenehmen Bereich. Wohnung 1 weist verhältnismässig die tiefsten und Wohnung 3 die wärmsten Raumtemperaturen auf. Die Raumtemperaturen liegen im Mittel bei 20.9, 21.9 und 22.2 °C und damit klar über den Planungsgrundlagen von 20 °C.

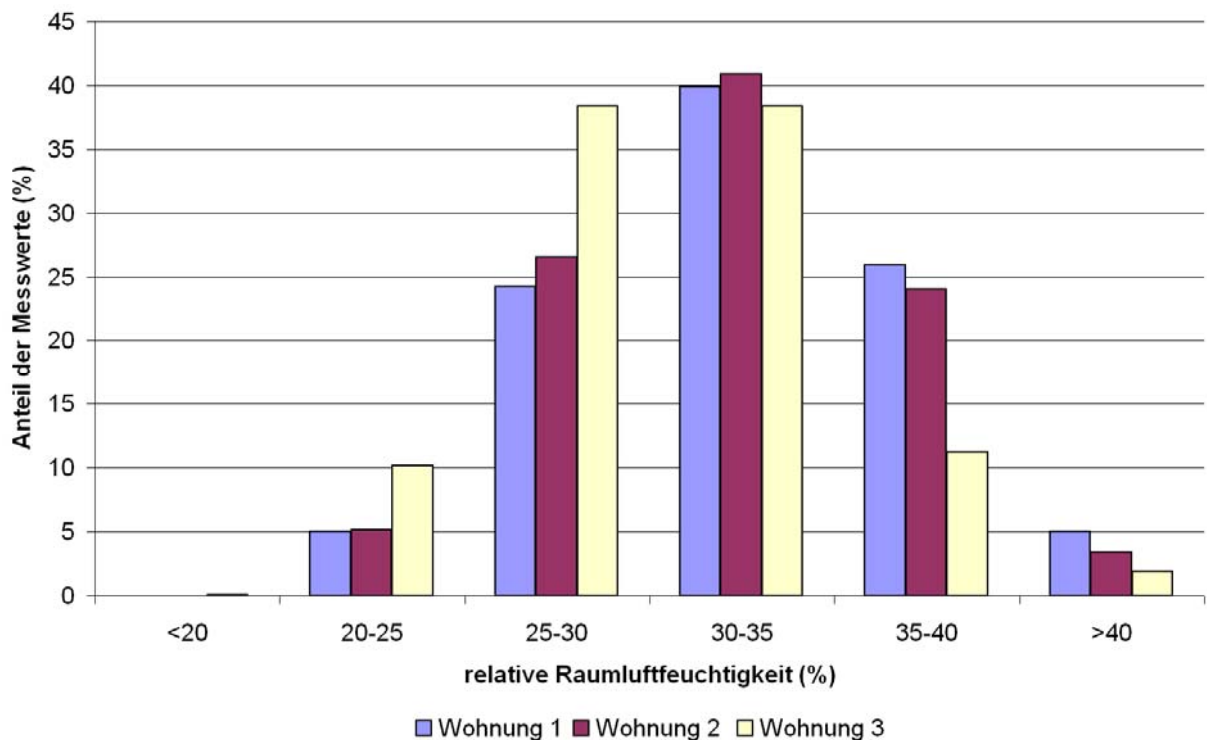


Abbildung 5.6 Häufigkeitsverteilung der relativen Raumluftheuchtigkeit während den vier kältesten Wintermonaten in den verschiedenen Wohnungen von Objekt 1 (1. November 2007 bis 29. Februar 2008)

In Abbildung 5.6 wird ersichtlich, dass die relative Raumluftheuchtigkeit in allen drei Wohnungen nicht selten unter 30 % lag. Vor allem bei tiefen Aussenlufttemperaturen sind vermehrt Messwerte unterhalb des SIA-Behaglichkeitsbereichs aufgetreten. Dies ist eine allgemein bekannte Tatsache und hat damit zu tun, dass die Raumluftemperaturen allgemein eher (zu) hoch sind und vor allem auch damit, dass die Aussenluftzufuhr bei kalten Tagen und geringer Personenpräsenz nicht gedrosselt wird. Mit Zuluftvolumenströmen von über 50 m³/h pro Pers. (Tabelle 5.1) ist dies nicht überraschend. Dennoch ist zu beachten, dass auf den Wohnkomfort die Raumtemperatur im Gegensatz zur relativen Raumluftheuchtigkeit die dominantere Rolle spielt. Auf diesen Umstand wird in den Einzelanalysen der verschiedenen Wohnungen weiter eingegangen.

5.2.2 Energieverbrauch

Tabelle 5.1 Vergleich der Energiekennzahlen zwischen den Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerten sowie weitere technische Informationen von Objekt 1 (Mittelwerte der gemessenen Wohnungen)

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	8.2	22.6	10.0
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	27.8	42.5	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.6	0.41 h ⁻¹	0.60
Haushaltsgeräte mit Effizienzklasse A/A ⁺	-	Ja	Nicht geprüft	Ja
Raumluftheuchtigkeit (Winter)	°C	20	22.3	-
Warmwassertemperatur	°C	60	47.6	-
Nettowohnfläche Whg 1/2/3	m ²	-	90 / 115 / 80	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	99 / 127 / 87	-
Personenbelegung	Pers	-	2 / 2 / 1.7	-
Zuluftvolumenstrom	m ³ /(h*Pers)	-	60 / 70 / 50	30

Der Heizwärmebedarf (Nutzenergie, welche über das Kompaktgerät abgedeckt wird) ist in diesen drei Wohnungen enorm unterschiedlich. Den geringsten Heizwärmebedarf weist mit 2.6 kWh/m^2 Wohnung 1 auf. Derjenige von Wohnung 2 ist mit 37.2 kWh/m^2 über 15-mal grösser! Dabei muss erwähnt werden, dass Wohnung 1 von den umliegenden Wohnungen passiv Wärme bezieht. Da die Raumtemperatur mit 21°C eher tief ist, dürfte dieser Effekt stark sein. Dadurch wird auch ersichtlich, wie gross das Benutzerverhalten den Energieverbrauch eines Passivhauses beeinflussen kann.

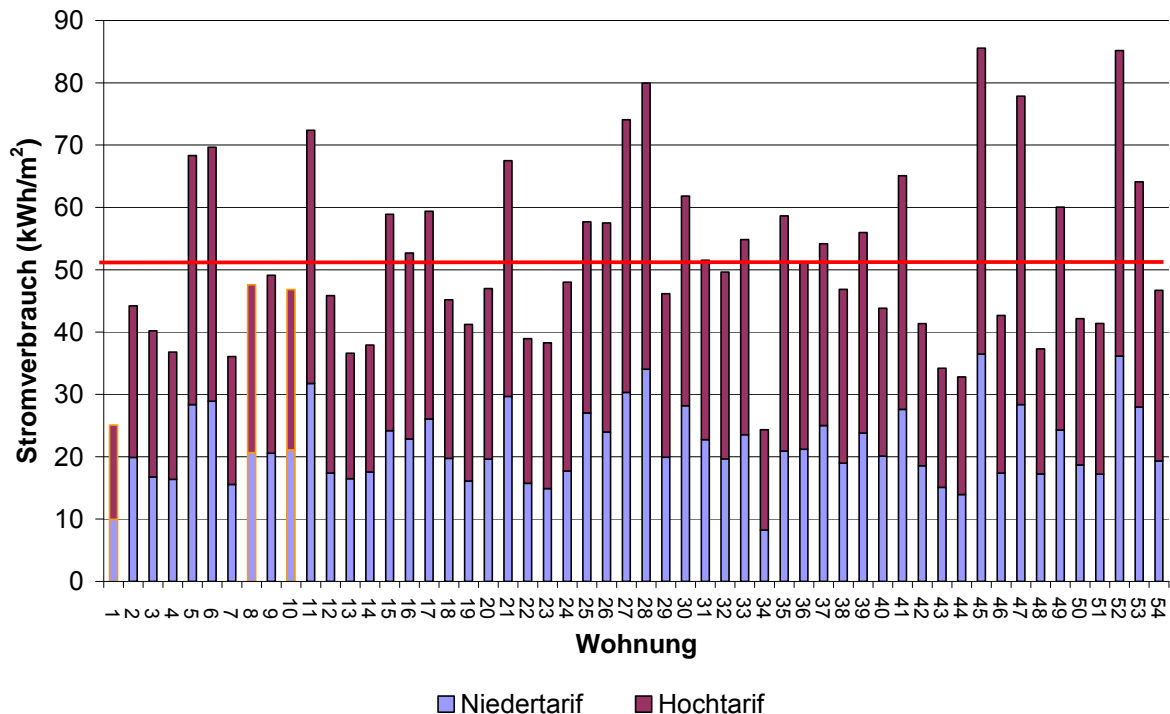


Abbildung 5.7 Stromverbrauch pro Wohnung und Mittelwert (51.5 kWh/m^2 , rote Linie) pro Energiebezugsfläche in 54 Wohnungen von Objekt 1 während dem gesamten Jahr (1. Oktober 2007 bis 30. September 2008 aufgrund von Zählerablesungen) Detaillierte Messungen wurden in den Wohnungen 1 (1), 2 (8) und 3 (10) durchgeführt.

Alle Wohnungen sind mit demselben Kompaktgerät (Nilan VP18-10P) ausgerüstet. Die hervorgehobenen Wohnungen sind diejenigen, welche detailliert untersucht wurden. Diese drei Wohnungen weisen Strombezüge auf, die unterhalb des durchschnittlichen Stromverbrauchs von 51.5 kWh in Objekt 1 liegen. Zum Vergleich sei auf den mittleren Haushaltstromverbrauch eines typisch schweizerischen 2 Personen-Haushaltes hingewiesen. Bei einem Strombezug von 3500 kWh pro Jahr (exkl. Heizung; Quelle Bulletin SEV/VSE 19/2007) und eine Energiebezugsfläche von 100 m^2 ergibt sich ein Stromverbrauch von 35 kWh/m^2 . Somit wären hier für die Haustechnik rund 16.5 kWh/m^2 einzusetzen. Wie im weiteren Verlauf dieses Berichtes beschrieben wird, macht der Stromverbrauch des Kompaktgerätes während des gesamten Jahres im Mittel weniger als 50 % des totalen Stromverbrauchs aus. Somit liegt der Stromverbrauch in den meisten Wohnungen mit Sicherheit unterhalb des schweizerischen Durchschnitts. Dies ist vermutlich die Auswirkung der A-Geräte in den Haushalten. Die Tatsache, dass einige Wohnungen aber relativ hohe Stromverbräuche aufweisen, ist nur durch das Benutzerverhalten zu erklären. Die mit Farbe hervorgehobenen, detailliert untersuchten Wohnungen liegen alle unterhalb des CH-Durchschnitts. Wohnung 1 (C3.5) weist einen sehr tiefen Stromverbrauch auf. Dies kann einerseits daran liegen, dass diese Wohnung während der Messperiode teilweise nur von einer Person bewohnt worden ist, und andererseits aber sicher auch am Benutzerverhalten. Wie gross die Auswirkung des Benutzerverhaltens sein kann, zeigt allein der Unterschied des gesamten jährlichen Strombezugs pro EBF von gut 61 kWh/m^2 zwischen dem grössten und kleinsten Verbraucher. Oder mit anderen Worten: der energieintensivste Haushalt benötigt 3.5 Mal mehr Energie als der sparsamste Haushalt.

Diese Betrachtung über 54 Wohnungen diene zur Abschätzung, wo in Bezug auf die anderen Wohnungen unsere drei gemessenen Wohnungen energetisch liegen. Leider wissen wir nicht wie gross die Anteile der Haustechnik in den verschiedenen Wohnungen sind. Nur bei den drei Messwohnungen wissen wir dies.

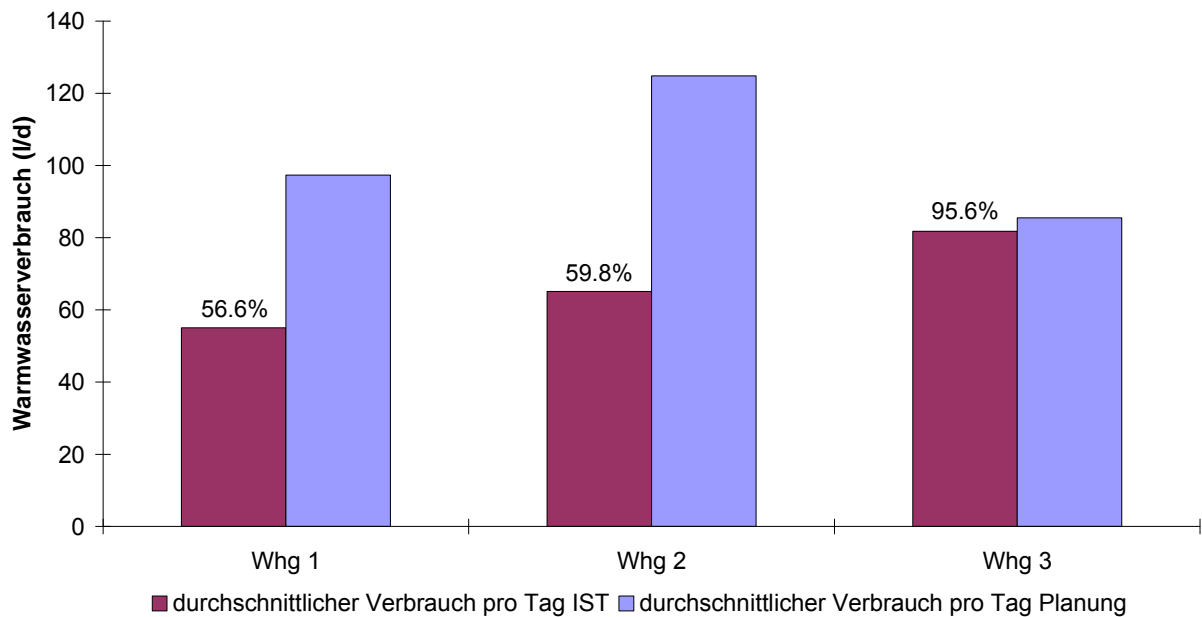


Abbildung 5.8 Durchschnittlicher täglicher Warmwasserverbrauch in den drei Wohnungen von Objekt 1 während den vier kältesten Wintermonaten (1. November 2007 bis 29. Februar 2008) im Vergleich mit dem Planungswert nach SIA 380/1

Warmwasser:

Die Planungswerte basieren auf der SIA Norm 380/1. Gemäss dieser entspricht die Warmwasserenergie (Q_{WW}) 75 MJ/m²/Jahr (=20.8 kWh/m²/Jahr). Mit einem Temperaturgradienten (ΔT) von 50 K ergeben sich somit für die Wohnungen 1-3 von Objekt 1 geplante durchschnittliche Warmwasserbezüge von 97.3 l/d, 124.8 l/d und 85.5 l/d.

Der absolute Warmwasserverbrauch von Wohnung 1 ist am tiefsten. Weil diese Wohnung während des berücksichtigten Zeitraumes fast ausschliesslich von einer Person bewohnt wurde, ist klar weshalb der Warmwasserbezug so viel niedriger ist als bei der Planung angenommen wurde. Für den tiefen Verbrauch von Wohnung 2 geht aus der Personenpräsenzanalyse keine logische Erklärung hervor.

5.2.3 Elektrizitätsverbrauch des Kompaktgerätes

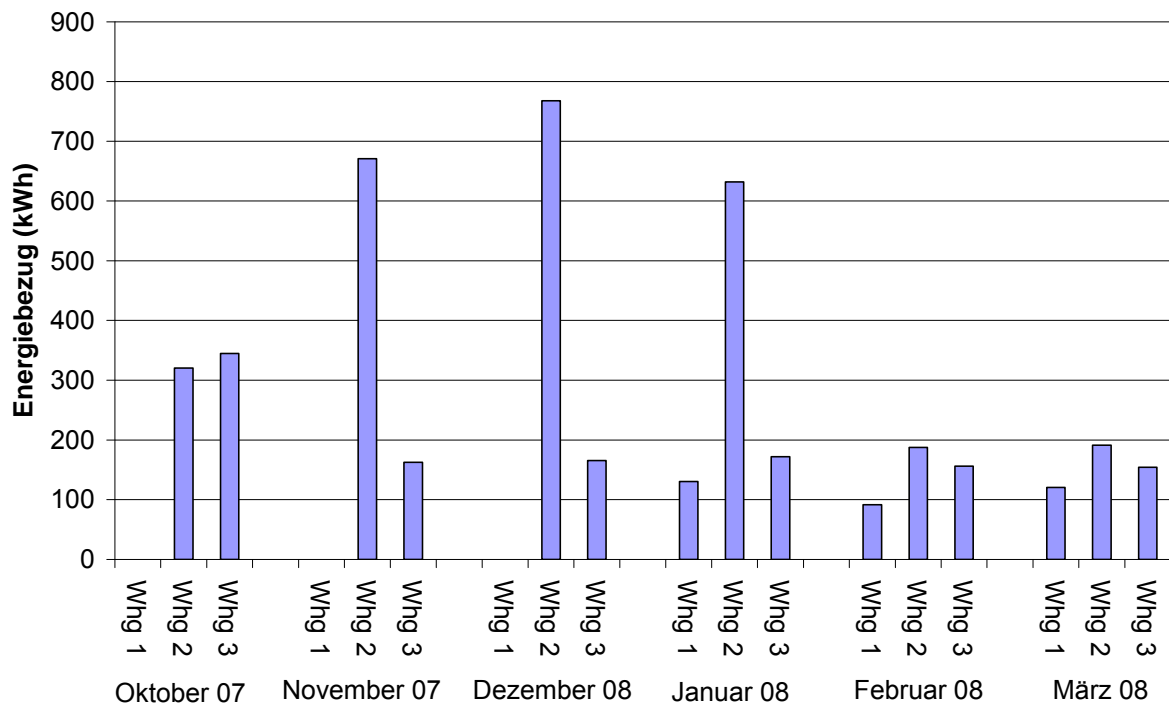


Abbildung 5.9 Monatliche Energiebezüge der Kompaktgeräte während des gesamten Winterhalbjahres (1. Oktober 2007 bis 31. März 2008) in den verschiedenen Wohnungen von Objekt 1

Wohnung 1 weist stets den geringsten Energiebezug auf. Dies ist auf die Anzahl Bewohner sowie deren Nutzungsverhalten zurückzuführen.

Bezüglich Wohnung 2 wird in Abbildung 5.9 deutlich ersichtlich, dass Ende Januar eine Änderung an den Geräteeinstellungen (vermutlich wurde die gewünschte Raumlufttemperatur herabgesetzt) vorgenommen wurde. Anders ist der extreme Unterschied zwischen den Januar- und Februarbezügen nicht erklärbar. Diese Geräteeinstellungsänderung ist in der detaillierten Auswertung von Wohnung 2 (Kapitel 5.4) in mehreren Grafiken deutlich erkennbar.

Beim Betrachten von Wohnung 3 fällt auf, dass der Bezug im Oktober 2007 deutlich grösser war als in den restlichen Monaten. Der Grund dafür ist, dass die Mieterin am 1. November verstorben ist. Wohnung 3 blieb darauf bis 16. Dezember unbewohnt, während das Kompaktgerät in Betrieb blieb. Die Nachmieter haben offensichtlich deutlich weniger geheizt als die vorherige Bewohnerin, weshalb der Energiebezug des Kompaktgerätes im Vergleich zum November nur minim anstieg.

Um diese Abbildung noch besser interpretieren zu können, sei auf folgenden Vergleich hingewiesen: Der durchschnittliche schweizerische Haushaltsstromverbrauch liegt bei knapp 300 kWh pro Monat (für Haushalt ohne Heizen und Warmwasser). Bei einer „vernünftigen“ Raumtemperatur von etwa 22 °C ergeben sich in Objekt 1 rund 150 kWh, die für die Haustechnik aufgewendet wird. Interessant ist vor allem auch die Feststellung dass die elektrische Leistung für Haustechnik hauptsächlich vom Nutzungsverhalten (Raumtemperatur und Warmwasser) und nicht so sehr von der Aussenlufttemperatur abhängig ist.

Insgesamt wurde folgender Elektrizitätsverbrauch in Heizstäben und Zusatzheizungen aufgewendet:

Tabelle 5.2 Elektrizitätsverbrauch durch Heizstäbe und Zusatzheizungen in den verschiedenen Wohnungen von Objekt 1 während der gesamten Messperiode (1. Oktober 2007 bis 30. September 2008)

	Elektroheiz- stab	el. Zusatzheizung	Total elektrisch	Total elektrisch pro EBF	andere Zusatzhei- zung
Einheit	kWh	kWh	kWh	kWh/m2	kWh
Whg 1	347.2	0.0	347.2	3.5	0.0
Whg 2	1214.8	5.4	1220.2	9.6	0.0
Whg 3	111.2	0.0	111.2	1.3	0.0

5.2.4 Nutzungsgrad

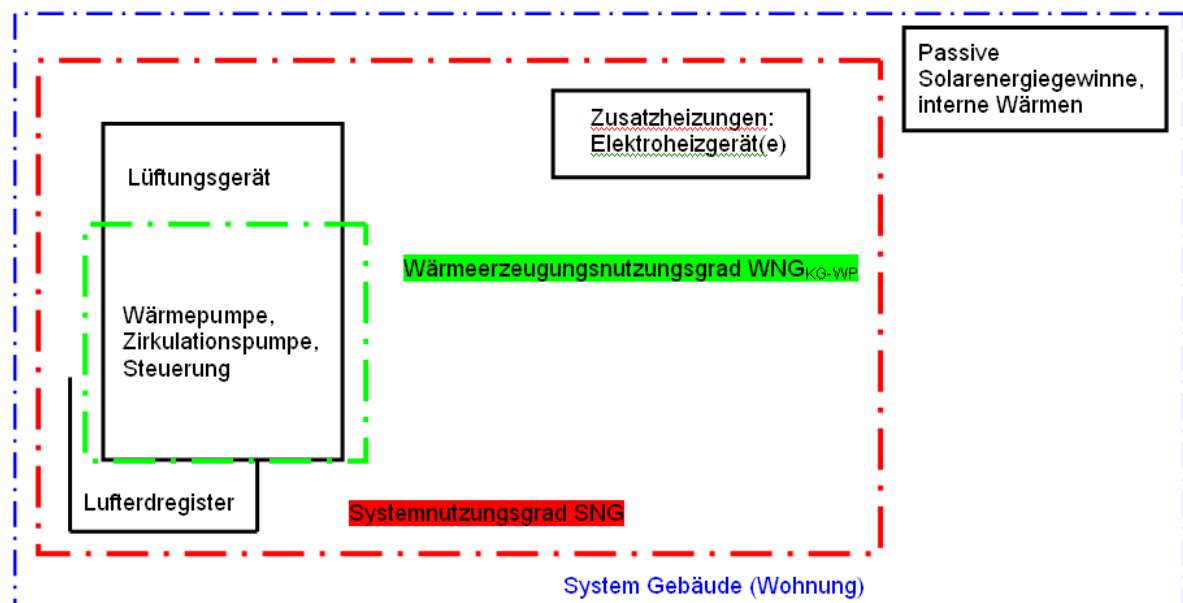


Abbildung 5.10 schematische Darstellung der Nutzungsgrade in Objekt 1

Der Wärmeerzeugungsnutzungsgrad (WNG_{KG-WP}) drückt das Warmwasser (Q_w) und die nutzbare Heizwärme ($Q_h + Q_{hr}$) im Verhältnis zum Stromverbrauch des Wärmepumpen-Kompressors und die interne Umwälzpumpe (E_{KG-WP}) aus. Dieser Nutzungsgrad umfasst also auch alle internen Verluste und ist somit sicher tiefer als die üblicherweise angegebenen COP-Werte. Die durch den Erdwärmetauscher sowie WRG gewonnene Energie und der Stromaufwand für die Lüfter wird nicht mit eingerechnet, weil eine Kennzahl analog den Angaben im MINERGIE-Nachweis gewünscht war.

Der Systemnutzungsgrad umfasst alle Heizenergien die den Wohnungen für Heizzwecke zugeführt werden dividiert durch Stromaufwand Kompaktgerät und Zusatzheizungen. Die Berechnungen lauten wie folgt: (Detaillierte Definitionen zu den Termen finden sich im Anhang).

Wärmeerzeugungsnutzungsgrad:

$$WNG_{KG-WP} = \frac{Q_w + Q_{h_WP} + Q_{hr}}{E_{KG-WP}}$$

(Nutzwärme für WW+Heizung (ohne EWT+ohne WRG)+Wärmeverluste gegen Umgebung zu aufgewendeter Energie für Solar+WP+Elektroheizung+Nebenaggregate)

Q_w	Nutzenergie Warmwasser
Q_{h_WP}	Nutzenergie Heizung, Kriterium für Heizfall: $t_{ZUL} > t_{ABL}$
Q_{hr}	Wärmeverluste Kompaktgerät gegen Umgebung (Prüfstandsgrösse, fixer Wert, nur im Winterhalbjahr eingerechnet)
E_{KG-WP}	el. Energiebezug Kompaktlüftungsgerät ohne Strom für Lüftung (ER 501)

Systemnutzungsgrad:

$$SNG = \frac{Q_w + Q_v + Q_{hr} + Q_{ZH}}{E_{KG} + E_{ZH}} \text{ oder } SNG_{\text{ohne ext. Zusatzheizung}} = SNG = \frac{Q_w + Q_v + Q_{hr}}{E_{KG}}$$

(Nutzwärme für WW+Heizung+Lüftung mit WRG (inkl. EWT)+Wärmeverluste gegen Umgebung zu aufgewendeter Energie für Solar+WP+Lüftung+Elektroheizung+Nebenaggregate+Zusatzheizung)

Q_w	Nutzenergie Warmwasser
Q_v	Nutzenergie Heizung, Lüftung mit WRG inkl. EWT
Q_{hr}	Wärmeverluste Kompaktgerät gegen Umgebung
Q_{ZH}	Nutzenergie Zusatzheizung (z.B. Elektroöfen, Holzöfen)
E_{ZH}	el. Energiebezug Zusatzheizung
E_{KG}	el. Energiebezug Kompaktlüftungsgerät (ER 601)

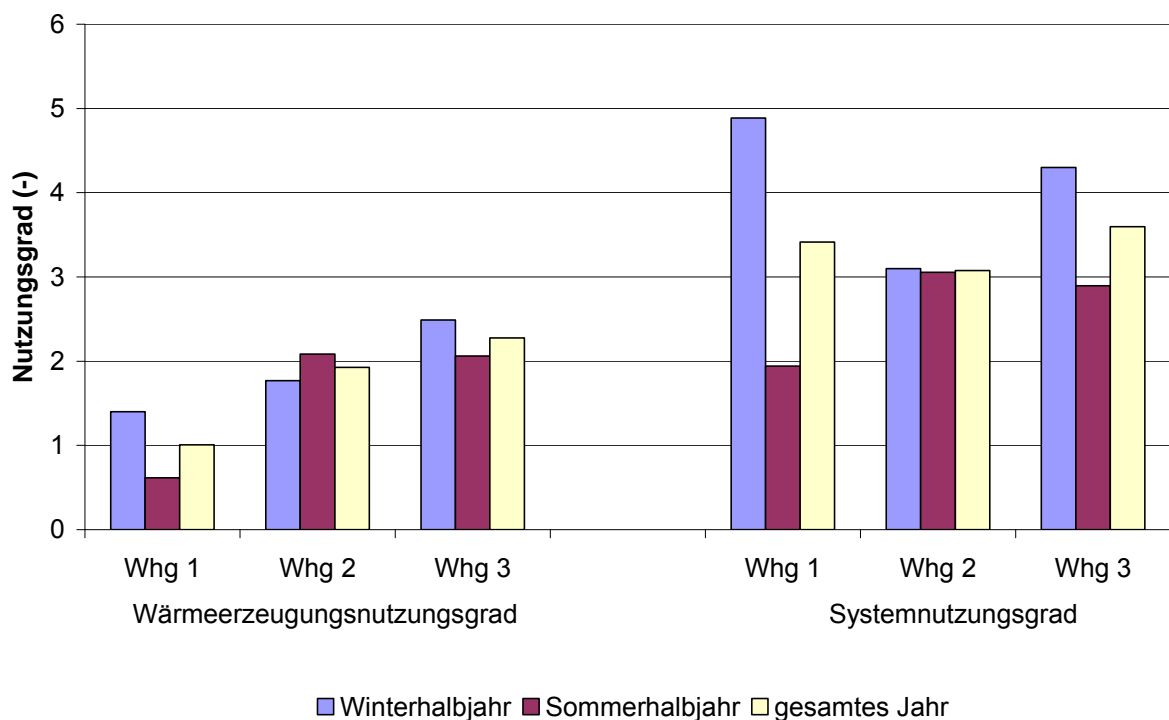


Abbildung 5.11 Wärmeerzeugungsnutzungsgrade und Systemnutzungsgrade (aber ohne externe Zusatzheizungen) der verschiedenen Wohnungen von Objekt 1. (Winterhalbjahr: 1. Oktober 2007 bis 31. März 2008; Sommerhalbjahr: 1. April 2008 bis 30. September 2008)

In Abbildung 5.11 fällt auf, dass der Systemnutzungsgrad von Wohnung 1 deutlich höher ist, als diejenigen von den Wohnungen 2 und 3, obwohl der Wärmeerzeugungsnutzungsgrad sehr tief ist. Begründen lässt sich dies folgendermassen: Wohnung 1 profitiert als Wohnung in einem Mittelgeschoss von der Abwärme der Nachbarwohnungen. Die Analyse der Wochendaten zeigt, dass die Nutzenergie für die Heizung der Zuluft auch während kalten Wintertagen extrem tief ist. Die Wärmepumpe wird folglich fast ausschliesslich zur Erwärmung des Warmwassers verwendet. Dies erklärt den tiefen Wärmeerzeugungsnutzungsgrad, da die Nutzungsgrade für die Warmwassererzeugung allgemein tiefer sind als für die Luftheizung.

Der hohe Systemnutzungsgrad kommt durch den hohen Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung zu Stande. Dadurch, dass die Zuluft nicht zusätzlich aufgewärmt wird, muss sehr wenig Energie aufgewendet werden. Dies wird einerseits durch die Lage der Wohnung ermöglicht, andererseits spielt aber mit Sicherheit auch hier das Nutzerverhalten eine tragende Rolle. Dies bestätigt die genauere Betrachtung von den Wohnungen 2 und 3. Nach dem Mieterwechsel (Whg 3) und der Änderung an der Geräteeinstellung (Whg 2) steigen die Nutzungsgrade deutlich an. Mehr dazu in den Kapitel 5.2.3., 5.45.3 und 5.5.

5.2.5 Energiekosten

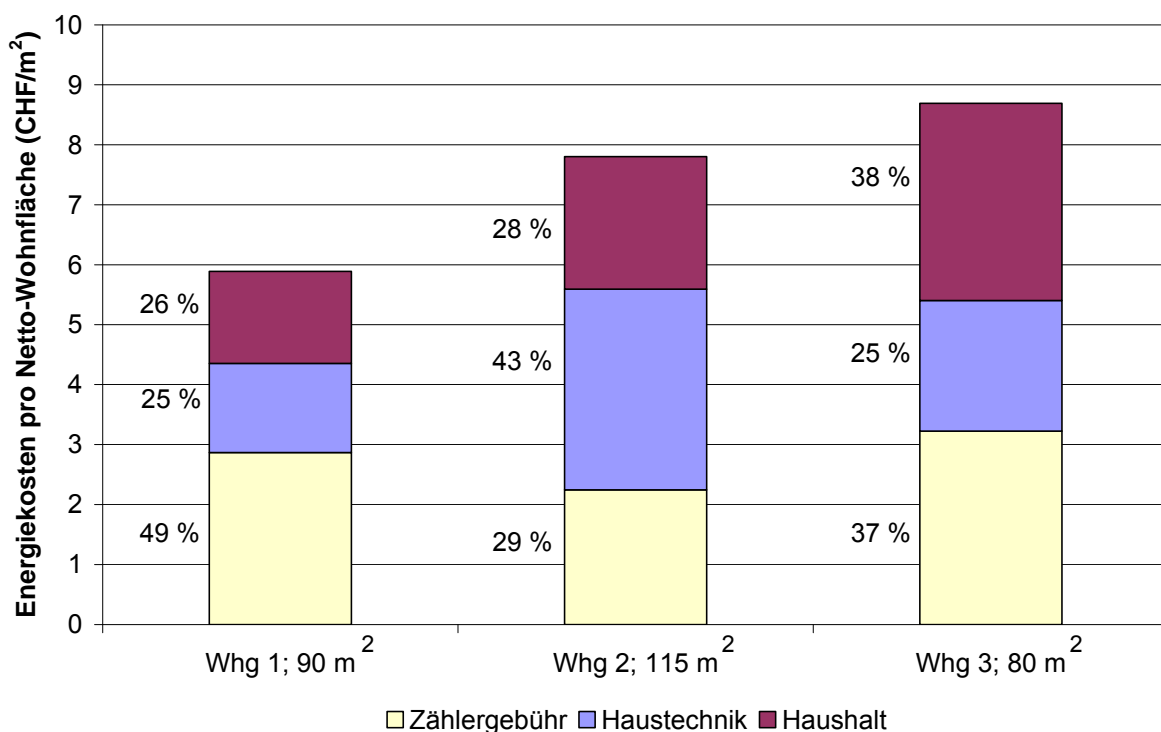


Abbildung 5.12 Spezifische Energiekosten pro m² Netto-Wohnfläche für das gesamte Jahr (1. Oktober 2007 bis 30. September 2008) in den drei Wohnungen von Objekt 1

Die totalen Energiekosten (Zählergebühr + Haustechnik + Haushalt) sind höher als erwartet und betragen in den Wohnungen 1-3 auf 530 CHF, 897 CHF und 695 CHF.

Interessanterweise ist der Stromverbrauch im Winter nur wenig höher als im Sommer. Die Winterhalbjahresanteile betragen:

54 % (Whg1), 61 % (Whg2) und 52 % (Whg3) der gesamten Energiekosten.

Eine Ursache dafür ist der hohe Anteil der Zählergebühren.

Hinweise zur Energiekostenberechnung:

Die Berechnung basiert auf Zählerablesungen, die quartalsmässig erfolgten. Daraus konnte der totale Stromverbrauch für das Winterhalbjahr eruiert werden. Anschliessend wurden die Strombezüge mit den für Objekt 1 geltenden Tarifen (inkl. Mwst.) von Energie Winterthur multipliziert (Tarif: Frühling 08).

Hochtarif: 13.91 Rp/kWh

Niedertarif: 6.98 Rp/kWh

Zählergebühr: 21.52 CHF/Mt

Mit Kosten von CHF 1.50.- bis 3.40.- pro Quadratmeter Wohnfläche für Haustechnik (Heizen, Warmwasser, Lüften) sind die Betriebskosten tief. Hinzukommen jedoch noch CHF 330.- für periodische Revisionen, Entkalkungen und Verwaltungskosten pro Wohnung und Jahr.

Es folgen nun detailliertere Auswertungen zu jeder Wohnung. Es wird insbesondere auf die Parameter Komfort und Behaglichkeit sowie Energieverbrauch eingegangen.

5.3. OBJEKT 1, WOHNUNG 1

5.3.1 Komfort und Behaglichkeit (1/1)

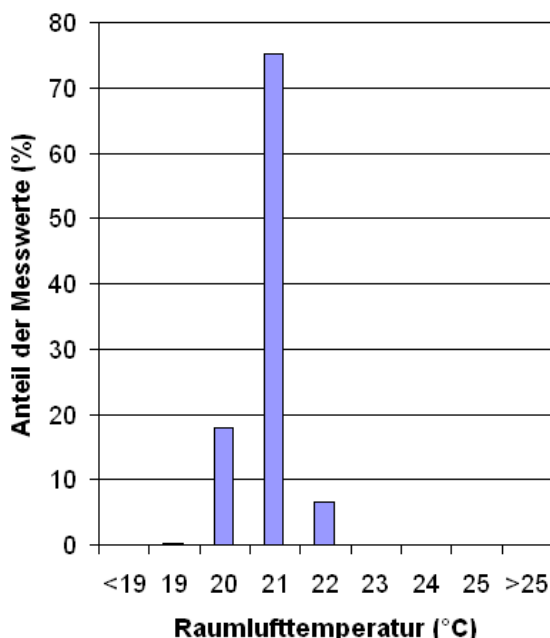


Abbildung 5.13 Häufigkeitsverteilung der Raumlufttemperatur während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 1/Wohnung 1

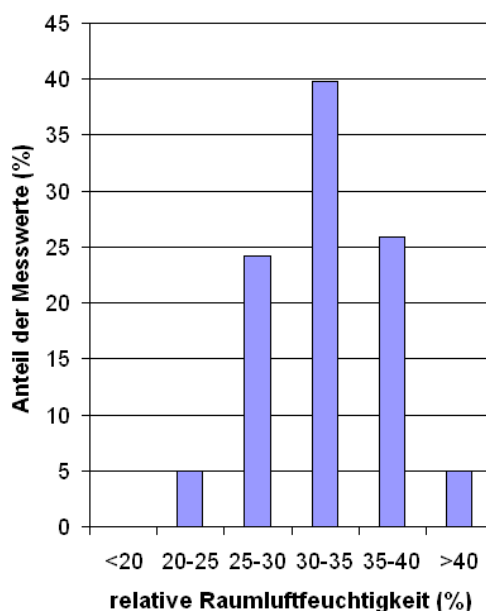


Abbildung 5.14 Häufigkeitsverteilung der relativen Raumluftfeuchtigkeit während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 1/Wohnung 1

Es fällt auf, dass während des gesamten Winterhalbjahres, selbst bei Aussenlufttemperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt, die Raumlufttemperatur nur vereinzelt unter 20 °C gesunken ist. Die wenigen Raumlufttemperatureinbrüche sind auf Fensteröffnungen zurückzuführen. Im Anhang sind weitere Darstellungen aufgeführt, die zeigen, dass die Raumlufttemperatur über das ganze Jahr in einem sehr angenehmen Bereich liegt. Im Sommer lagen wenige Messwerte über 26 °C, kein einziges Mal wurde 27° erreicht.

Nebst der Raumlufttemperatur ist auch die relative Raumluftfeuchtigkeit von grosser Bedeutung für den Wohnkomfort. Die Auswertung zeigt, dass die relative Raumluftfeuchtigkeit tendenziell eher etwas zu tief ist. Details dazu im Anhang.

5.3.2 Energieverbrauch (1/1)

Tabelle 5.3 Vergleich der Energiekennzahlen zwischen den Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerten sowie weitere technische Informationen von Objekt 1/1

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	8.2	2.6	10.0
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	27.8	26.9	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.6	0.41 h ⁻¹	0.60
Haushaltsgeräte mit Effizienzklasse A/A ⁺	-	Ja	Nicht geprüft	Ja
Raumlufttemperatur (Winter)	°C	20	22.0	-
Warmwassertemperatur	°C	60	46.8	-
Nettowohnfläche	m ²	-	90	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	99	-
Personenbelegung	Pers	-	2	-
Zuluftvolumenstrom	m ³ /(h*Pers)	-	60	30

Im Allgemeinen wird ein beachtlicher Teil des gesamten Energieverbrauchs für die Warmwasseraufbereitung verwendet. Die Auswertung der Messdaten zeigen, dass der Warmwasserverbrauch während dem gesamten Winterhalbjahr mit durchschnittlich 38.9 l/d/Pers eher gering ist (mit effektiven Warmwassertemperaturen). Weitere Angaben zur Warmwasserauswertung sind im Anhang angeführt.

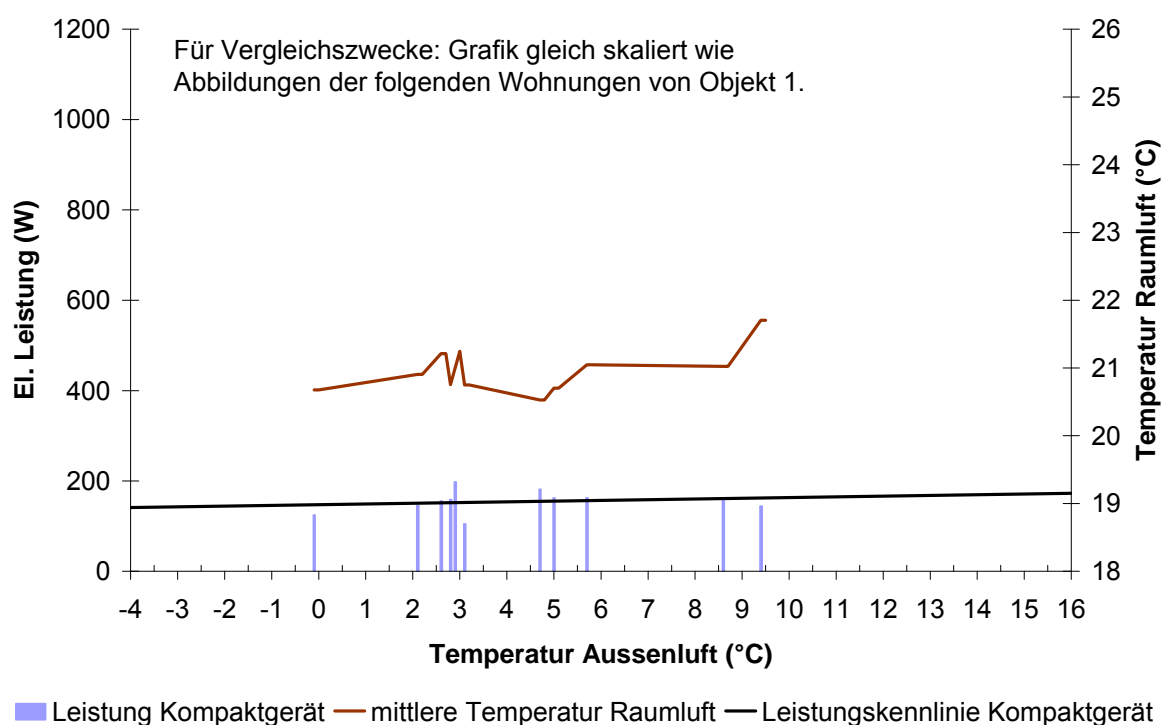


Abbildung 5.15 Leistungskennlinie des Kompaktgerätes und mittlere Raumlufttemperatur bei verschiedenen Aussenlufttemperaturen in Objekt 1/1; (Woche 3/2008 bis Woche 13/2008)

Während den untersuchten Wochen ist die Leistung des Kompaktgerätes mit ca. 180 W sehr niedrig. Es fällt auf, dass die Leistung nur geringfügig von der Aussenlufttemperatur abhängig ist (Abbildung 5.15). Dieser Umstand konnte auch in den anderen beiden Wohnungen beobachtet werden (Vergleich Kapitel 5.4.2 und 5.5.2) und wird durch die Gewinnung von passiver Sonnenheizenergie erklärt.

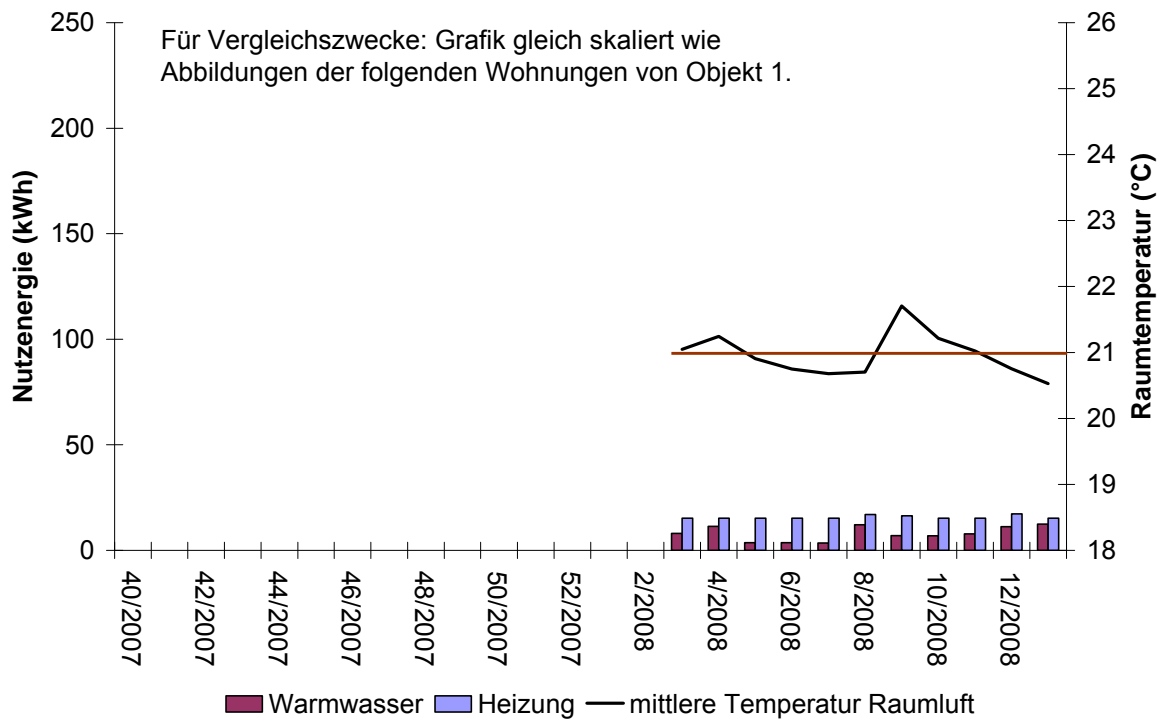


Abbildung 5.16 Nutzenergien für Warmwasser und Heizung während des gesamten Winterhalbjahres (1. Oktober 2007 bis 30. März 2008) in Objekt 1/1; braune Linie: Mittelwert der Raumtemperatur (21 °C)

Abbildung 5.16 verdeutlicht, dass fast keine Heizenergie notwendig ist, um die Raumtemperatur auf ungefähr 21 °C zu halten. Mit grosser Wahrscheinlichkeit profitiert diese Wohnung von der abgestrahlten Wärme der umliegenden Wohnungen. Auffallend ist, dass die Nutzungsgrade trotzdem sehr tief sind (vgl. Abbildung 5.11). Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass für die Gerätesteuerung und die Umwälzpumpe ein relativ hoher fixer Strombezug notwendig ist und die Nutzenenergien für Warmwasser und Heizung im Vergleich so klein sind, dass sie weniger ins Gewicht fallen.

Zusatzheizungen: Neben dem Energiebezug des Kompaktgerätes ist während dem Winterhalbjahr kein Energieverbrauch von weiteren Heizgeräten registriert worden.

Der Elektroheizstab im Gerät hat über das gesamte Jahr (1. Oktober 07 – 30 September 08) rund 350 kWh konsumiert. Dies entspricht etwa 26 % des Energieverbrauchs des Kompaktgerätes.

Weitere Energieauswertungen befinden sich in Kapitel 5.2.2

5.4. OBJEKT 1, WOHNUNG 2

5.4.1 Komfort und Behaglichkeit (1/2)

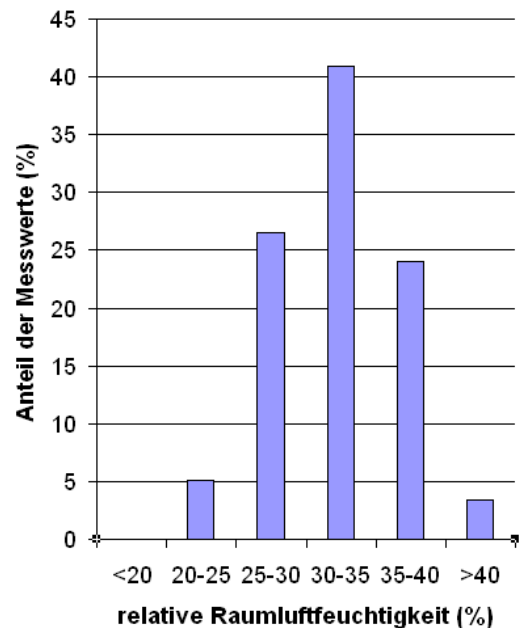
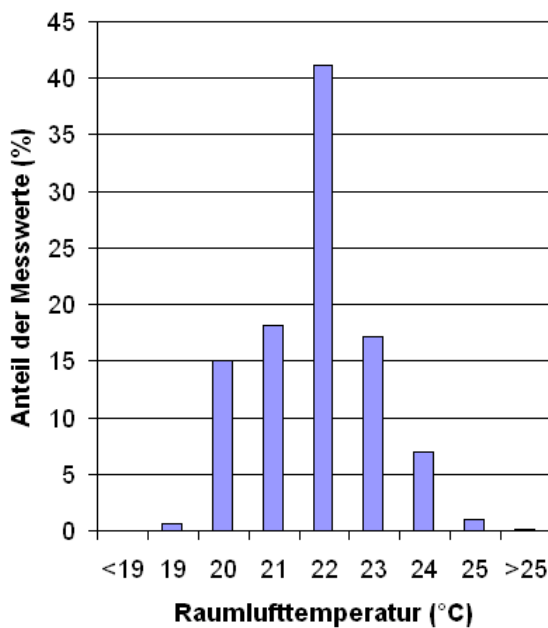


Abbildung 5.17 Häufigkeitsverteilung der Raumlufttemperatur während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 1/Wohnung 2

Abbildung 5.18 Häufigkeitsverteilung der relativen Raumluftfeuchtigkeit während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 1/Wohnung 2

In Wohnung 2 sind die Raumluft- und Ablufttemperaturschwankungen grösser als in den beiden anderen detailliert gemessenen Wohnungen von Objekt 1. Trotzdem bleibt die Raumlufttemperatur über das gesamte Winterhalbjahr in einem angenehmen Bereich. Die Bewohner haben erwähnt, täglich die Fenster zu öffnen. Dies erklärt weshalb die Raumtemperatur stärker schwankt als in den anderen Wohnungen. Über das gesamte Sommerhalbjahr sind in dieser Wohnung keine Überhitzungssituationen aufgetreten. Die Raumlufttemperatur ist nur vereinzelt über 27 °C und nie über 28 °C angestiegen.

Die Auswertung der relativen Raumluftfeuchtigkeit zeigt, dass ähnlich wie in Wohnung 1, auch hier die relative Raumluftfeuchtigkeit tendenziell eher zu tief ist. Insgesamt liegen während den kältesten Wintermonaten (November bis Februar) 31 % aller Messwerte unter 30 % relativer Feuchte. Die detaillierte Auswertung ist im Anhang zu finden.

Um die Raumluftqualität von Wohnung 2 noch besser überprüfen zu können, wurden während des Herbstes 2007 im Wohnbereich punktuelle CO₂-Messungen durchgeführt.

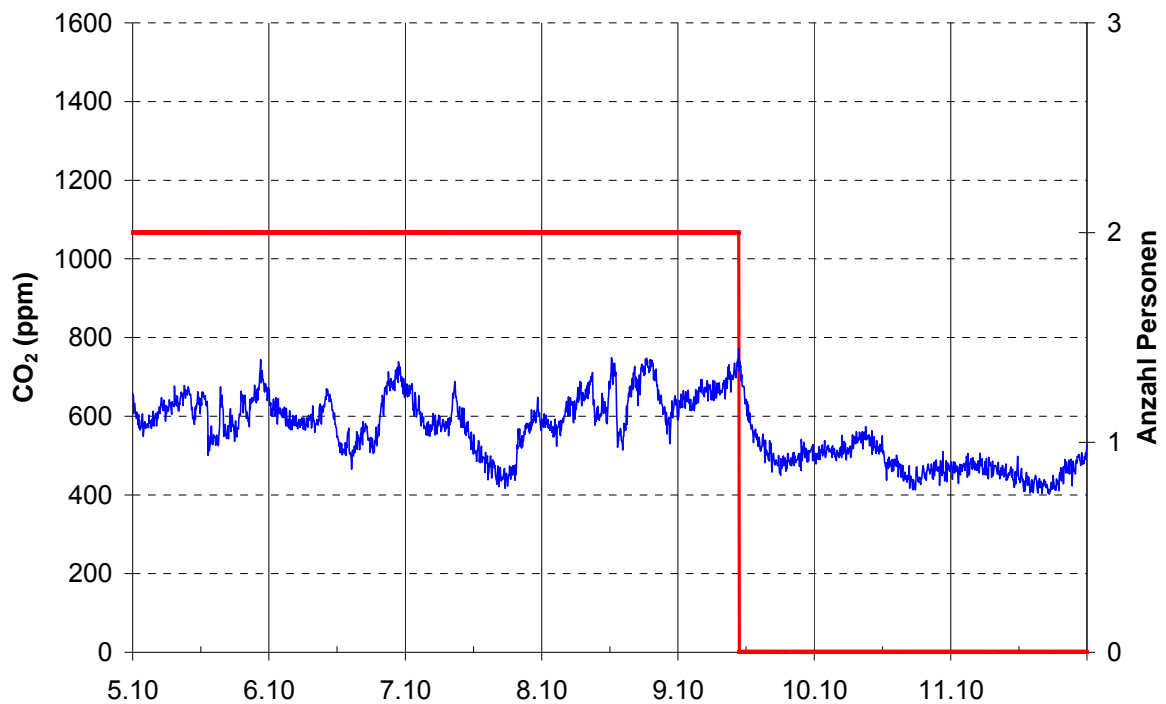


Abbildung 5.19 Die CO₂ –Messwerte während einer Oktoberwoche zeigen sehr gute Luftqualitäten (Messwerte unter 950 ppm gelten als gut = hohe Luftqualität); Objekt 1/2; Rote Linie: Anzahl anwesende Personen

Abbildung 5.19 zeigt, dass die Raumluftqualität selbst bei Anwesenheit von zwei Personen hervorragend war. Zum Vergleich: Der CO₂-Gehalt der Aussenluft beträgt ca. 380 ppm.

5.4.2 Energieverbrauch (1/2)

Tabelle 5.4 Vergleich der Energiekennzahlen zwischen den Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerten sowie weitere technische Informationen von Objekt 1/2

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	8.2	37.2	10.0
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	27.8	60.6	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.6	0.41 h ⁻¹	0.60
Haushaltsgeräte mit Effizienzklasse A/A ⁺	-	Ja	Nicht geprüft	Ja
Raumlufttemperatur (Winter)	°C	20	22.2	-
Warmwassertemperatur	°C	60	48.9	-
Nettowohnfläche	m ²	-	115	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	127	-
Personenbelegung	Pers	-	2	-
Zuluftvolumenstrom pro Person	m ³ /(h*Pers)	-	70	30

Der durchschnittliche tägliche Warmwasserverbrauch pro Kopf beträgt in dieser Wohnung 46.9 l/d/Pers (mit effektiven Warmwassertemperaturen) und ist damit etwas höher als in den beiden anderen Wohnungen von Objekt 1. Eine genauere Darstellung dazu ist im Anhang zu finden.

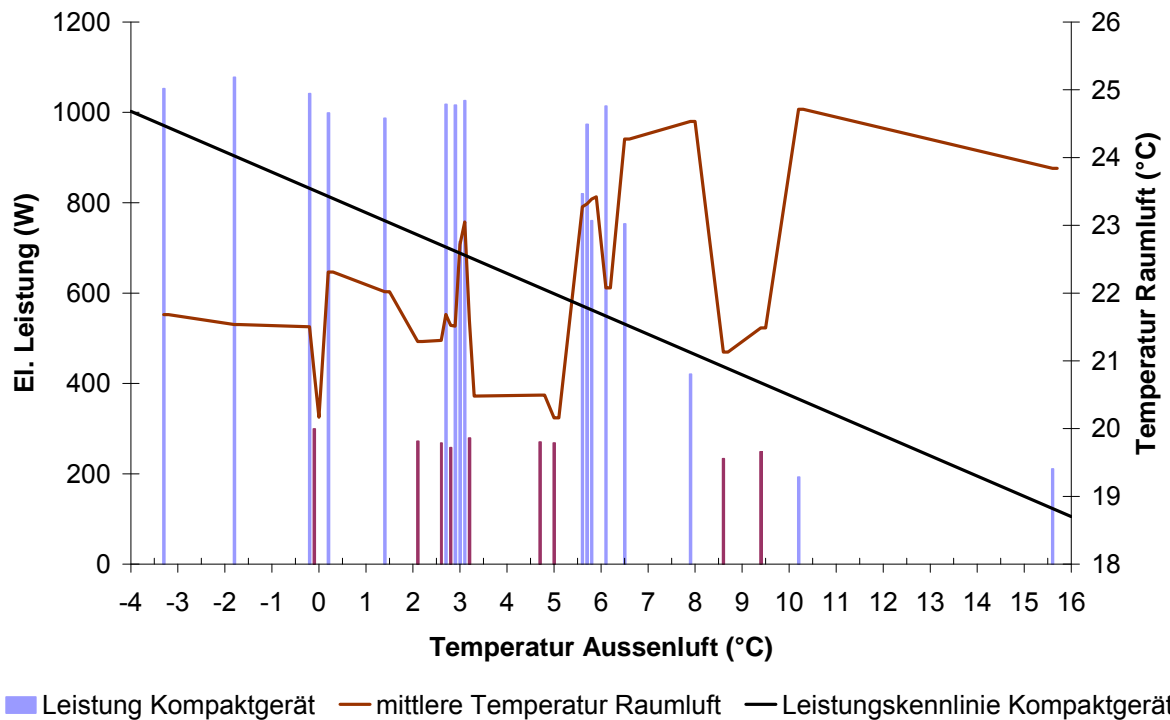


Abbildung 5.20 Leistungskennlinie des Kompaktgerätes und mittlere Raumlufttemperatur bei verschiedenen Aussenlufttemperaturen in Objekt 1/2 (Woche 40/2007 bis Woche 13/2008)
Dunkelrote Säulen: Werte ab Woche 5/2008 (nachdem die gewünschte Raumtemperatur herabgesetzt wurde)

Wie erwartet sinkt die Leistung des Kompaktgerätes mit steigenden Aussenlufttemperaturen. Interessant ist der Umstand, dass nachdem die gewünschte Raumtemperatur herabgesetzt wird (25. Januar, Woche 4/2008), die Leistung konstant auf einem erheblich tieferen Niveau bleibt und weitgehend unabhängig von der Aussenlufttemperatur ist. Diese Tatsache kann durch die passive Sonnenheizenergie erklärt werden.

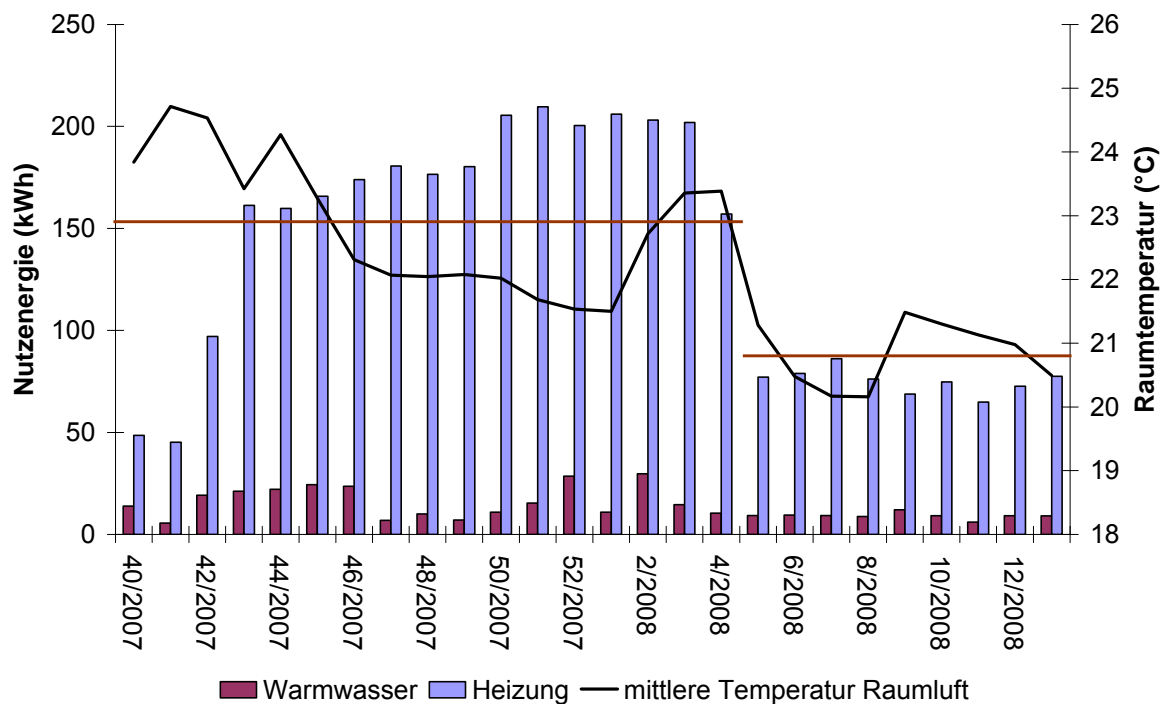


Abbildung 5.21 Nutzenergien für Warmwasser und Heizung während des gesamten Winterhalbjahres (1. Oktober 2007 bis 30. März 2008) in Objekt 1/2; braune Linien: Mittelwerte der Raumtemperaturen vor und nach der Herabsetzung der gewünschten Raumtemperatur (22.9 °C resp. 20.8 °C).

Da der mittlere tägliche Warmwasserverbrauch (mit effektiven Warmwassertemperaturen) in dieser Wohnung von Woche 40/2007 bis Woche 04/2008 69.5 l/d und von Woche 05/2008 bis Woche 13/2008 46.9 l/d beträgt wird ersichtlich, dass auf den Energiebezug und somit die Leistung des Kompaktgerätes die Raumlufttemperatur die dominante Rolle spielt. Dieser Umstand kann auch in Wohnung 3 (siehe Kapitel 5.5.2) beobachtet werden.

Bis und mit Woche 4/2008 ist die Nutzenergie der Heizung sehr hoch. Danach wurde die gewünschte Raumtemperatur herabgesetzt und die mittlere Raumtemperatur fällt auf knapp 21 °C. Zu bemerken ist, dass die Wohnung noch ca. 3 Wochen von den zuvor hohen Raumlufttemperaturen profitiert. Dies ist an exponentiell fallenden Verlauf der Raumlufttemperaturkurve zu erkennen (Woche 5-7). Dennoch kann festgehalten werden, dass eine Reduzierung der gewünschten Raumtemperatur von etwa 2 °C, einen überproportional tieferen Energiebezug der Wärmepumpe bewirkt und dadurch zu einer markanten Erhöhung der Nutzungsgrade führt.

Der Elektroheizstab im Gerät hat über das gesamte Jahr (1. Oktober 07 – 30 September 08) betrachtet rund 1215 kWh konsumiert. Dies entspricht etwa 32 % des Energieverbrauchs des Kompaktgerätes. Hervorzuheben ist, dass 94 % des Energiebezugs des Elektroheizstabs in der Zeit zwischen Woche 40/07 und Woche 4/08 angefallen ist!

Zusatzheizungen: Neben dem Energiebezug des Kompaktgerätes ist während dem Winterhalbjahr ein Energieverbrauch des externen Elektroradiators von 2 kWh registriert worden.

Weitere Energieauswertungen befinden sich in Kapitel 5.2.2

5.5. OBJEKT 1, WOHNUNG 3

5.5.1 Komfort und Behaglichkeit (1/3)

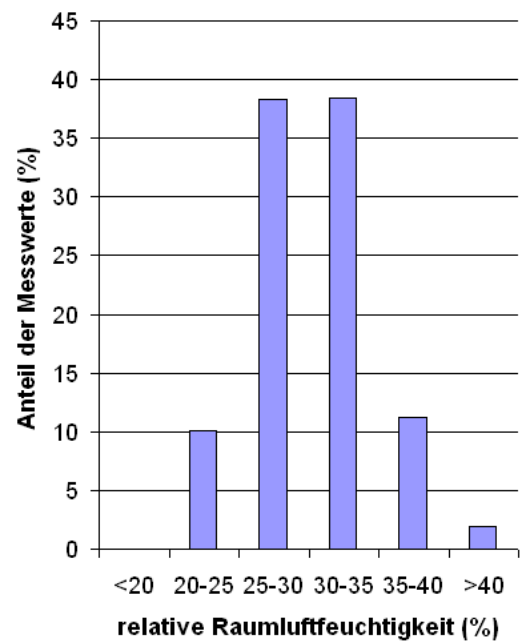
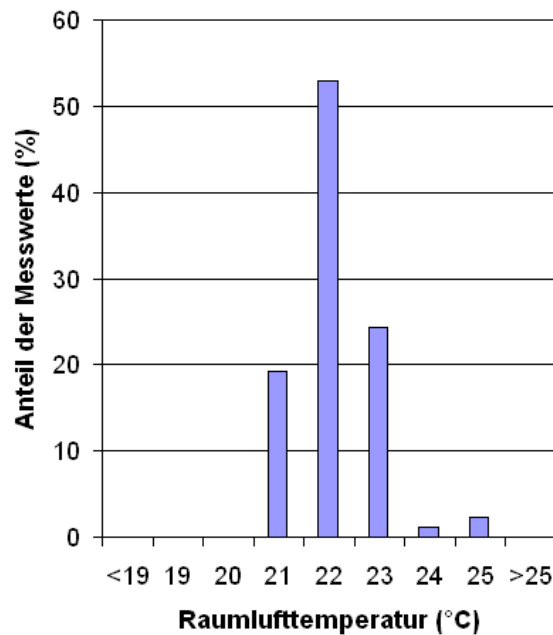


Abbildung 5.22 Häufigkeitsverteilung der Raumlufttemperatur während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 1/Wohnung 3

Abbildung 5.23 Häufigkeitsverteilung der relativen Raumluftfeuchtigkeit während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 1/Wohnung 3

Abbildung 5.22 zeigt, dass die Raumlufttemperatur eher etwas zu hoch ist. Werte unterhalb 21 °C sind keine aufgetreten. Wie in Kapitel 5.2.2 bereits erwähnt, ist die Mieterin dieser Wohnung am 1. November verstorben. Die Nachmieter, welche am 16. Dezember eingezogen sind, weisen ein markant anders Nutzungsverhalten auf. Die Werte von 25 °C sind alle während der Zeit registriert worden, als Mieterin 1 die Wohnung benutzte. Während dem gesamten Sommerhalbjahr ist der Grenzwert für Überhitzungssituationen (28.5 °C, gemäss SIA 382/1) nie überschritten worden (siehe Anhang).

Wie in den beiden anderen Wohnungen von Objekt 1 liefert die Auswertung der Messdaten bezüglich der relativen Raumluftfeuchtigkeit weniger zufriedenstellende Erkenntnisse. Insgesamt sind 48 % der Messwerte unterhalb von 30 % relativer Feuchte. Wie gross der Einfluss auf den Wohnkomfort ist, ist schwierig zu sagen, da die Menschen unterschiedlich empfindlich auf niedrige Luftfeuchtigkeit reagieren. Mehr zu diesem Thema wird in den Kapiteln 5.2.1 und im Anhang erläutert.

5.5.2 Energieverbrauch (1/3)

Tabelle 5.5 Vergleich der Energiekennzahlen zwischen den Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerten sowie weitere technische Informationen von Objekt 1/3

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	8.2	27.8	10.0
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	27.8	39.9	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.6	0.41 h ⁻¹	0.60
Haushaltsgeräte mit Effizienzklasse A/A ⁺	-	Ja	Nicht geprüft	Ja
Raumlufttemperatur (Winter)	°C	20	22.8	-
Warmwassertemperatur	°C	60	47.2	-
Nettowohnfläche	m ²	-	80	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	87	-
Personenbelegung	Pers	-	2	-
Zuluftvolumenstrom pro Person	m ³ /(h*Pers)	-	50	30

Ein beträchtlicher Anteil des gesamten Energiebezugs wird für die Warmwasseraufbereitung verwendet. Deshalb wurde auch in dieser Wohnung der Warmwasserbezug gemessen.

Der durchschnittliche tägliche Warmwasserbezug liegt in Wohnung 3 bei 37.9 l/d/Pers. Hier ist zu beachten, dass der Pro-Kopf-Verbrauch der Nachmieter erheblich grösser ist, als der der Vormieterin (Siehe auch Abbildung 5.25 und Anhang).

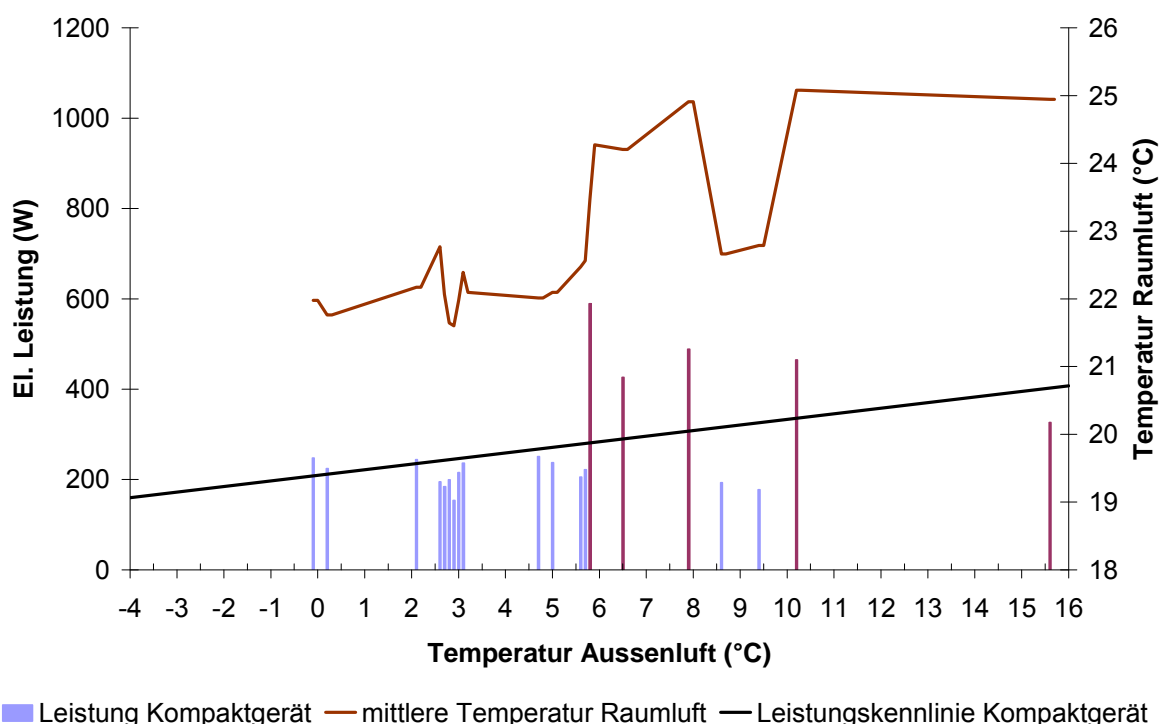


Abbildung 5.24 Leistungskennlinie des Kompaktgerätes und mittlere Raumlufttemperatur bei verschiedenen Aussenlufttemperaturen in Objekt 1/3 (Woche 40/2007 bis Woche 13/2008)
Dunkelrote Säulen: Leistung des Kompaktgerätes während den Wochen 40/07 bis 44/07 (Wohnung wird von Mieterin 1 genutzt).

Abbildung 5.24 verdeutlicht, dass die elektrische Leistung hauptsächlich vom Nutzungsverhalten und nicht von der Aussenlufttemperatur abhängig ist. Während die untersuchte Wohnung von Mieterin 1 bewohnt wurde, wurde eine massiv höhere elektrische Leistung des Kompaktgerätes registriert (Dun-

kelrote Säulen). Dies ist auf die am Gerät eingestellte gewünschte Raumtemperatur zurückzuführen. Denn Mieterin 1 weist einerseits einen deutlich tieferen täglichen Warmwasserverbrauch (25 l/d gegenüber 78.4 l/d), andererseits aber konstant höhere Raumlufttemperaturen auf als die Nachmieter. So lässt sich auch die steigende Trendlinie erklären.

Abbildung 5.25 liefert dieselbe Erkenntnis wie Abbildung 5.21. Eine Herabsetzung der gewünschten Raumtemperatur um wenige Grad Celsius bewirkt eine überproportionale Verminderung des Energiebezugs der Wärmepumpe und entsprechend steigen die Nutzungsgrade. Wie bereits erwähnt weisen die Nachmieter ein anderes Nutzungsverhalten auf. Insbesondere halten sie die Raumlufttemperatur auf einem niedrigeren Niveau und beziehen mehr Warmwasser als die Vormieterin. Die erste Tatsache bewirkt, dass der Energiebezug des Kompaktgerätes stark verringert wird und dadurch die Nutzungsgrade grösser werden.

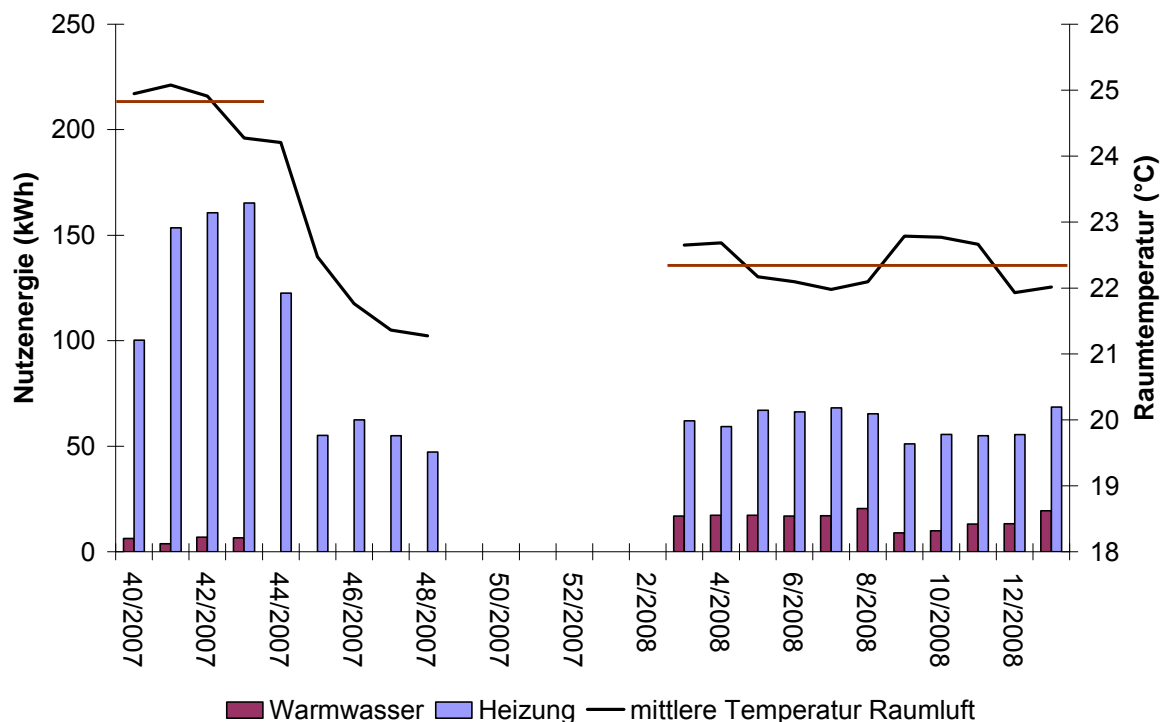


Abbildung 5.25 Nutzenergien für Warmwasser und Heizung während des gesamten Winterhalbjahres (1. Oktober 2007 bis 30. März 2008) in Objekt 1/3; braune Linien: Mittelwert der Raumtemperatur während der ersten (24.8 °C) und zweiten Nutzungsphase (22.3 °C); (Wohnung wird von Mieterin 1 während den Wochen 40/07 bis 44/07 genutzt)

Der **Elektroheizstab** im Gerät hat über das gesamte Jahr (1. Oktober 07 – 30. September 08) rund 110 kWh konsumiert. Dies entspricht etwa 6 % des Energieverbrauchs des Kompaktgerätes. Der grösste Teil des Bezugs des Elektroheizstabs stammt aus der ersten Mietperiode. Während der zweiten Mietperiode (ab Woche 51/07) wurden sowohl der Energiebezug des Kompaktgerätes als auch der Energiebezug des Elektroheizstabs namhaft kleiner. In diesen 41 Wochen beträgt der Energiebezug des Elektroheizstabs nur noch gut 30 kWh, die knapp 3 % des Energiebezugs des Kompaktgerätes entsprechen.

Neben dem Energiebezug des Kompaktgerätes sind während dem Winterhalbjahr keine Energieverbräuche von zusätzlichen Heizgeräten registriert worden.

Weitere Energieauswertungen befinden sich in Kapitel 5.2.2.

5.6. OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN

Während Woche 28/08 weilten die Bewohner von Wohnung 3 in den Sommerferien. Warmwasser wurde keines bezogen, dessen Temperatur jedoch durch die automatische Regelung auf konstantem Niveau gehalten. Dadurch lief die Wärmepumpe in Intervallen von 6-8 Stunden jeweils für ca. 45 Minuten. Über die gesamte Woche führte dies zu einem Stromverbrauch des Kompaktgerätes von 11.8 kWh. Dies entspricht einer mittleren Leistung von 70.2 W während der gesamten Woche. Der Stillstand oder Standby-Verlust ist unnötig hoch. Die Wasserbehälter sollten vor allem besser wärmegeklämt und die Anschlüsse bezüglich Abkühlung optimiert werden. Heute gibt es neues Wärme-dämmmaterial auf Aerogel-Basis ($\lambda = 0.014 \text{ W/m}^2/\text{K}$), welches rund doppelt so gut isoliert wie PU-Schaum.

6. Objekt 2: MFH Seestrasse 20, Uster

6.1. GEBÄUDE-SITUATIONS-BESCHREIB



Abbildung 6.1 Blick auf die Nordfassade.

Das Gebäude ist für Stockwerkeigentum konzipiert und verfügt über gemeinschaftliche Einrichtungen. Die einzelnen Geschosse sind „mehr-Generationen-tauglich“, das heisst, die total 170 Quadratmeter eines Geschosses können einfach in zwei Wohnungen aufgeteilt werden oder als Grosswohnung mit bis zu 7 Zimmern genutzt werden. Aktuell bewohnen 3 Eigentümer und 3 Mieter die 6 Wohnungen. Zudem ist das Haus behindertengerecht gestaltet. Eine weitere Besonderheit dieses Mehrfamilienhauses sind die relativ schlanken und platzsparenden Wände, welche mit 37 cm Stärke bereits den Minergie-P-Standard erreichen.

6.1.1 Energiekonzept

Der Planungswert des Heizwärmebedarfs (nach SIA 380/1) beträgt 39 MJ/m^2 . Dies entspricht 19 % des SIA-Grenzwertes (205) oder 7% des früheren Altbaus (600). Das heisst, dass dank dem Neubau die Energieeffizienz 15 Mal besser ist. Umgerechnet in Erdöleinheiten wäre dies ein 1-Liter-Haus (1 l Öl pro Quadratmeter und Jahr für die Raumheizung). Der Energieverbrauch nach MINERGIE-P berechnet (inkl. Warmwasser und Elektrizität doppelt gewichtet) beträgt 28.6 kWh/m^2 .

Die Energiebezugsfläche EBF beträgt 841 m^2 und das Oberflächen-Volumenverhältnis A/EBF beträgt 1.39.

6.1.2 Gebäudehülle

Die hochwärmegedämmte Gebäudehülle hat folgende Kennzahlen (U-Werte in $\text{W/m}^2\text{K}$):

Aussenwände $0.11 - 0.14$

Flachdachbereich 0.14

Steildachbereich 0.11

Fenster U_w $0.58 - 0.76$ (Glas U-Wert = 0.5; g = 51%)

Boden gegen unbeheizt 0.11

Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)- EG: 0.23 h^{-1} ; 1.OG: 0.45 h^{-1} ; 2.OG: 0.40 h^{-1} ; DG: 0.57 h^{-1}

6.1.3 Haustechnik

Der ganze Wohnteil und Gewerbeteil wird mit vier Haustechnik-Kompaktanlagen geschossweise belüftet, beheizt und das Warmwasser erzeugt. Ein Lufterdregister, Abluftwärmepumpen und Sonnenkollektoren dienen als Wärmequellen. Das Untergeschoss (unbeheizt) wird dank einer einfachen Abwasserwärmerückgewinnung temperiert.

Auf ein wasserbasiertes Wärmeverteilsystem wurde ganz verzichtet. Die Wärmeverteilung erfolgt über die Komfortlüftung. Über das gleiche System kann im Sommer leicht gekühlt werden. Die Zuluft wird in flexiblen Luftleitungen in den Decken verteilt.

Als Zusatzheizungen, für besondere Behaglichkeit und individuelle Wünsche dient im Dachgeschoss ein Holzofen und in den übrigen Geschossen ein neuartiger Alkoholofofen sowie elektrische Handtuchradiatoren.

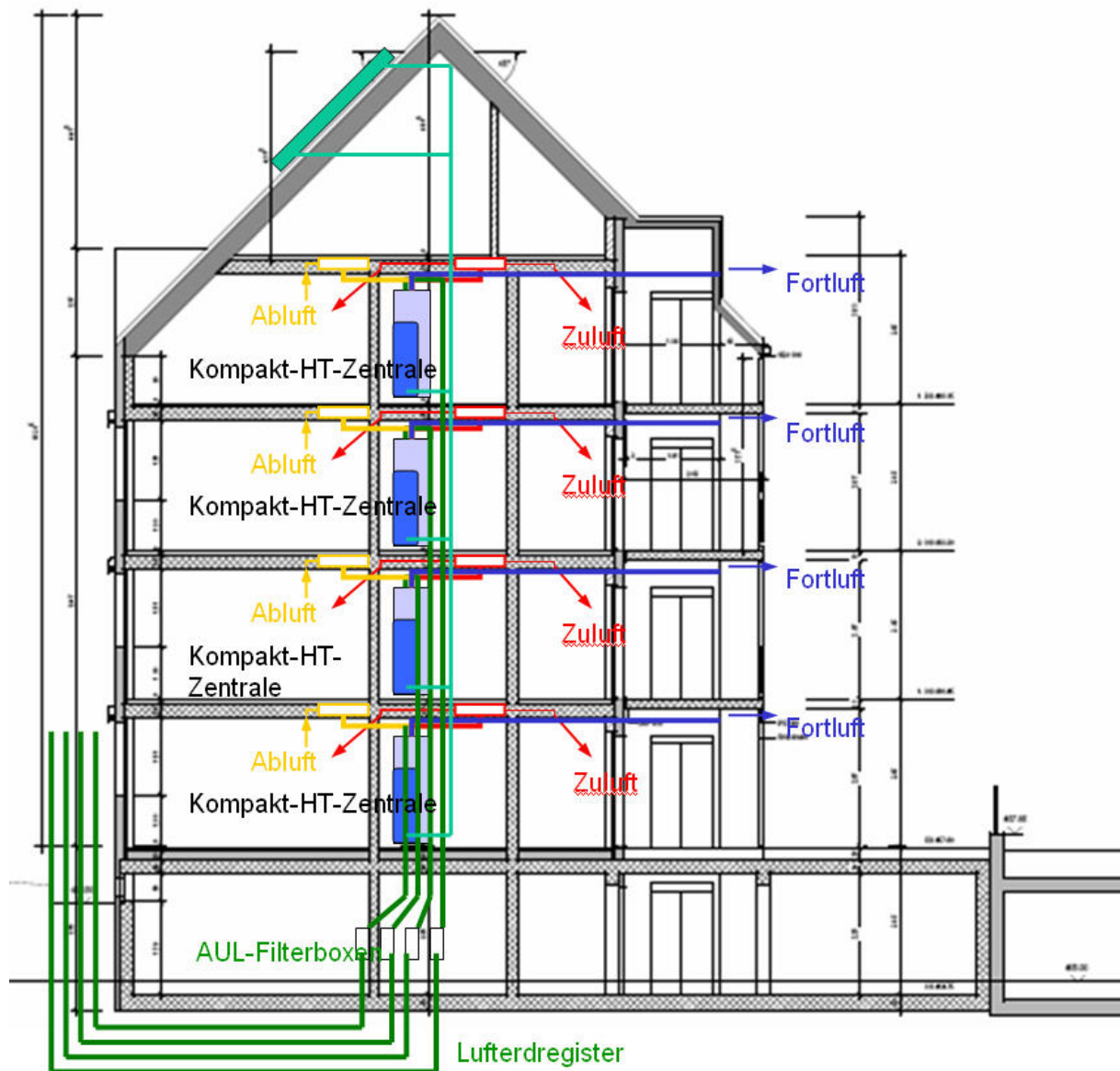
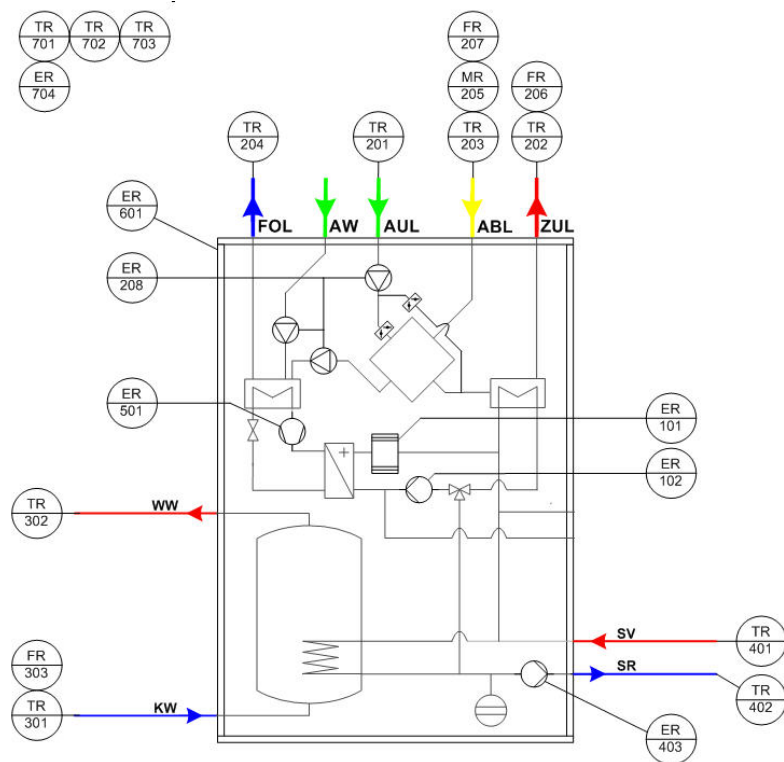


Abbildung 6.2 schematische Darstellung der Lüftungs- und Heizungskomponenten in Objekt 2



Pos.	Komponente
1xx	Wasserheizung
2xx	Lüftung
3xx	Warmwasser
4xx	Solar
5xx	Wärmepumpe
6xx	Kompaktgerät
7xx	Gebäude

Legende Bezeichnung	
E	Energie
F	Durchfluss
M	Feuchte
T	Temperatur
U	Wärmeenergie
R	Registrierung (Zweitbuchstabe)

Abbildung 6.3 Messschema des Kompaktgerätes (Viessmann/Vitotres 343)

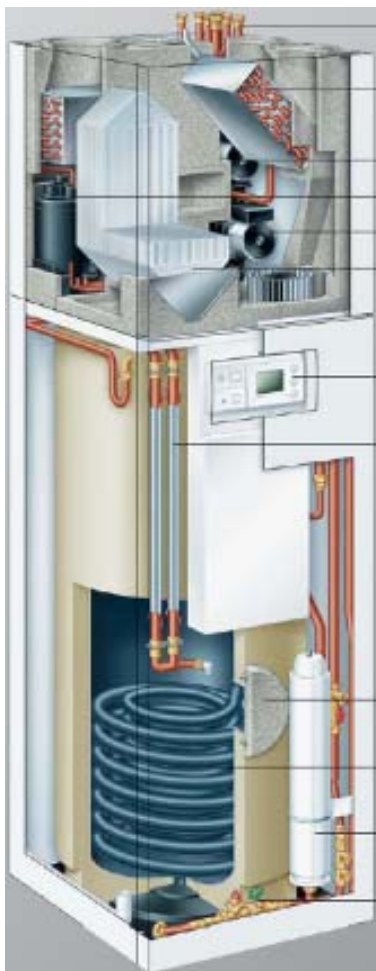


Abbildung 6.4 Kompaktgerät Viessmann/Vitotres 343

6.1.4 Kosten

Für dieses Objekt sind einige Kostenangaben gemacht worden. Die Mehrkosten für die energetischen Massnahmen sind im Verhältnis zu den gesamten Anlagekosten marginal. Bekanntlich sind für Minergie -Neubauten mit 2-3% Mehrkosten zu rechnen. Im vorliegenden Fall interessierten vor allem die Kostenverschiebungen von Minergie zu Minergie-P. Dabei zeigte sich interessanterweise, dass die Mehrkosten in der Gebäudehülle durch die Vereinfachungen in der Haustechnik praktisch kompensiert werden.

Mehrkosten gegenüber einer Minergie-Bauweise (ganzes Gebäude; Schätzung):
(sowie in % der Gebäudegesamtkosten nach BKP 2)

	CHF	in %
Bessere Wärmedämmungen (U-Wert ca. 0.11 statt 0.18) sowie weniger Wärmebrücken	46'000.-	1.9%
bessere Fenster und Türen (3-fach statt 2-fach Verglasung)	12'000.-	0.5%
Luftdruck-Test	2000.-	0.1%

Minderkosten gegenüber einer Minergie-Bauweise:

Kompakthaustechnikanlage (Abluft-WP) statt Erdsonden-Wärmepumpe mit Bodenheizung und separater Komfortlüftung

- 40'000.- 1.7%

Netto-Mehrkosten (Minergie-P zu Minergie) + 20'000.- 0.8%

Jährliche Energiekosten (Heizen, Warmwasser, Lüften; CHF/kWh = 0.15):

Haustechnik-Anlage	9400 kWh	CHF	1410.-
Direktheizung (Handtuchradiator, etc.)	3400 kWh	CHF	510.-

Oder pro Quadratmeter CHF 2.28 Energiekosten. Mit anderen Worten eine 100-Quadratmeter-Wohnung muss mit CHF 19.- *Energiekosten pro Monat* rechnen. Ein grosser Vorteil ist zudem, dass bei diesem System die verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung entfällt.

Bei diesen Zahlen sind die Zusatznutzen des besseren Werterhalts (vergünstigte Hypothek), des generell höheren Komforts und der besseren Schalldämmung monetär noch nicht berücksichtigt.

6.2. SYNTHESE OBJEKT 2

Bei den drei untersuchten Wohnungen in diesem Objekt handelt es sich um Wohnungen aus dem ersten, zweiten und dritten Obergeschoss. Wohnung 1 und 2 weisen je eine Nettowohnfläche von 173 m² auf und werden von drei resp. zwei Personen bewohnt. Wohnung 3 ist mit einer Nettowohnfläche von 197 m² die grösste analysierte Wohnung und wird von einer 6-köpfigen Familie bewohnt. Die mittleren Volumenströme betragen in Wohnung 1 135 m³/h und 130 m³/h, in Wohnung 2 140 m³/h und 125 m³/h und in Wohnung 3 145 m³/h und 130 m³/h für den Zuluft- resp. Abluftvolumenstrom. Zu erwähnen ist zudem, dass die Elektroheizstäbe für die Warmwasseraufbereitung in Wohnung 1 auf erster Stufe (2 kW) und in Wohnung 2 auf dritter Stufe (6 kW) aktiviert sind. In Wohnung 3 ist der Elektroheizstab deaktiviert.

6.2.1 Komfort und Behaglichkeit

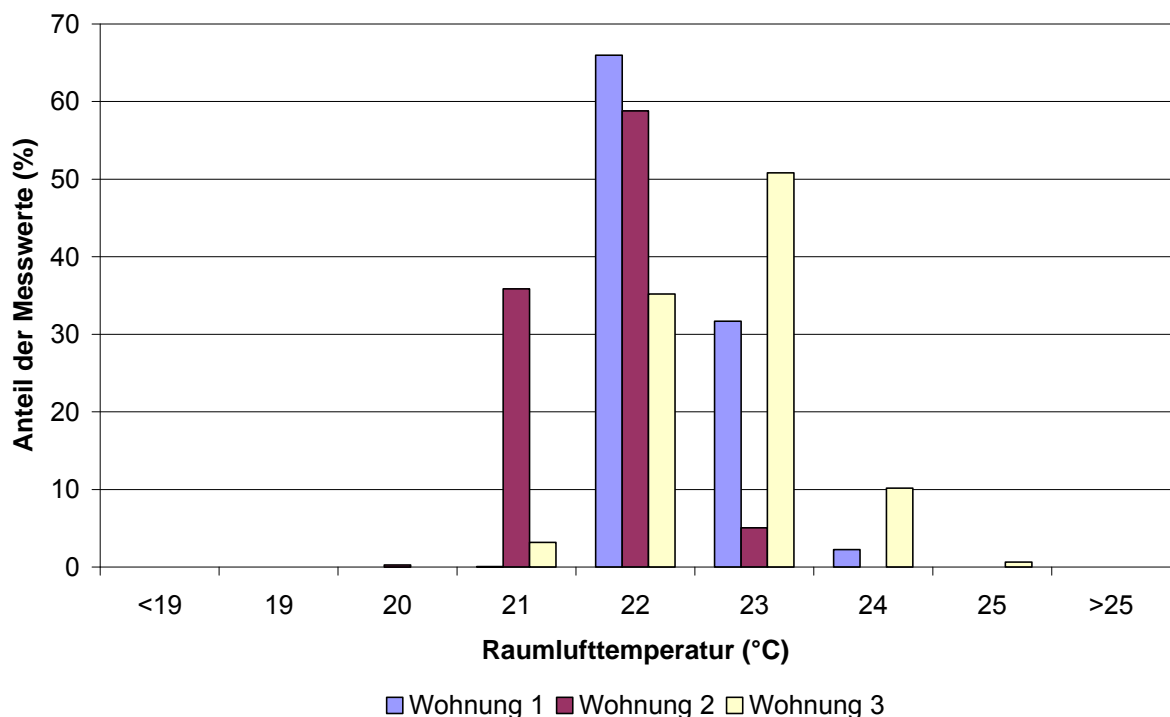


Abbildung 6.5 Häufigkeitsverteilung der Raumtemperatur in den verschiedenen Wohnungen von Objekt 2 während den vier kältesten Monaten (1. November 2007 bis 29. Februar 2008)

Ein Vergleich der 3 Wohnungen von Objekt 2 zeigt, dass über den Winter 07/08 in allen drei Wohnungen äusserst angenehme Wohnbedingungen herrschten. Wohnung 3 ist im Schnitt die wärmste und Wohnung 2 die am optimalsten genutzte Wohnung. Die Raumtemperaturen liegen im Mittel bei 22.5, 21.7 und 22.8 °C und damit klar über den Planungsgrundlagen von 20 °C.

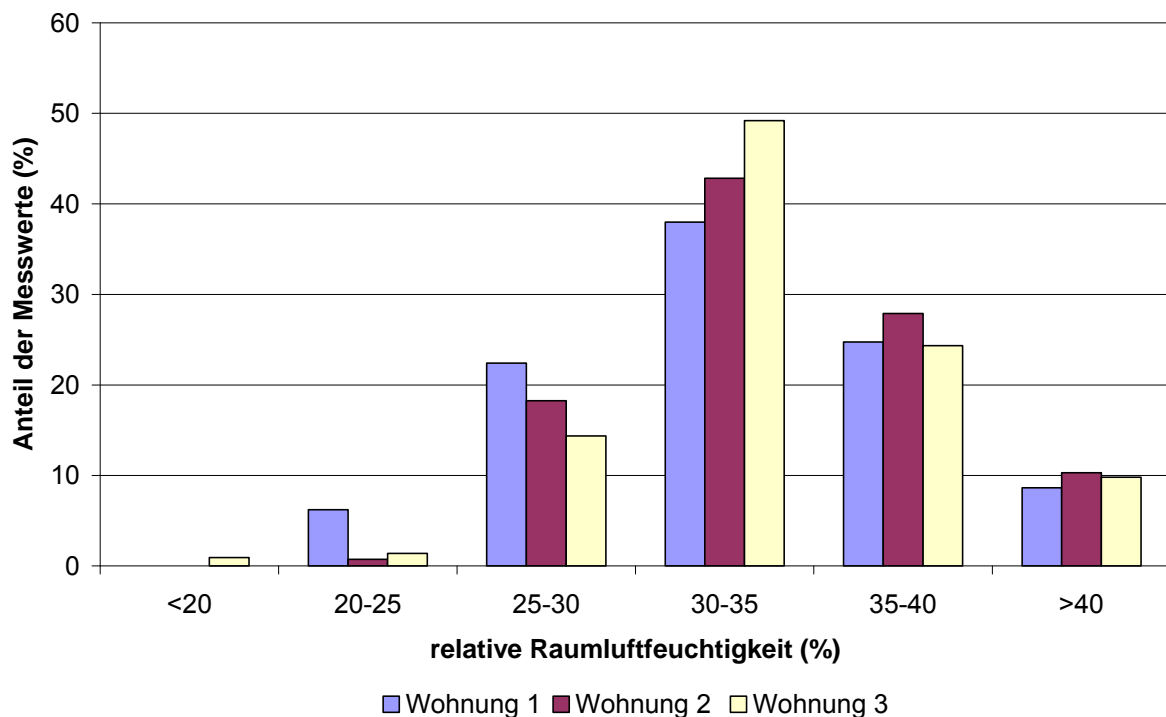


Abbildung 6.6 Häufigkeitsverteilung der relativen Raumluftheuchtigkeit in den verschiedenen Wohnungen von Objekt 2 während den vier kältesten Monaten (1. November 2007 bis 29. Februar 2008)

Abbildung 6.6 zeigt dass auch die relative Luftfeuchte über den gesamten Winter betrachtet in allen drei Wohnungen von Objekt 2 in einem angenehmen Bereich war. Verhältnismässig am schlechtesten schneidet in diesem Vergleich Wohnung 1 ab. In dieser sind knapp 29 %, in Wohnung 2 19% und in Wohnung 3 16% der Messwerte unter 30 % relative Raumluftheuchtigkeit.

6.2.2 Energieverbrauch

Tabelle 6.1 Vergleich der Energiekennzahlen zwischen den Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerten sowie weitere technische Informationen von Objekt 2 (Mittelwerte der gemessenen Wohnungen)

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	10.8	9.6	11.4
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	28.6	32.3	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.60	0.42	0.60
Haushaltsgeräte Effizienzkf. A/A ⁺	-	Ja	Ja	Ja
Raumlufttemperatur (Winter)	°C	20	22.3	-
Warmwassertemperatur	°C	60	47.9	-
Nettowohnfläche Whg 1/2/3	m ²	-	173 / 173 / 197	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	203 / 203 / 232	-
Personenbelegung	Pers	-	3 / 2 / 6	-
Zuluftvolumenstrom pro Person	m ³ /(h*Pers)	-	45 / 70 / 24	30

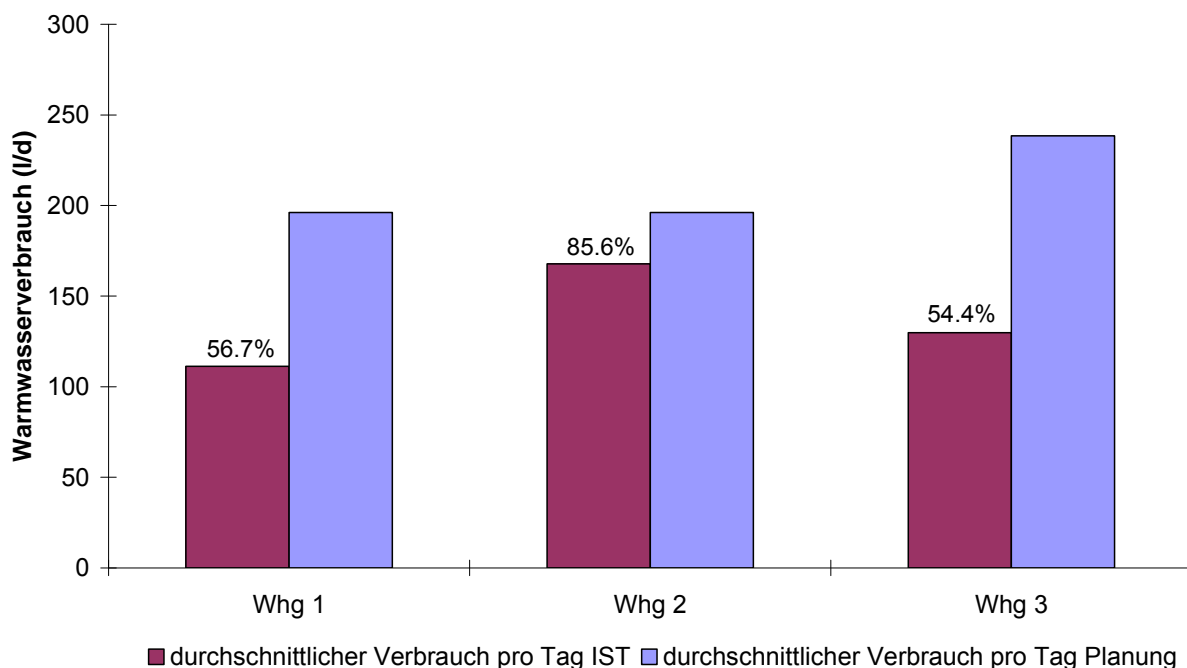


Abbildung 6.7 Durchschnittlicher täglicher Warmwasserverbrauch in den drei Wohnungen von Objekt 2 während den vier kältesten Wintermonaten (1. November 2007 bis 29. Februar 2008) im Vergleich mit dem Planungswert nach SIA 380/1

Die Planungswerte basieren auf der SIA Norm 380/1. Gemäss dieser entspricht die Warmwasserenergie (Q_{ww}) 75 MJ/m²/Jahr. Mit einem Temperaturunterschied (ΔT) von 50 K ergeben sich somit für die drei Wohnungen von Objekt 2 geplante durchschnittliche Verbräuche von 196.2 l/d (Wohnung 1 & 2) und 238.5 l/d (Wohnung 3).

Der absolute Warmwasserverbrauch ist in Wohnung 2 mit Abstand am grössten. In dieser Abbildung ist nicht berücksichtigt, dass in Wohnung 2 durchschnittlich weniger Personen wohnen als in Wohnung 1 und 3. Der Wasserverbrauch ist aber in allen drei Wohnung tiefer als bei der Planung angenommen wurde. Die gemessenen Werte sind 111.3 l/d, 167.9 l/d und 129.8 l/d für die Wohnungen 1-3.

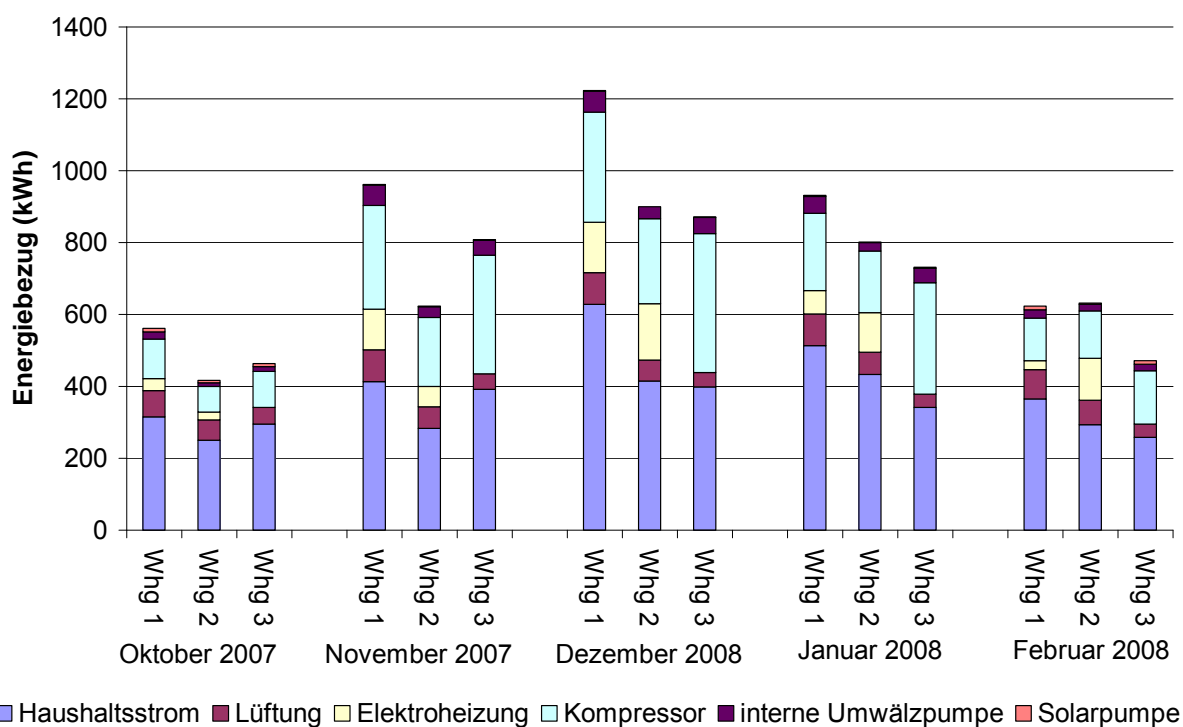


Abbildung 6.8 Energiebezüge während den Wintermonaten in den Wohnungen 1, 2 und 3 von Objekt 2

Die Energiebezüge sind zu Beginn in Wohnung 1, verglichen mit den beiden anderen Wohnungen, sehr hoch. Der Grund dafür ist eine defekte Klappensteuerung (Bypass), so dass das Lüftungswärmerregister umgangen wurde. Dies hatte zur Folge, dass kalte Aussenluft in die Wohnung strömte wenn die Wärmepumpe ausgeschaltet war.

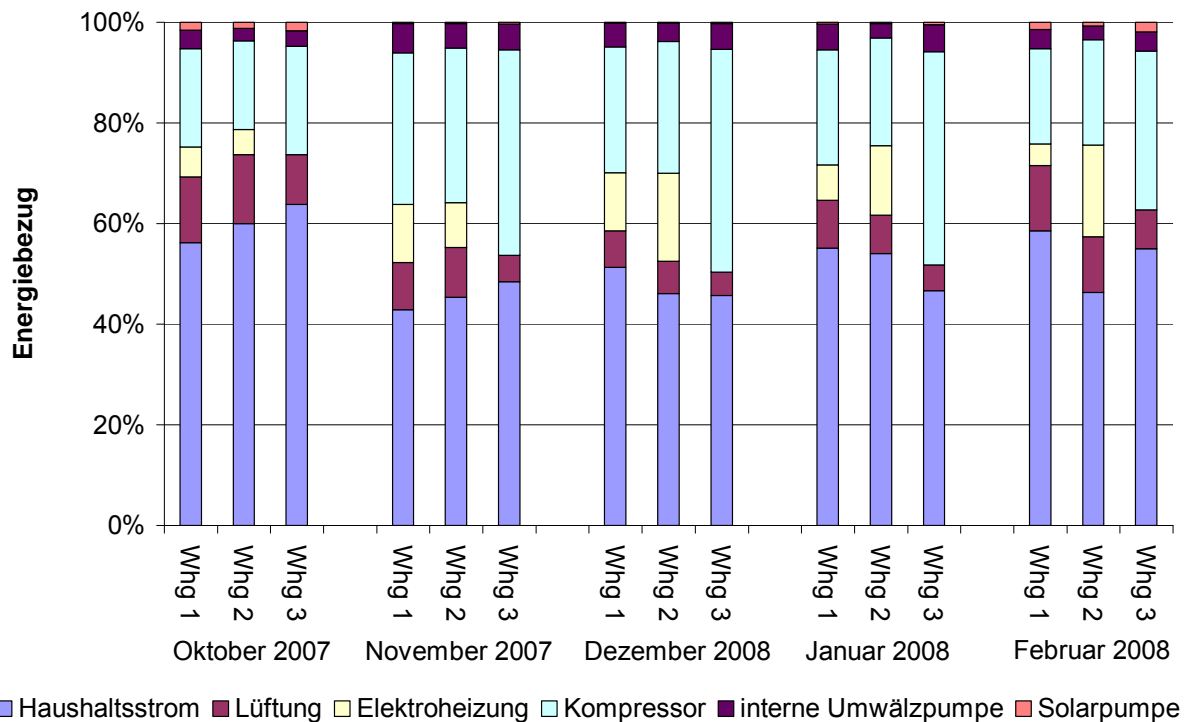


Abbildung 6.9 Energiebezüge in Prozent während des Winterhalbjahres in den Wohnungen 1, 2 und 3 von Objekt 2

In den Wohnungen 1 und 2 ist der Heizstab aktiviert, in Wohnung 3 hingegen deaktiviert. Während den kältesten Wintermonaten stellt der Heizstab einen erheblichen Beitrag des gesamten Energiebezugs dar. Ein Vergleich mit Abbildung 6.8 zeigt, dass der Anteil, den der Elektroheizstab in den Wohnungen 1 und 2 einnimmt in Wohnung 3 durch den Kompressor kompensiert wird. Dieser Umstand erklärt, weshalb der Wärmeenergieerzeugungsnutzungsgrad in Wohnung 3 deutlich besser ist, als derjenige der anderen beiden Wohnungen. Somit ist es fraglich, ob eine werksmässige Aktivierung der Heizstäbe sinnvoll ist. Dies wird zudem durch die Tatsache bestärkt, dass weder aus den Messdaten noch aus den Benutzerprotokollen Hinweise ersichtlich werden, welche auf Komforteinbussen der Bewohner von Wohnung 3 hinweisen.

Insgesamt wurde folgender Elektrizitätsverbrauch in Heizstäben und Zusatzheizungen aufgewendet:

Tabelle 6.2 Elektrizitätsverbrauch durch Heizstäbe und Zusatzheizungen in den verschiedenen Wohnungen von Objekt 2 während der gesamten Messperiode (1. Oktober 2007 bis 30. September 2008)

	Elektroheiz- stab	el. Zusatzheizung	Total elektrisch	Total elektrisch pro EBF	andere Zusatzhei- zung
Einheit	kWh	kWh	kWh	kWh/m2	kWh
Whg 1	484.0	777.0	1261.0	6.2	15.5
Whg 2	380.8	277.0	657.8	3.2	17.7
Whg 3	0.0	0.0	0.0	0	266.7

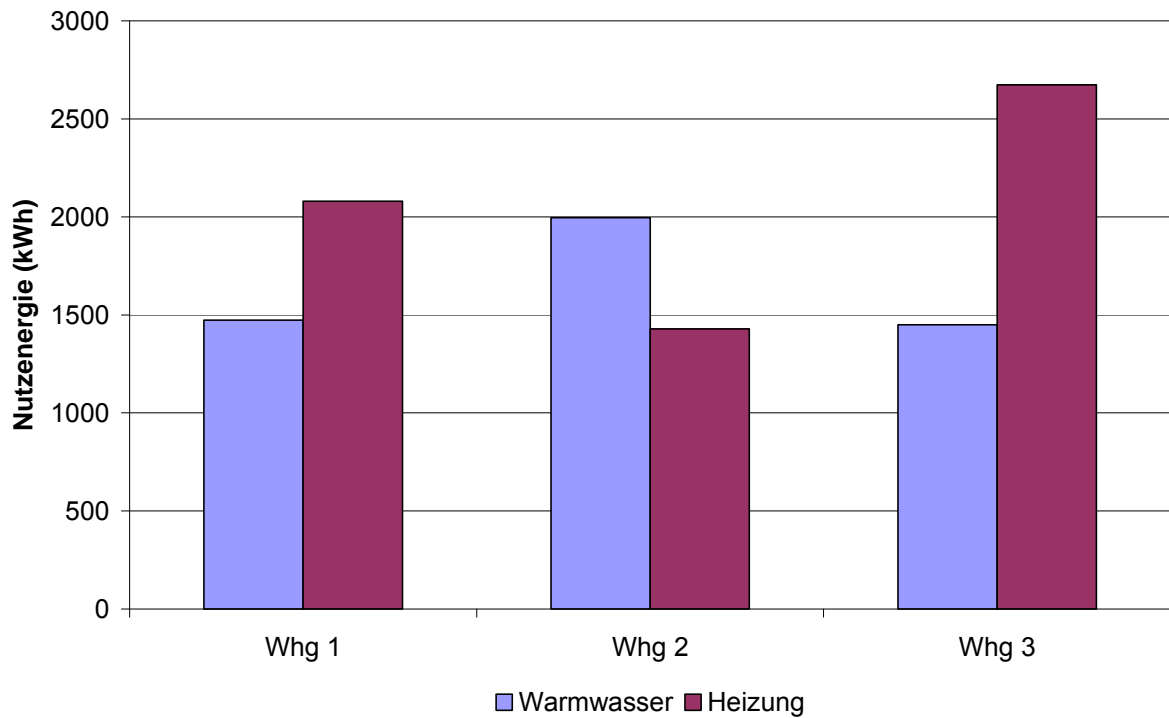


Abbildung 6.10 Totale Nutzenergien während des gesamten Winterhalbjahres (1. Oktober bis 30. März) in den verschiedenen Wohnungen von Objekt 2

Widererwarten ist die Nutzenergie des Warmwassers über das gesamte Jahr betrachtet in zwei Wohnungen kleiner als die Nutzenergie der Heizung. Dies liegt daran, dass sehr wenig Warmwasser bezogen wird. Die Nutzenergie für die Heizung ist in Wohnung 1 wegen der defekten Klappensteuerung so hoch. Wohnung 3 liegt im Dachgeschoss und braucht deshalb im Vergleich zu zwei Wohnungen aus dem Mittelgeschoss mehr Heizenergie. Die prozentualen Anteile des Warmwassers an den gesamten Nutzenergien betragen 41 %, 58 % und 35 % für die Wohnungen 1 – 3. Im Mittel 45 %.

6.2.3 Thermische Solaranlage

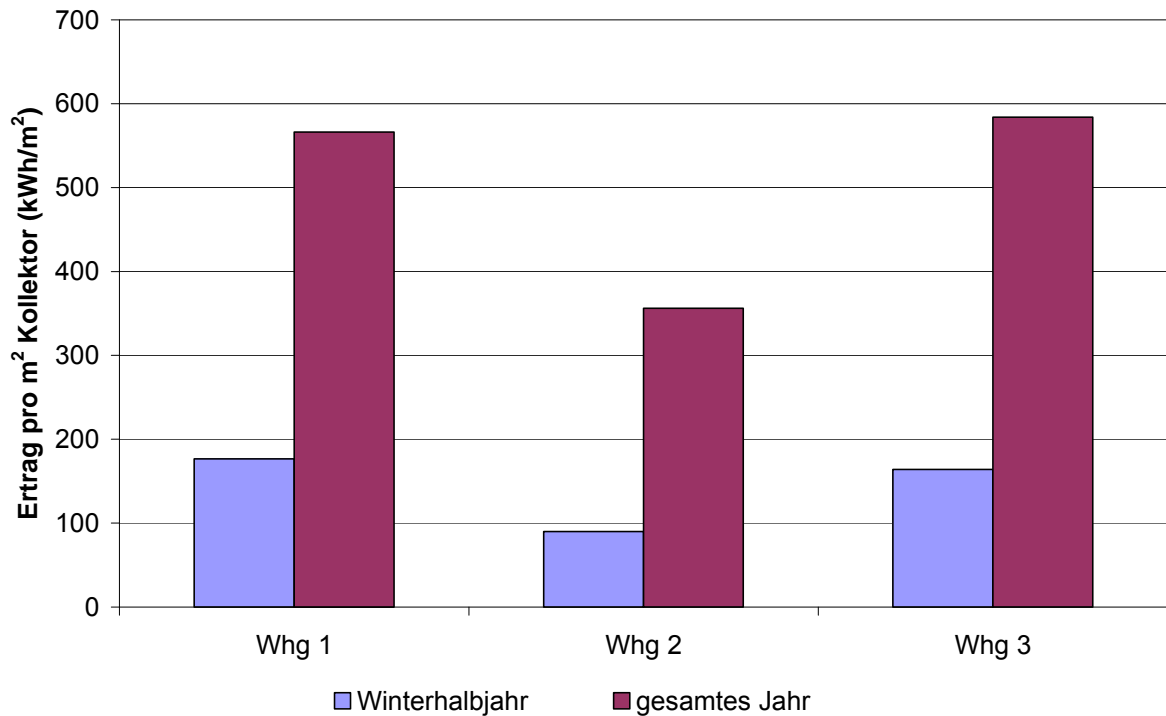


Abbildung 6.11 Wärmegewinn der thermischen Solaranlage über das gesamte Jahr in den verschiedenen Wohnungen von Objekt 2 (Winterhalbjahr: 1. Oktober 2007 bis 31. März 2008; gesamtes Jahr: 1. Oktober 2007 bis 30. September 2008)

Für das gesamte Mehrfamilienhaus (4 Speicher) steht eine Kollektorenfläche von insgesamt 8 m^2 zur Verfügung. Die totalen Solarerträge der verschiedenen Wohnungen in Objekt 2 betragen 1132 kWh/a (Whg 1), 713 kWh/a (Whg 2) und 1168 kWh/a (Whg3).

6.2.4 Nutzungsgrad

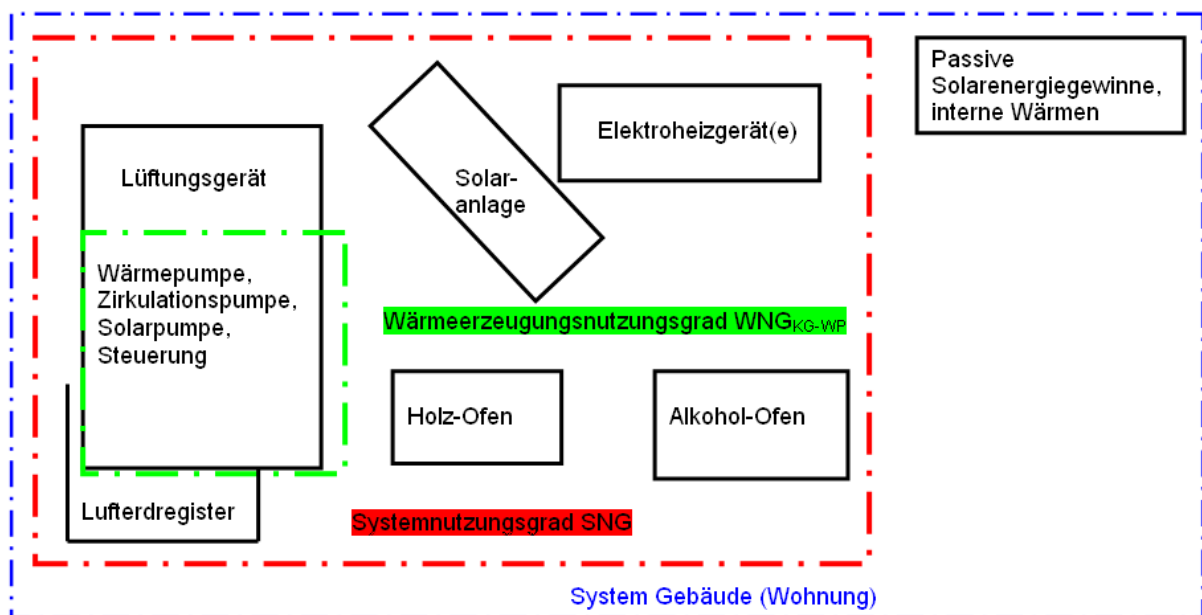


Abbildung 6.12 schematische Darstellung der Nutzungsgrade in Objekt 2

Der Wärmeerzeugungsnutzungsgrad (WNG_{KG-WP}) drückt das Warmwasser (Q_w) und die nutzbare Heizwärme ($Q_h + Q_{hr}$) im Verhältnis zum Stromverbrauch des Wärmepumpen-Kompressors und die interne Umwälzpumpe (E_{KG-WP}) aus. Dieser Nutzungsgrad umfasst also auch alle internen Verluste und ist somit sicher tiefer als die üblicherweise angegebenen COP-Werte. Die durch den Erdwärme-

tauscher sowie WRG gewonnene Energie und der Stromaufwand für die Lüfter wird nicht mit eingerechnet, weil eine Kennzahl analog den Angaben im MINERGIE-Nachweis gewünscht war.

Der Systemnutzungsgrad umfasst alle Heizenergien die den Wohnungen für Heizzwecke zugeführt werden dividiert durch Stromaufwand Kompaktgerät und Zusatzheizungen. Die Berechnungen lauten wie folgt: (Detaillierte Definitionen zu den Termen vgl. Anhang).

Wärmeerzeugungsnutzungsgrad:

$$WNG_{KG-WP} = \frac{Q_w + Q_{h_WP} + Q_{hr}}{E_{KG-WP}}$$

(Nutzwärme für WW+Heizung (ohne EWT+ohne WRG)+Wärmeverluste gegen Umgebung zu aufgewendeter Energie für Solar+WP+Elektroheizung+Nebenaggregate)

Q_w	Nutzenergie Warmwasser
Q_{h_WP}	Nutzenergie Heizung, Kriterium für Heizfall: $t_{ZUL} > t_{ABL}$
Q_{hr}	Wärmeverluste Kompaktgerät gegen Umgebung (Prüfstandsgrösse, fixer Wert, nur im Winterhalbjahr eingerechnet)
E_{KG-WP}	el. Energiebezug Kompaktlüftungsgerät ohne Strom für Lüftung (ER 501)

Systemnutzungsgrad:

$$SNG = \frac{Q_w + Q_v + Q_{hr} + Q_{ZH}}{E_{KG} + E_{ZH}} \text{ oder } SNG_{\text{ohne ext. Zusatzheizung}} = SNG = \frac{Q_w + Q_v + Q_{hr}}{E_{KG}}$$

(Nutzwärme für WW+Heizung+Lüftung mit WRG (inkl. EWT)+Wärmeverluste gegen Umgebung zu aufgewendeter Energie für Solar+WP+Lüftung+Elektroheizung+Nebenaggregate+Zusatzheizung)

Q_w	Nutzenergie Warmwasser
Q_v	Nutzenergie Heizung, Lüftung mit WRG inkl. EWT
Q_{hr}	Wärmeverluste Kompaktgerät gegen Umgebung
Q_{ZH}	Nutzenergie Zusatzheizung (z.B. Elektroöfen, Holzöfen)
E_{ZH}	el. Energiebezug Zusatzheizung
E_{KG}	el. Energiebezug Kompaktlüftungsgerät (ER 601)

In Wohnung 3 war die Lüftung im Sommer während etwa 2-3 Monaten auf reinem Abluftbetrieb und während drei Wochen ganz ausgeschaltet (Ferienabwesenheit). Dies hat den Wirkungsgrad stark verbessert.

Insgesamt erscheinen diese Nutzungsgrade doch etwas bescheiden, da ja zusätzlich eine Solaranlage vorhanden ist.

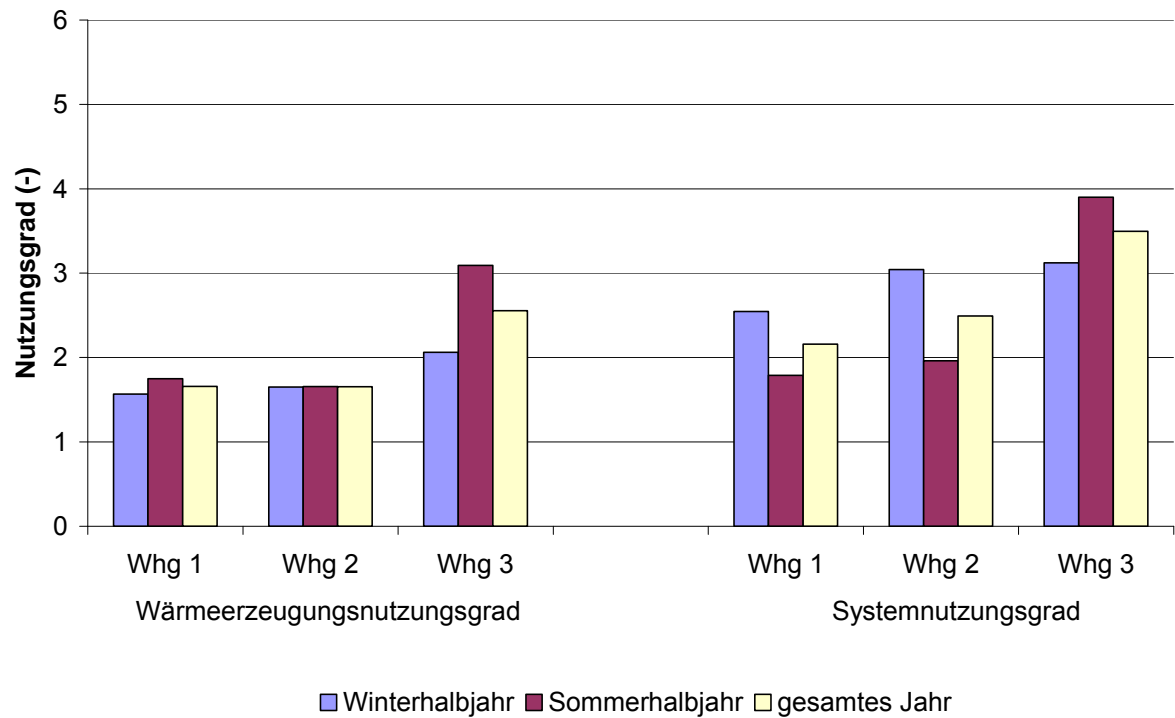


Abbildung 6.13 Wärmeerzeugungsnutzungsgrade und Systemnutzungsgrade (aber ohne externe Zusatzheizungen) der verschiedenen Wohnungen von Objekt 2. (Winterhalbjahr: 1. Oktober 2007 bis 31. März 2008; Sommerhalbjahr: 1. April 2008 bis 30. September 2008)

6.2.5 Energiekosten

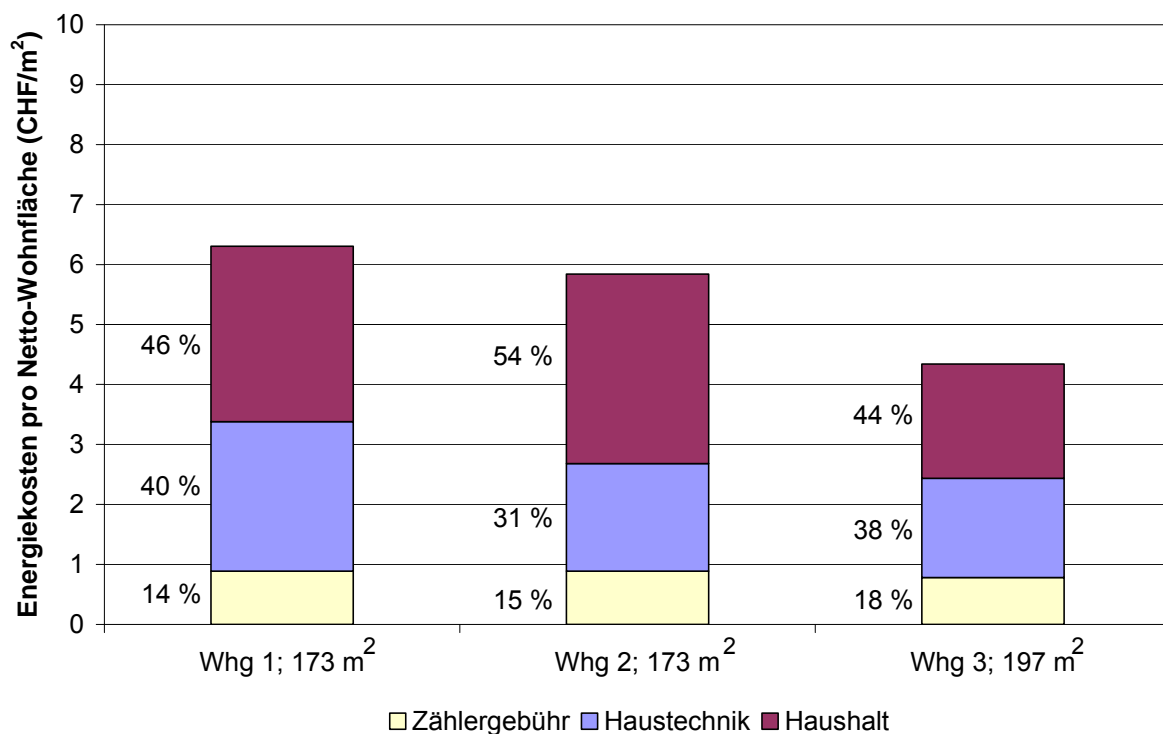


Abbildung 6.14 Spezifische Energiekosten pro m² Netto-Wohnfläche für das gesamte Jahr (1. Oktober 2007 bis 30. September 2008) in den drei Wohnungen von Objekt 2

Die totalen Energiekosten sind im erwarteten Bereich. Die jährlichen Kosten für die Kompaktgeräte belaufen sich in den Wohnungen 1-3 auf 431 CHF, 310 CHF und 287 CHF. 62 % (Whg1), 58 % (Whg2) und 64 % (Whg3) der gesamten Energiekosten (Zählergebühr + Haustechnik + Haushalt) fallen dabei während dem Winterhalbjahr an.

Hinweise zur Energiekostenberechnung:

Die Berechnung basiert auf Zählerablesungen, die ca. monatlich erfolgten. Daraus konnte jeweils der totale monatliche Stromverbrauch eruiert werden. Anschliessend wurden die Strombezüge mit den für Objekt 2 geltenden Tarifen (inkl. Mwst) von Energie Uster multipliziert. (Tarif: Frühling 08)

Hochtarif: 18.57 Rp/kWh

Niedertarif: 8.57 Rp/kWh

Zählergebühr: 12.81 CHF/Mt

Mit Kosten von CHF 1.90 bis 2.30 pro Quadratmeter Wohnfläche für Haustechnik (Heizen, Warmwasser, Lüften) sind die Betriebskosten extrem tief. Hinzukommen aber noch Ausgaben für Ersatzfilter von knapp CHF 100.- pro Wohnung und Jahr.

6.3. OBJEKT 2, WOHNUNG 1

6.3.1 Komfort und Behaglichkeit (2/1)

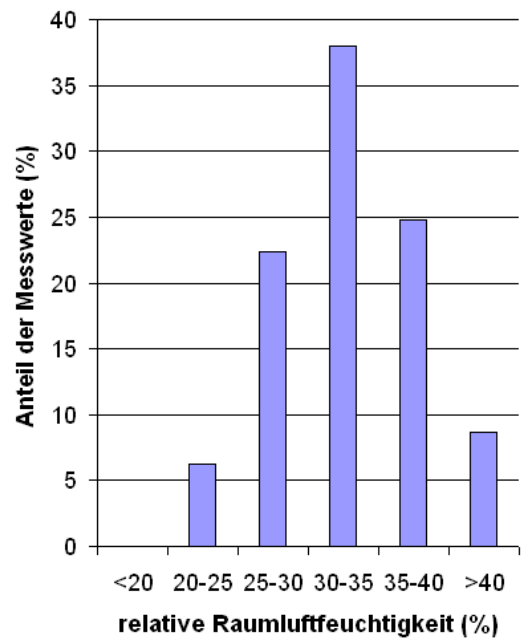
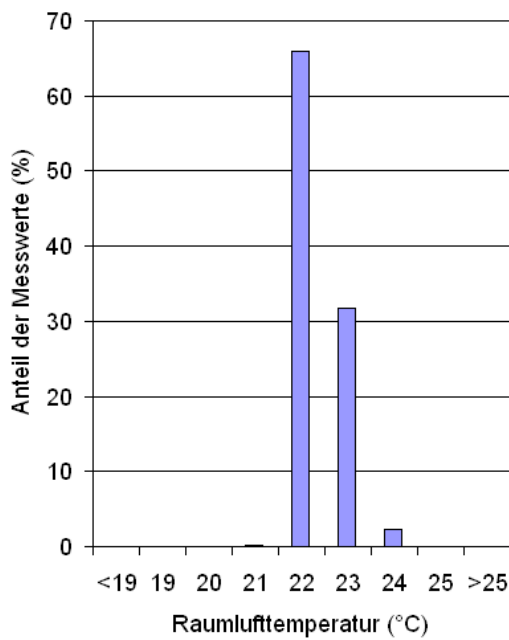


Abbildung 6.15 Häufigkeitsverteilung der Raumlufftemperatur während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 2/Wohnung 1

Abbildung 6.16 Häufigkeitsverteilung der relativen Raumlufffeuchtigkeit während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 2/Wohnung 1

Aus Abbildung 5.17 wird ersichtlich, dass die Raumlufftemperatur über den ganzen Winter sehr konstant bleibt und selbst bei tiefen Aussentemperaturen nie Werte unter 20°C erreicht. Auch während des Sommerhalbjahres liegt die Raumlufftemperatur immer in einem äusserst angenehmen Bereich zwischen 21 und 27 °C. Eine detailliertere Raumlufftemperaturauswertung ist im Anhang angeführt.

Als weiterer wichtiger Parameter zur Einschätzung des Wohnkomforts gilt die relative Raumlufffeuchtigkeit. Diese wurde wie die Raumlufftemperatur in einem Intervall von 15 min aufgenommen. Allgemein kann gesagt werden, dass die relative Raumlufffeuchtigkeit während den vier kältesten Wintermonaten in einem guten Bereich liegt. Der Grossteil der Messwerte liegt innerhalb von 30 – 50 % relativer Feuchte. Knapp 29% aller Messwerte liegen knapp unterhalb von 30 % relativer Feuchte. Tiefstwerte sind keine aufgetreten. Die detaillierte Auswertung befindet sich im Anhang.

Um den Komfort und die Behaglichkeit noch besser beurteilen zu können wurden in dieser Wohnung auch punktuelle CO₂-Messungen durchgeführt.

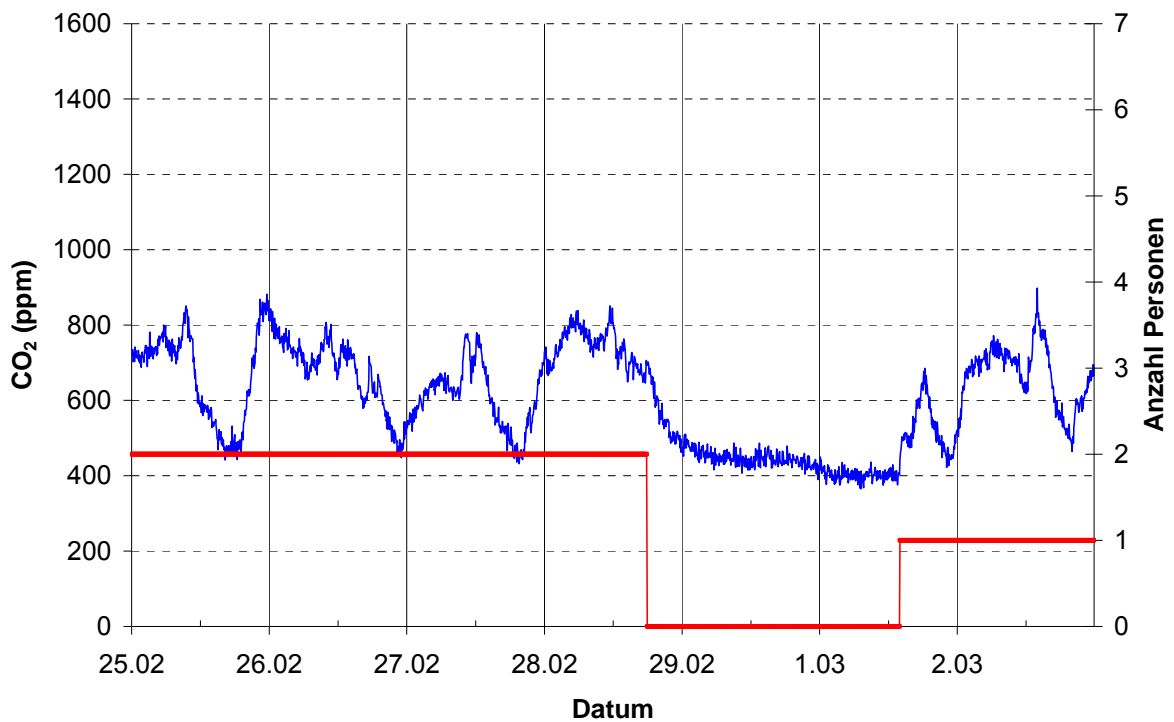


Abbildung 6.17 CO₂ Verlauf; gemessen während einer typischen Winterwoche im Büro von Objekt 2/1
Rote Linie: Anzahl anwesende Personen

Abbildung 6.17 und Abbildung 6.18 lassen erkennen, dass die Luftqualität während der ganzen Messperiode sehr gut war. Erwartungsgemäss wird sie mit steigender Anzahl Personen etwas schlechter.

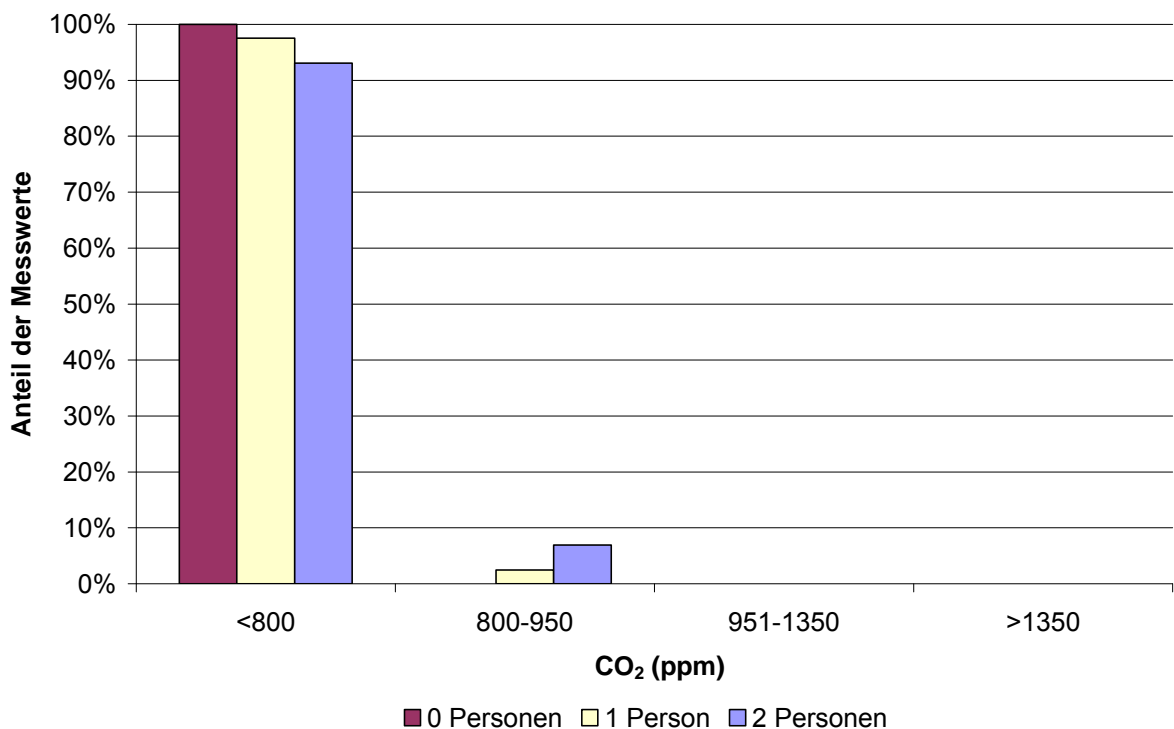


Abbildung 6.18 Häufigkeitsverteilung der CO₂ Konzentration in der Raumluft von Objekt 2/1
Messperiode: 25.02.2008 bis 02.03.2008

Während der gesamten Messperiode wurden auch bei Anwesenheit von zwei Personen die Kategorie RAL 2 - Raumluft mit hoher Luftqualität gemäss SIA 382/1 (d.h. CO₂-Konzentration unter 950 ppm) immer erreicht. Bei über 90% aller Messungen lag der CO₂-Gehalt sogar unter 800 ppm was einer sehr guten Luftqualität entspricht.

6.3.2 Energieverbrauch (2/1)

Tabelle 6.3 Vergleich der Energiekennzahlen zwischen den Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerten sowie weitere technische Informationen von Objekt 2/1

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	10.8	10.2	11.4
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	28.6	41.0	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.60	0.45	0.60
Haushaltsgeräte mit Effizienzklasse A/A ⁺	-	Ja	Ja	Ja
Raumlufttemperatur (Winter)	°C	20	22.7	-
Warmwassertemperatur	°C	60	49.3	-
Nettowohnfläche	m ²	-	173	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	203	-
Personenbelegung	Pers	-	3	-
Zuluftvolumenstrom pro Person	m ³ /(h*Pers)	-	45	30

Neben dem Kompaktgerät wurden während dem gesamten Jahr in Wohnung 1 noch Zusatzheizenergien in Form von Alkohol (15.52 kWh) und einer elektrischen Zusatzheizung (777 kWh) beansprucht.

Wohnung 1 ist einerseits mit 38.8 l/d/Pers durch einen insgesamt tiefen Warmwasserverbrauch (siehe Anhang) gekennzeichnet und weist andererseits dennoch einen hohen Gesamtenergieverbrauch auf (siehe Abbildung 6.8). Der Grund dafür ist eine defekte Bypass-Klappe, wodurch die WRG während einiger Monate umgangen wurde und kalte Aussenluft direkt ins Zuluftverteilsystem strömte.

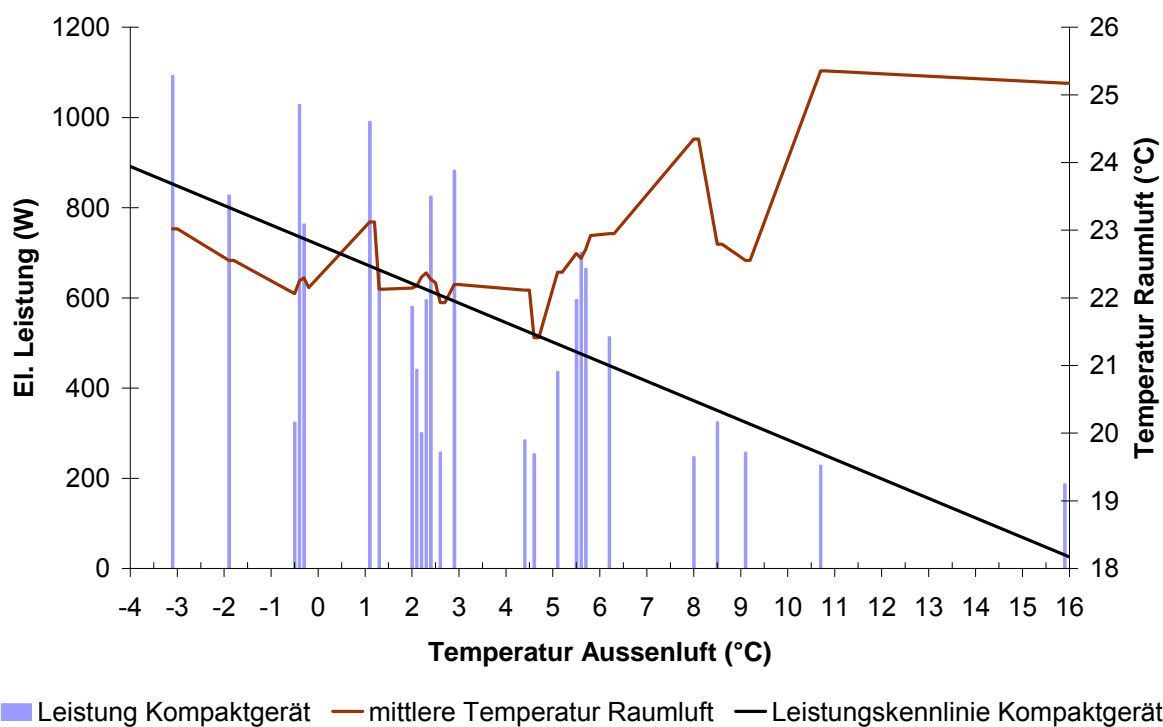


Abbildung 6.19 Leistungskennlinie des Kompaktgerätes und mittlere Raumlufttemperatur bei verschiedenen Aussenlufttemperaturen während des Winterhalbjahres (1. Oktober 2007 bis 30. März 2008) in Objekt 2/1

Wie erwartet sinkt die Leistungskennlinie des Kompaktgerätes mit steigenden Aussenlufttemperaturen. Zudem wird ersichtlich, dass bei niedrigen Aussenlufttemperaturen die mittlere Raumlufttemperatur immer noch bei komfortablen 22 °C liegt.

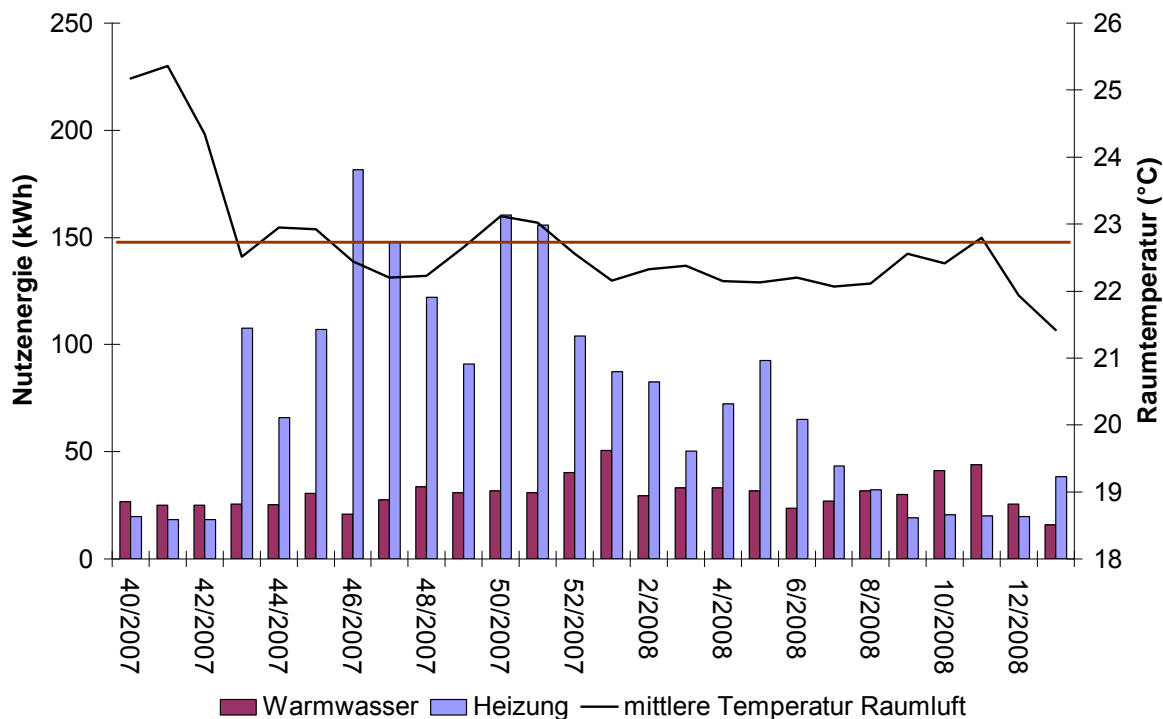


Abbildung 6.20 Nutzenergien für Warmwasser und Heizung während des gesamten Winterhalbjahres (1. Oktober 2007 bis 30. März 2008) in Objekt 2/1; braune Linie: Mittelwert der Raumtemperatur (22.7 °C).

Wie Abbildung 6.20 zeigt war die Raumtemperatur während dem gesamten Winterhalbjahr in dieser Wohnung im Mittel 22.7 °C. Entsprechend wurde oft geheizt und die Nutzenergien für die Heizung sind folglich hoch. Die Analysen von Objekt 1 (siehe insbesondere Kapitel 5.5.2) zeigen, dass eine um etwa 2 °C tiefere mittlere Raumtemperatur erheblich weniger Nutzenergie für die Heizung braucht und dadurch die Nutzungsgrade deutlich ansteigen. Dies ist eine mögliche Erklärung für die tiefen Nutzungsgrade.

Der Elektroheizstab im Gerät hat über das gesamte Jahr (1. Oktober 07 – 30. September 08) 484 kWh konsumiert. Dies entspricht 14 % des Energieverbrauchs des Kompaktgerätes.

Weitere Energieauswertungen befinden sich ebenfalls in Kapitel 6.2.2.

6.4. OBJEKT 2, WOHNUNG 2

6.4.1 Komfort und Behaglichkeit (2/2)

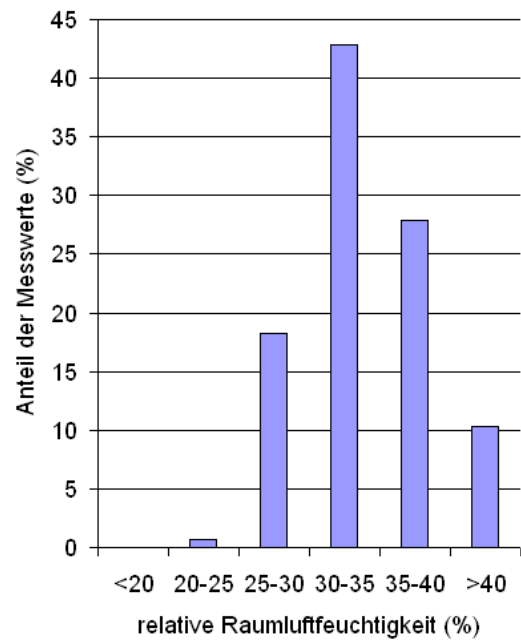
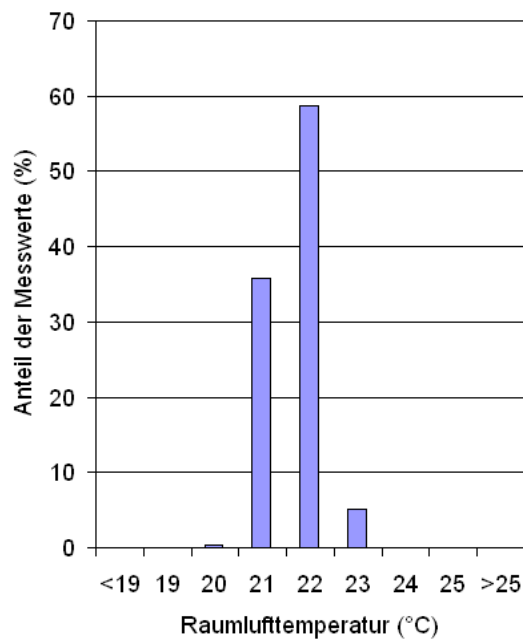


Abbildung 6.21 Häufigkeitsverteilung der Raumlufttemperatur während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 2/Wohnung 2

Abbildung 6.22 Häufigkeitsverteilung der relativen Raumluftfeuchtigkeit während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 2/Wohnung 2

Während dem gesamten Jahr bleibt die Raumlufttemperatur konstant und in einem äusserst angenehmen, energetisch optimalen Bereich.

Neben der Raumtemperatur war auch die Raumlufffeuchtigkeit in Wohnung 2 während des ganzen Winters in einem hervorragenden Bereich. Insgesamt sind nur 19 % der Messwerte unterhalb von 30 % relativer Feucht. Weitere Ausführungen zur Raumlufftemperatur und Raumlufffeuchtigkeit sind unter den Kapitel 5.2.1 und im Anhang angeführt.

6.4.2 Energieverbrauch (2/2)

Tabelle 6.4 Vergleich der Energiekennzahlen zwischen den Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerten sowie weitere technische Informationen von Objekt 2/2

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	10.8	7.0	11.4
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	28.6	31.7	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.60	0.40	0.60
Haushaltsgeräte mit Effizienzklasse A/A ⁺	-	Ja	Ja	Ja
Raumlufftemperatur (Winter)	°C	20	22.0	-
Warmwassertemperatur	°C	60	47.0	-
Nettowohnfläche	m ²	-	173	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	203	-
Personenbelegung	Pers	-	2	-
Zuluftvolumenstrom pro Person	m ³ /(h*Pers)	-	70	30

Neben dem Kompaktgerät wurden während dem gesamten Jahr in Wohnung 2 noch Zusatzheizenergien in Form von Alkohol (17.74 kWh) und einer elektrischen Zusatzheizung (277.00 kWh) beansprucht.

Der tägliche Pro-Kopf-Warmwasserverbrauch in Wohnung 2 ist deutlich höher als der in den anderen beiden Wohnungen von Objekt 2. Im Durchschnitt beträgt er 79.3 l/d/Pers. (Siehe auch im Anhang) Entsprechend sind, wie in Abbildung 6.24 zu sehen ist, auch die Nutzenergien des Warmwassers gross.

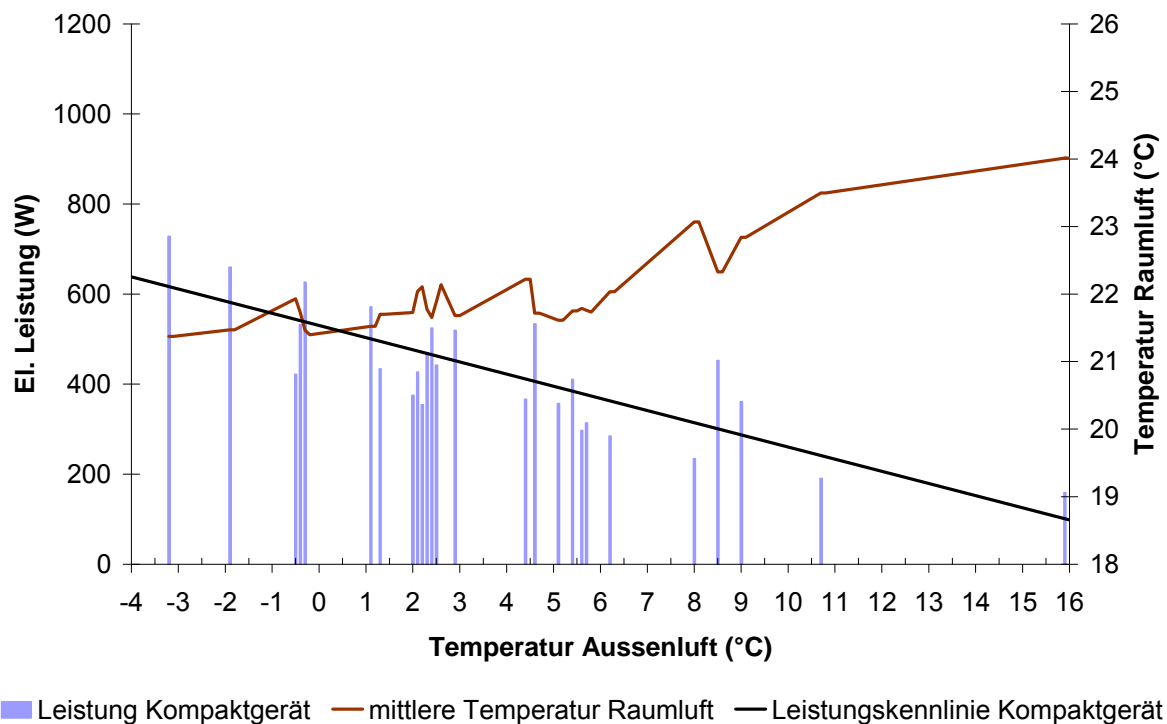


Abbildung 6.23 Leistungskennlinie des Kompaktgerätes und mittlere Raumlufttemperatur bei verschiedenen Aussenlufttemperaturen während des Winterhalbjahres (1. Oktober 2007 bis 30. März 2008) in Objekt 2/2

Die Leistungskennlinie sinkt mit steigenden Aussenlufttemperaturen. Allgemein ist die Leistung des Kompaktgerätes auf einem sehr niedrigen Niveau. Dass auch bei milderer Aussenlufttemperaturen relativ grosse Leistungen registriert werden, lässt darauf schliessen, dass das Nutzungsverhalten einen grösseren Einfluss auf die Leistung des Kompaktgerätes hat als die Aussenlufttemperatur. Vergleiche dazu auch in den Kapiteln 5.3.2, 5.4.2 und 5.5.2.

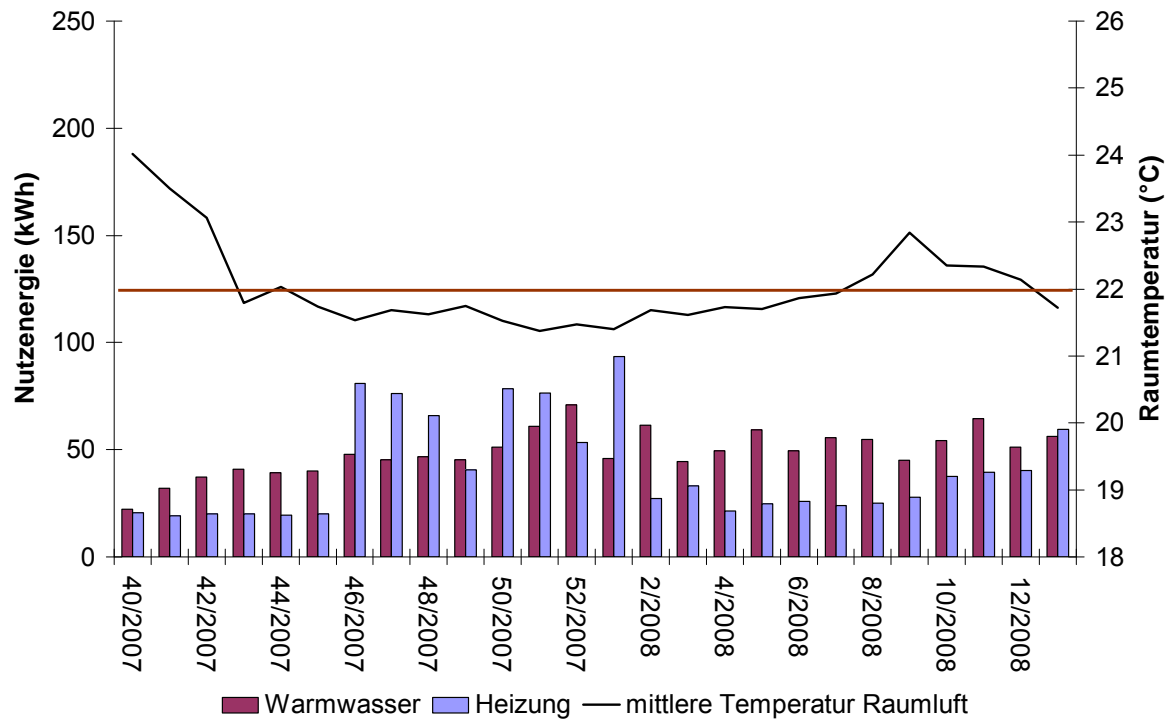


Abbildung 6.24 Nutzeroergien für Warmwasser und Heizung während des gesamten Winterhalbjahres (1. Oktober 2007 bis 30. März 2008) in Objekt 2/2;
braune Linie: Mittelwert der Raumtemperatur (22 °C).

Die Nutzeroergien für die Heizung sind über das gesamte Winterhalbjahr relativ tief. Umso erstaunlicher ist deshalb, dass die Nutzungsgrade nicht höher sind. Diese Tatsache lässt vermuten, dass die automatische Gerätesteuerung und die Umwälzpumpe einen grossen Grundenergiebedarf aufweisen.

Der Elektroheizstab im Gerät hat über das gesamte Jahr (1. Oktober 07 – 30 September 08) 381 kWh konsumiert. Dies entspricht 13 % des Energieverbrauchs des Kompaktgerätes.

Weitere Energieauswertungen befinden sich in Kapitel 6.2.2.

6.5. OBJEKT 2, WOHNUNG 3

6.5.1 Komfort und Behaglichkeit (2/3)

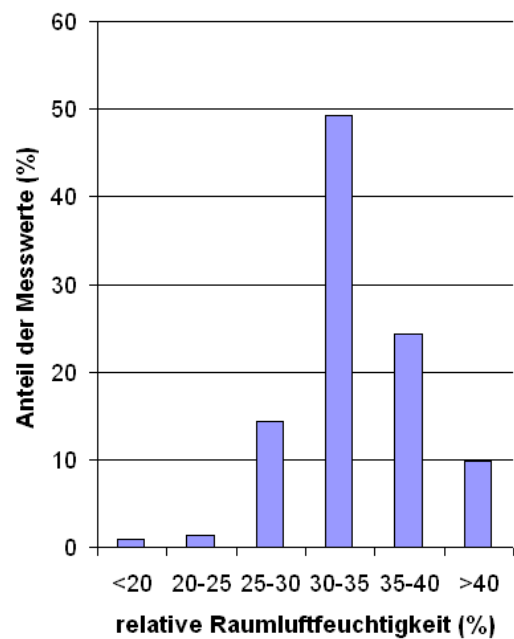
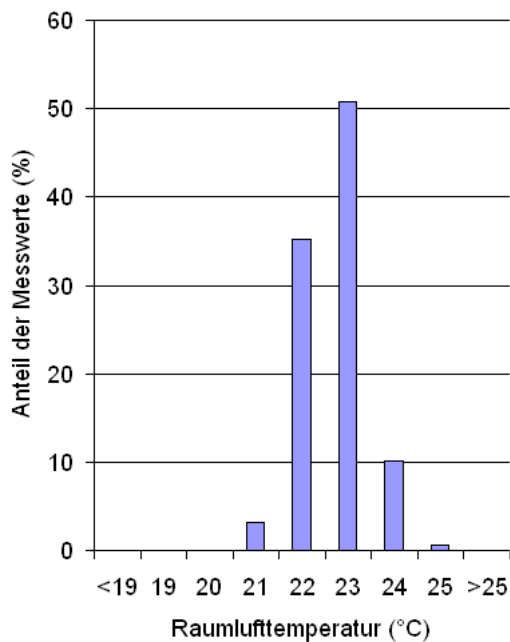


Abbildung 6.25 Häufigkeitsverteilung der Raumlufftemperatur während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 2/Wohnung 3

Abbildung 6.26 Häufigkeitsverteilung der relativen Raumlufffeuchtigkeit während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 2/Wohnung 3

Auch in dieser Wohnung bleibt die Raumlufftemperatur während des ganzen Winters konstant in einem relativ hohen, jedoch angenehmen Bereich zwischen 21 und 25 °C. Einzig während der Abwesenheit der Bewohner in den Sommerferien wurden höhere Temperaturen festgestellt, da die Lüftung ausgeschaltet war.

Neben der Raumlufftemperatur wurde auch die relative Raumlufffeuchtigkeit gemessen. Die Auswertung dieser Daten liefert sehr zufriedenstellende Werte. Insgesamt sind nur 16 % aller Messwerte unter 30 % relativer Feuchte. Dies veranschaulichen auch Abbildung 6.6 und Grafiken im Anhang.

Ein weiterer Parameter zur Quantifizierung des Wohnkomforts ist die Messung des CO₂-Gehaltes der Raumlufft.

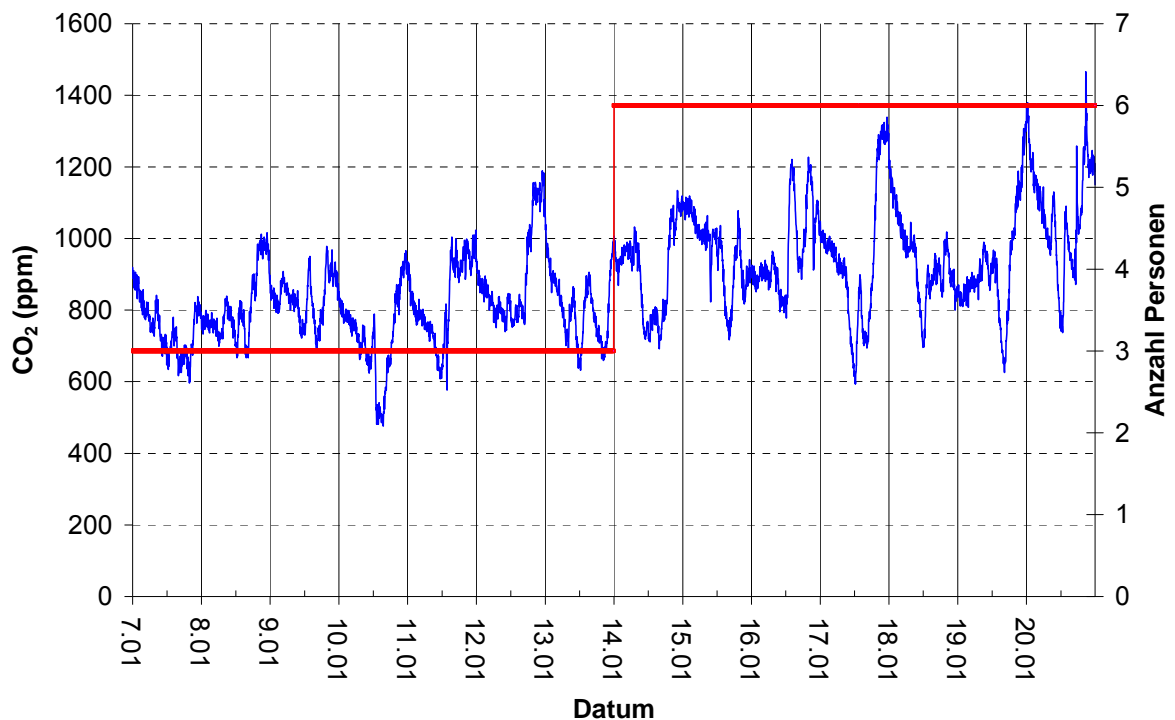


Abbildung 6.27 CO₂ Verlauf; gemessen während einer typischen Winterwoche im Wohnzimmer von Objekt 2/3
Rote Linie: Anzahl anwesende Personen

Aus dieser Abbildung wird ersichtlich, dass die Raumluftqualität stark von der Anzahl anwesender Personen abhängig ist. Zudem sind die Tageszyklen ersichtlich. In der Nacht sinkt der CO₂-Pegel jeweils ab. Gegen den Abend erreicht er sein Maximum, wenn die Aktivität der Bewohner vermutlich am grössten ist. Zum Vergleich: Der CO₂-Pegel der Aussenluft beträgt ca. 380 ppm.

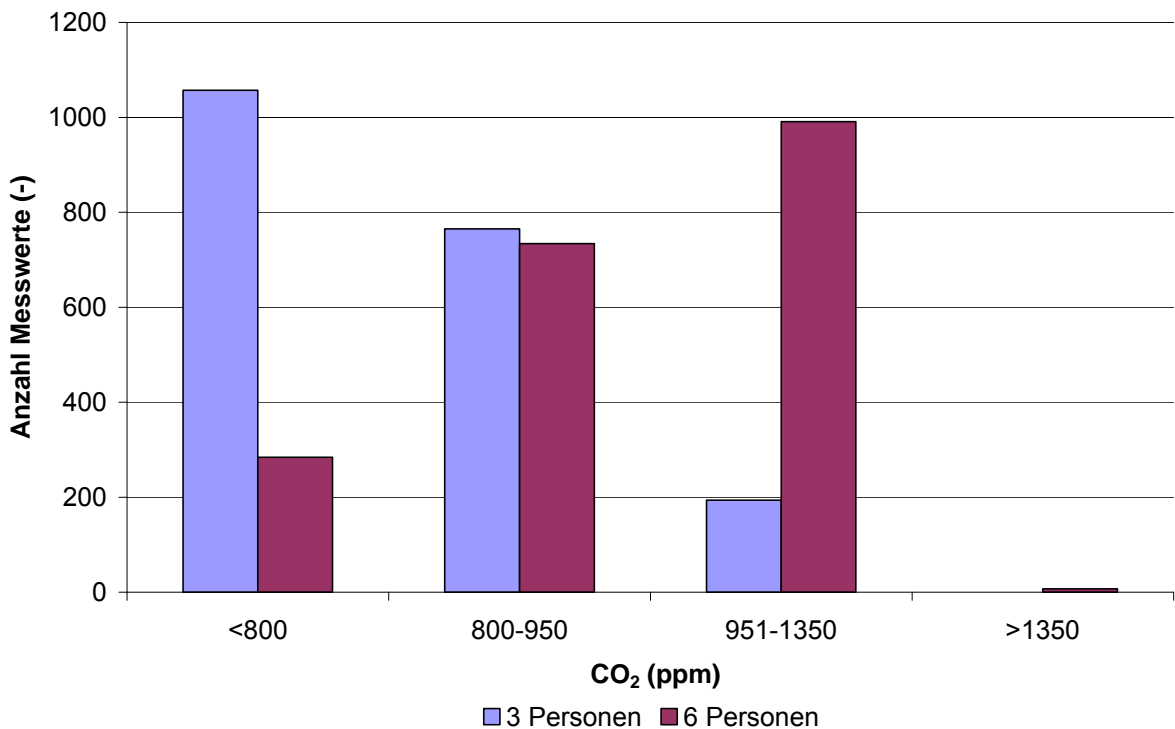


Abbildung 6.28 Häufigkeitsverteilung der CO₂ Konzentration im Wohnzimmer von Objekt 2/3
Messperiode: 07.01.2008 bis 20.01.2008

In dieser Abbildung kommt die Tatsache, dass sich die Luftqualität mit steigender Anzahl Personen verschlechtert sehr gut zur Geltung. Um die Messresultate besser einordnen zu können sei auf folgende Klassifizierungskategorien gemäss SIA 382/1 hingewiesen. Räume mit CO₂-Anteilen von unter

950 ppm gelten als Räume mit hoher Luftqualität. Typische Wohn- und Büroräume weisen CO₂-Pegel von 950-1350 ppm auf. Werte über 1350 ppm weisen auf Räume mit niedriger Luftqualität hin.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass selbst in kalten Wintertagen bei Anwesenheit von mehreren Personen die Raumluftqualität sehr gut war.

6.5.2 Energieverbrauch (2/3)

Tabelle 6.5 Vergleich der Energiekennzahlen zwischen den Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerten sowie weitere technische Informationen von Objekt 2/3

	<i>Einheit</i>	<i>Planung</i>	<i>Ist</i>	<i>Anforderung</i>
<i>Heizwärmebedarf</i>	kWh/m ²	10.8	11.5	11.4
<i>Energiekennzahl Wärme</i>	kWh/m ²	28.6	24.2	30.0
<i>Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)</i>	h ⁻¹	< 0.60	0.57	0.60
<i>Haushaltsgeräte mit Effizienzklasse A/A⁺</i>	-	Ja	Ja	Ja
<i>Raumlufttemperatur (Winter)</i>	°C	20	23.0	-
<i>Warmwassertemperatur</i>	°C	60	47.5	-
<i>Nettowohnfläche</i>	m ²	-	197	-
<i>Energiebezugsfläche EBF</i>	m ²	-	232	-
<i>Personenbelegung</i>	Pers	-	6	-
<i>Zuluftvolumenstrom pro Person</i>	m ³ /(h*Pers)	-	24	30

Neben dem Kompaktgerät wurden während dem gesamten Jahr in Wohnung 1 noch Zusatzheizenergien in Form von Alkohol (4.44 kWh) und Holz (262.3 kWh) beansprucht.

Wie bereits erwähnt nimmt die Erhitzung des Warmwassers einen grossen Anteil am gesamten Energiebezug einer Wohnung ein. Darum wurde auch in dieser Wohnung der Warmwasserverbrauch gemessen. Der tägliche Warmwasser Pro-Kopf-Verbrauch in Wohnung 3 ist, verglichen mit den beiden anderen Wohnungen, tief. Der absolute Warmwasserverbrauch ist etwa gleich hoch wie bei den anderen beiden Wohnungen (siehe Abbildung 6.7).

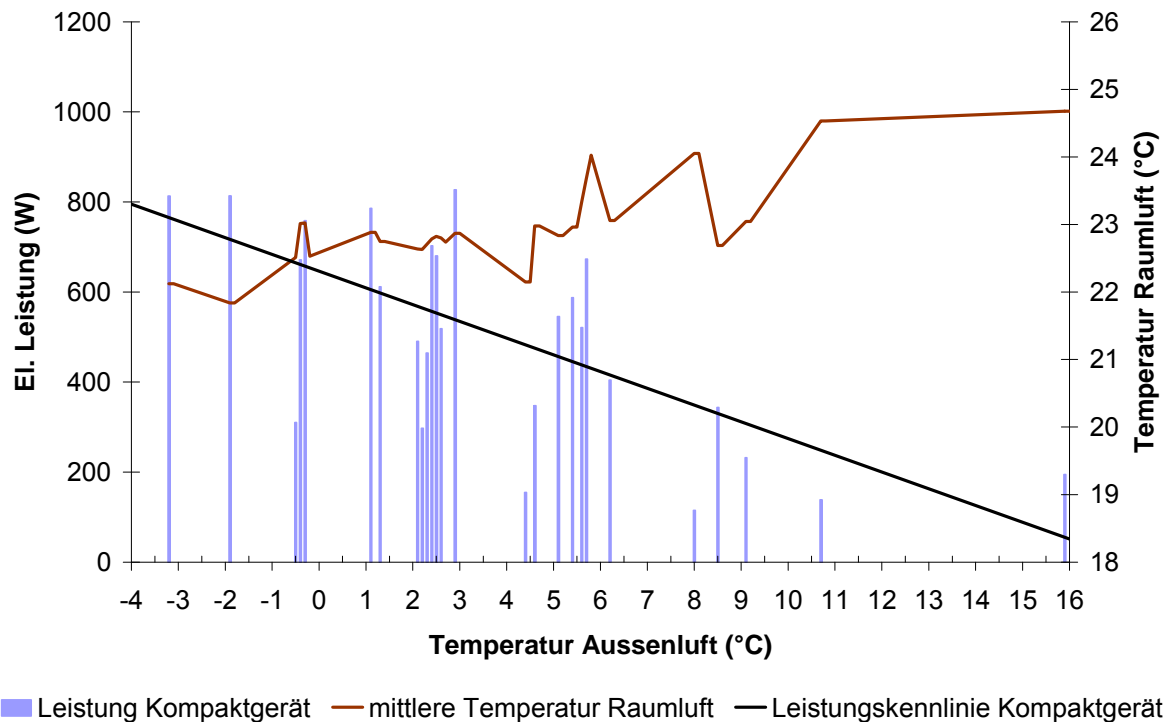


Abbildung 6.29 Leistungskennlinie des Kompaktgerätes und mittlere Raumlufttemperatur bei verschiedenen Aussenlufttemperaturen während des Winterhalbjahres (1. Oktober 2007 bis 30. März 2008) in Objekt 2/3

Wie erwartet sinkt die Leistungskennlinie des Kompaktgerätes mit steigenden Aussenlufttemperaturen. Dennoch sind bezüglich der Leistung relativ grosse Schwankungen zu erkennen. Dies lässt darauf schliessen, dass neben der Aussenlufttemperatur auch das Nutzungsverhalten der Bewohner einen grossen Einfluss auf die Leistung der Kompaktgeräte hat.

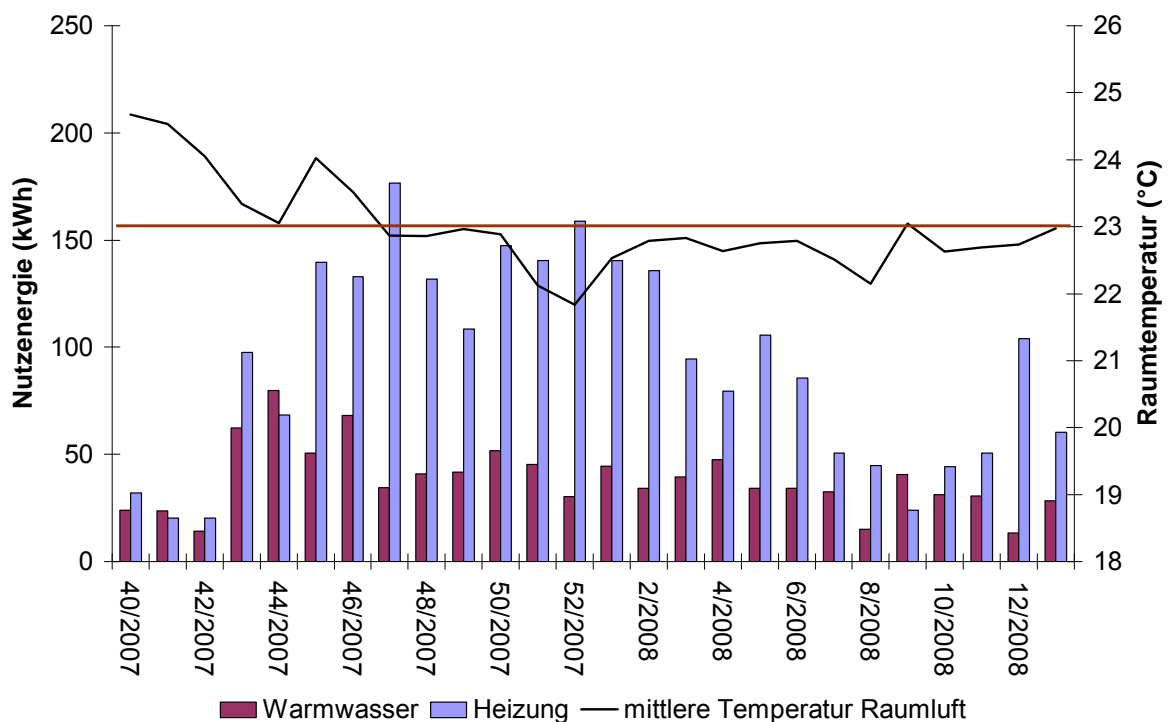


Abbildung 6.30 Nutzenergien für Warmwasser und Heizung während des gesamten Winterhalbjahres (1. Oktober 2007 bis 30. März 2008) in Objekt 2/3; braune Linie: Mittelwert der Raumtemperatur (23 °C).

Der im Kompaktgerät integrierte Elektroheizstab ist über das gesamte Jahr deaktiviert gewesen und hat somit keine Energie bezogen. Weitere Energieauswertungen befinden sich in Kapitel 6.2.2.

6.6. OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN

6.6.1 Hinweise zur Gerätesteuerung

In Wohnung 2/3 konnte immer wieder beobachtet werden, dass die Wärmepumpe Warmwasser produziert, obwohl der Speicher nicht unter der Minimaltemperatur war und die Solltemperatur von 55 °C erst für morgens 06.00 Uhr programmiert war. Das heisst die Wärmepumpe konkurrenzierte die Solargewinnung während des Tages unnötigerweise.

6.6.2 Solarkreislauf

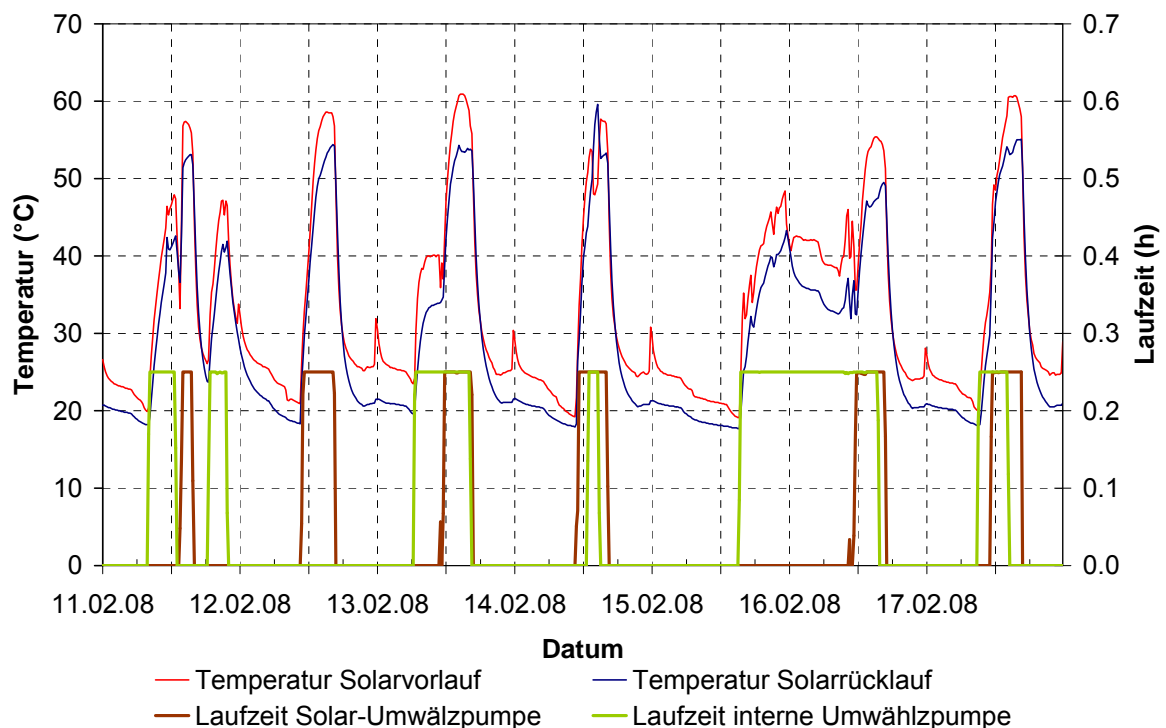


Abbildung 6.31 Solarkreislauf und Laufzeiten der Umwälzpumpen während einer typischen Winterwoche mit Sonnenschein in Objekt 2/1

Immer wenn die Umwälzpumpe läuft, erreichen Solarvor- und Rücklauf einen Peak. Diese Tatsache lässt eine Rückströmung vermuten, welche einen Wärmeverlust bewirken würde.

6.6.3 Elektroheizstab

In Abbildung 6.9 dass die in den Wohnungen 1 und 2 aktivierten Heizstäbe im Winterhalbjahr relativ oft in Betrieb sind. In Wohnung 3 dagegen wurde der Heizstab deaktiviert. Dennoch musste in Wohnung 3 keine Komforteinbussen in Kauf genommen werden. Der zusätzliche Energiebedarf zur Wärmege-
winnung konnte in Wohnung 3 durch den Kompressor gedeckt werden. Entsprechend ist der Wärme-
erzeugungsnutzungsgrad in Wohnung 3 deutlich höher, als derjenige der beiden anderen Wohnungen
von Objekt 2. Fazit: Heizstäbe sollten nur auf spezielles Verlangen aktiviert werden.

6.6.4 Standby-Verlust

Der Stillstand oder Standby-Verlust ist unnötig hoch. Die Wasserbehälter sollten vor allem besser wärmege-
dämmt und die Anschlüsse bezüglich Abkühlung optimiert werden. Heute gibt es neues
Wärmedämmmaterial auf Aerogel-Basis ($\lambda = 0.013 \text{ W/m}^2/\text{K}$), welches doppelt so gut isoliert wie PU-
Schaum.

7. Objekt 3: MFH Scalettastrasse, Chur

7.1. GEBÄUDE-SITUATIONS-BESCHREIB



Abbildung 7.1 Blick auf die Südostfassade

Bei diesem Objekt handelt es sich um das erste definitiv zertifizierte Minergie-P (GR-007-P) Mehrfamilienhaus im Kanton Graubünden. Das Haus hat pro Geschoss eine Wohnung, d.h. vier 4-Zimmer Wohnungen und eine 3-Zimmer Wohnung.

7.1.1 Energiekonzept

In allen fünf Wohnungen sind Kompaktanlagen vom Typ Aerosmart M (Marke Drexel und Weiss) beim Wohnungseingang installiert worden. Die Kompaktanlagen erwärmen die Luft und erzeugen das Warmwasser. Die Verteilung der benötigten Wärme erfolgt über die Luft. Für das Warmwasser wird die Überhitzungswärme genutzt. Die Fortluft ist mit einer guten Dämmung versehen worden und führt über Dach. Die Energieerzeugung für die Restwärme erfolgt über einen Pelletofen, der im Wohnzimmer platziert wird.

Der Energieverbrauch nach MINERGIE-P berechnet (inkl. Warmwasser und Elektrizität doppelt gewichtet) beträgt 30.0 kWh/m^2 . Die totale Energiebezugsfläche EBF des Mehrfamilienhauses beträgt 763.4 m^2 und das Oberflächen-Volumenverhältnis A/EBF beträgt 1.38.

7.1.2 Gebäudehülle

Die hochwärmegedämmte Gebäudehülle hat folgende Kennzahlen (U-Werte in $\text{W/m}^2\text{K}$):

Aussenwände	0.08 – 0.18
Flachdachbereich	0.07
Fenster U_w	0.75 – 0.84 (Glas U-Wert = 0.5; g = 45%)
Boden gegen unbeheizt	0.12 – 0.14
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	$0.5 - 0.6 \text{ h}^{-1}$

7.1.3 Haustechnik

Luft wird über einen Säulenhut im Erdgeschoss angesaugt und in das Untergeschoss geführt. Im Untergeschoss wird die Luft vorgewärmt, resp. gekühlt. Diese passive Vorwärmung erfolgt mittels zwei Erdsondenbohrungen mit total 120 m Sondenlänge, wobei der Kreislauf auf den Plattentaucher führt, der im Aussenluftkanal im Untergeschoss eingebaut ist. Die vorgewärmte Aussenluft wird mittels Kanälen zu den Kompakteinheiten geführt. Die Zuluft in die Räume erfolgt über Kunststoffleitungen, die bis zum Auslass, resp. bis zum Raum, bei dem eingeblasen wird, gedämmt sind. Die Luft wird mittels Draller eingeblasen. In der Nasszelle und der Küche wird die Luft abgesaugt und via Kunststoffleitungen zum Kompaktgerät zurückgeführt. Im Kompaktgerät wird die Luft über einen Gegenstromplattenwärmetauscher geführt. Nach dem Plattenwärmetauscher wird die Luft mit einer Kleinst-Wärmepumpe (Leistungsaufnahme 375 W, thermische Leistung 1315 W, Kältemittel 134 a) bis zu -5 °C abgekühlt. Für das Warmwasser wird die Überhitzungswärme genutzt. Das Gerät ist mit einem Sommer-Bypass ausgerüstet. Die Steuerung erfolgt über ein Raumbediengerät, das im Gang platziert ist. Neben der Temperatureinstellung ist auf dem Gerät auch die Signalisation Heizbetrieb, Filterwechsel und Störung ersichtlich.

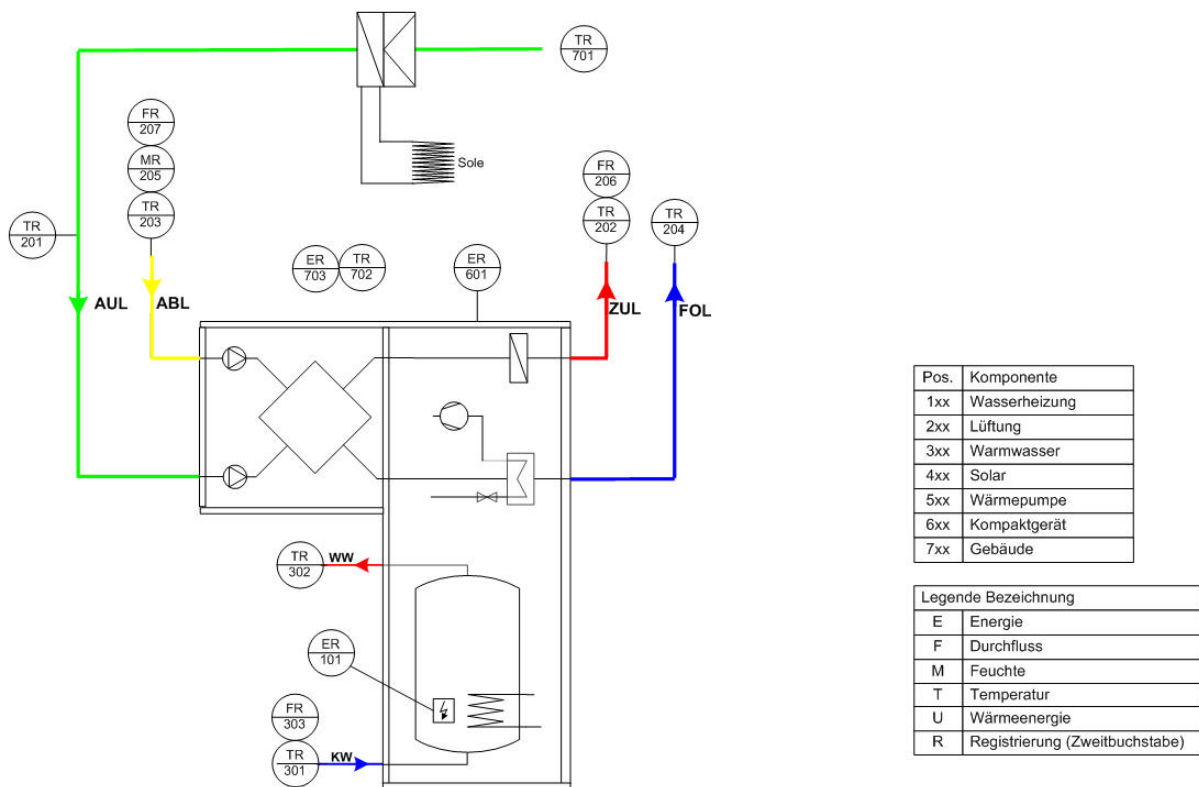


Abbildung 7.2 Messschema des Kompaktgerätes (Aerosmart M)



Abbildung 7.3 *Kompaktgerät Aerosmart M*

7.2. SYNTHESE OBJEKT 3

Bei den beiden untersuchten Wohnungen in diesem Objekt handelt es sich um Wohnungen aus dem zweiten (Wohnung 1) und dritten Obergeschoss (Wohnung 2). Beide Wohnungen weisen eine Nettowohnfläche von etwa 120 m² auf und werden von je zwei Personen bewohnt. Die mittleren Volumenströme betragen vom 5. Februar 2008 bis 31. März 2008 in Wohnung 1 145 m³/h und 135 m³/h und in Wohnung 2 155 m³/h und 140 m³/h für den Zuluft- resp. Abluftvolumenstrom. Vor der zweiten Winterperiode (1. Oktober 2008 bis 8. Februar 2009) wurde die Luftmenge reduziert. Die während dieser zweiten Winterperiode gemessenen Volumenströme sind in Wohnung 1 124 m³/h und 110 m³/h und in Wohnung 2 128 m³/h und 100 m³/h für den Zuluft- resp. Abluftvolumenstrom.

7.2.1 Komfort und Behaglichkeit

Den grössten Einfluss auf den Wohnkomfort hat die Raumlufthtemperatur. Für empfindliche Personen ist zudem auch die relative Raumlufthfeuchtigkeit von Bedeutung. Deshalb sind in den folgenden beiden Abbildungen diese beiden Parameter in Form einer Häufigkeitsverteilung dargestellt.

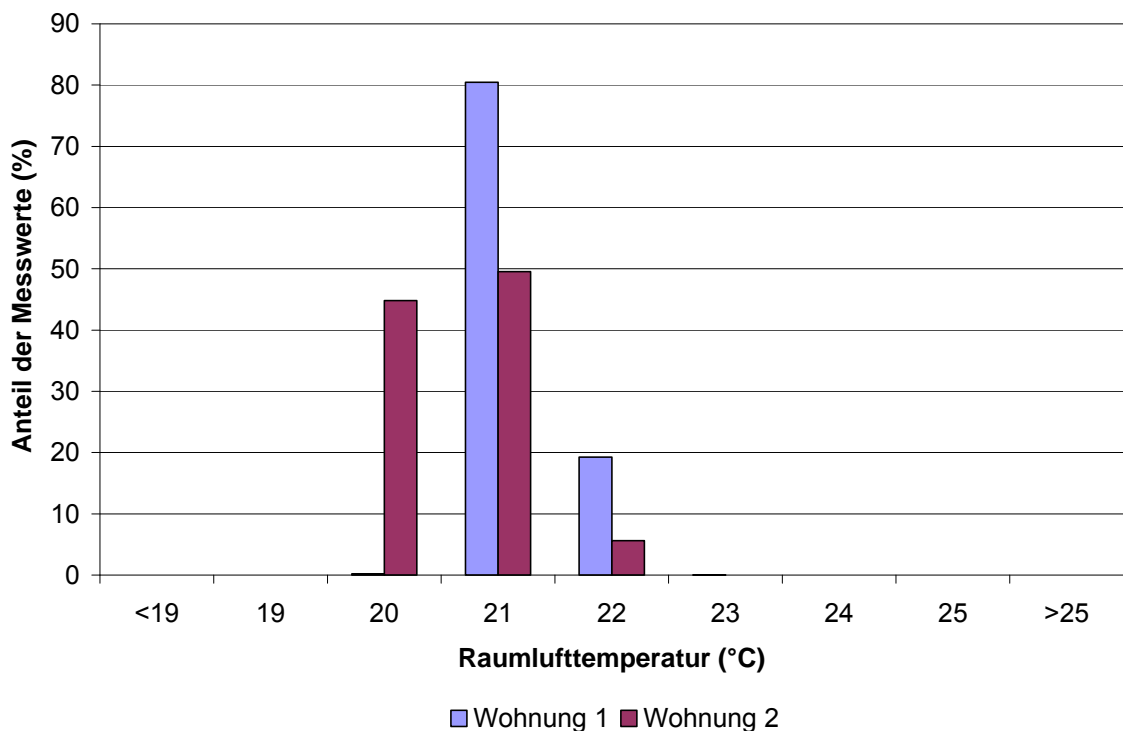


Abbildung 7.4 Häufigkeitsverteilung der Raumlufthtemperatur in den beiden Wohnungen von Objekt 3 während den vier kältesten Monaten des Jahres (5. Februar 2008 bis 29. Februar 2008 und 1. November 2008 bis 5. Februar 2009)

In beiden Wohnungen war die Raumlufthtemperatur stets in einem hervorragenden Bereich. Werte unter 20 °C oder über 23 °C wurden keine registriert. Dies lässt darauf schliessen, dass der Heizbetrieb in beiden Wohnungen einwandfrei funktionierte und effizient eingesetzt wurde. Die Raumtemperaturen liegen im Mittel bei 21.3 und 21.0 °C und damit über den Planungsgrundlagen von 20 °C.

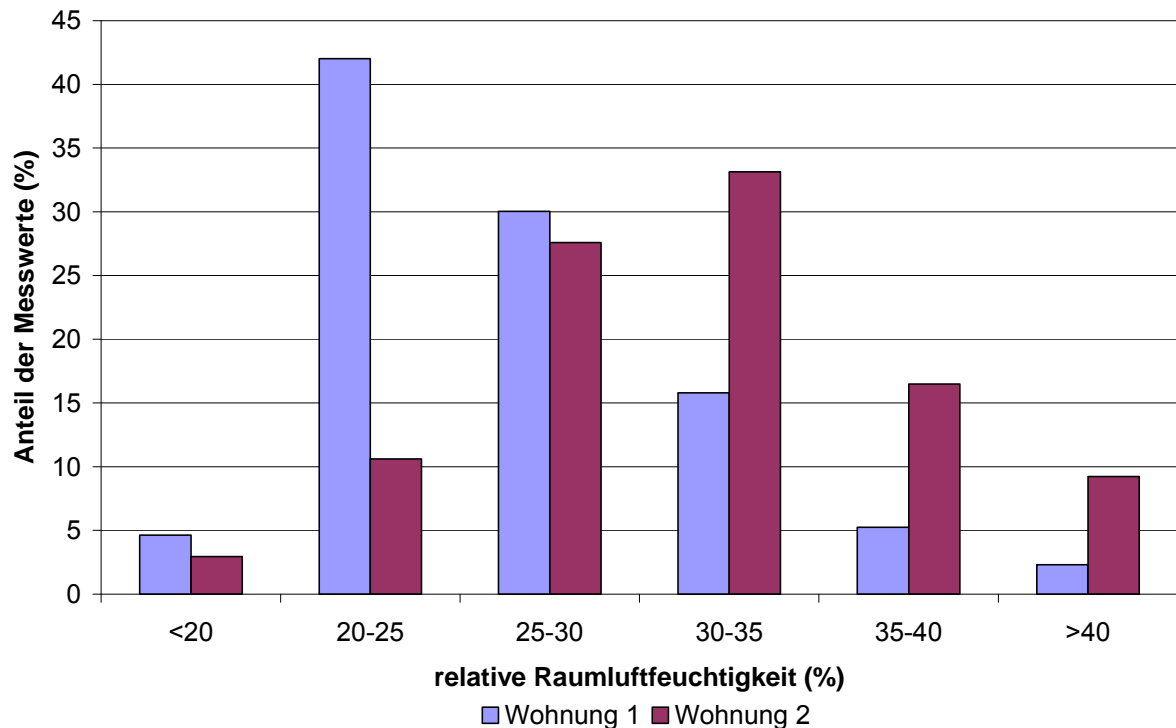


Abbildung 7.5 Häufigkeitsverteilung der relativen Raumlufffeuchtigkeit in den beiden Wohnungen von Objekt 3 während den vier kältesten Monaten des Jahres (5. Februar 2008 bis 29. Februar 2008 und 1. November 2008 bis 5. Februar 2009)

Die Werte aus der Analyse der relativen Raumlufffeuchtigkeit sind weniger zufrieden stellend. In Wohnung 1 sind 76.7 %, in Wohnung 2 41.1 % aller Messwerte unterhalb von 30 % relativer Raumlufffeuchte. Vor allem bei tiefen Aussenlufttemperaturen wird die trockene Aussenluft durch das Aufheizen relativ betrachtet noch trockener. Der personenspezifische Luftwechsel beträgt in beiden Wohnungen ca. 70 m³/h und ist somit zu hoch. Hauptgrund dafür ist, dass die Anlage für 4 Personen dimensioniert wurde aber weitgehend nur von zwei Personen genutzt wird.

Der Gerätelieferant hat in der Folge reagiert und die Volumenströme der Lüftung reduziert. Wenn die Abluftwärmepumpe in Betrieb ist, muss hingegen wieder auf der Soll-Luftmenge gelüftet werden. Immerhin führte dieser reduzierte Lüftungsbetrieb zu rund 5 % besseren, sprich höheren relativen Luftfeuchten in den Wohnungen.

Damit wurde einmal mehr bestätigt, dass die korrekte Luftmengendimensionierung für die Luftfeuchtigkeit von entscheidender Bedeutung ist.

7.2.2 Energieverbrauch

Tabelle 7.1 Vergleich der Energiekennzahlen zwischen den Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerten sowie weitere technische Informationen von Objekt 3 (Mittelwerte der gemessenen Wohnungen)

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	11.0	9.3	11.1
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	30.0	23.1	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.60	0.5	0.60
Haushaltsgeräte mit Effizienzklasse A/A ⁺	-	Ja	Nicht geprüft	Ja
Raumlufttemperatur (Winter)	°C	20	21.2	-
Warmwassertemperatur	°C	60	51.8	-
Nettowohnfläche Whg 1/2	m ²	-	120 / 120	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	160 / 160	-
Personenbelegung	Pers	-	2 / 2	-
Zuluftvolumenstrom pro Person	m ³ /(h*Pers)	-	67 / 71	30

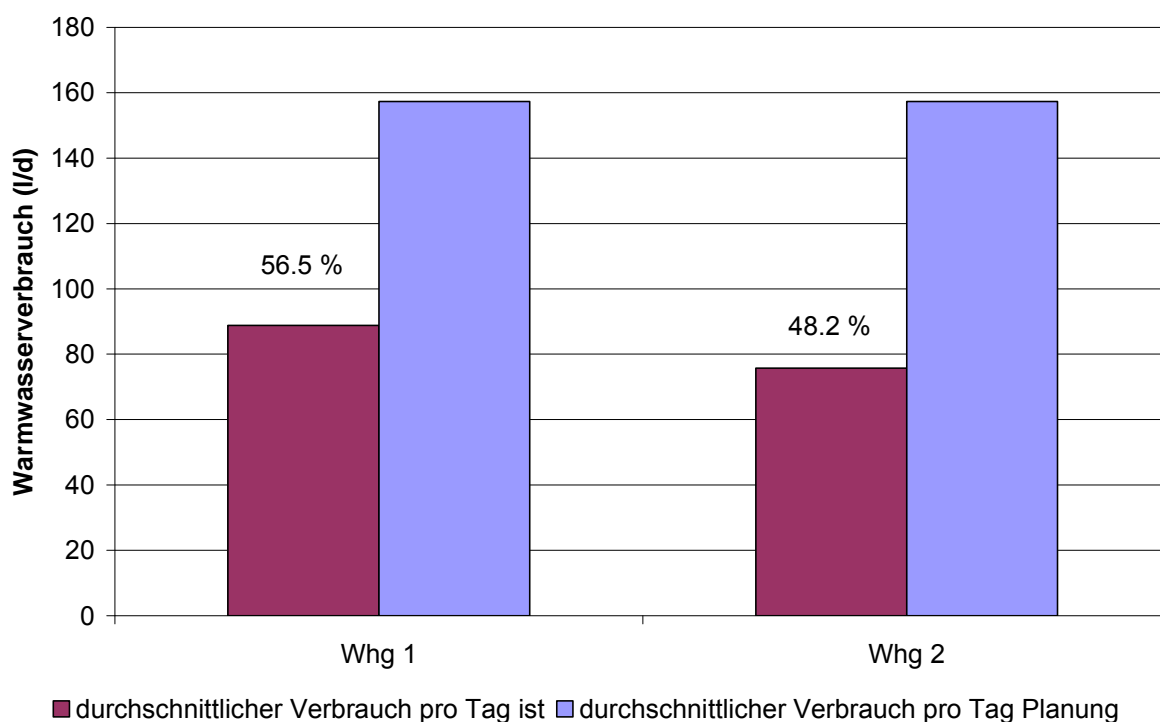


Abbildung 7.6 Durchschnittlicher täglicher Warmwasserverbrauch in den beiden Wohnungen von Objekt 3 während dem Winterhalbjahr (5. Februar 2008 bis 31. März 2008 und 1. Oktober 2008 bis 4. Februar 2009) im Vergleich mit dem Planungswert nach SIA 380/1

Die Planungswerte basieren auf der SIA Norm 380/1. Gemäss dieser entspricht die Warmwasserenergie (Q_{WW}) 75 MJ/m²/Jahr. Mit einem Temperaturunterschied (ΔT) von 50 K ergibt sich somit für die beiden Wohnungen von Objekt 3 ein geplanter durchschnittlicher Verbrauch von 157.3 l/d.

Ähnlich wie in den anderen analysierten Objekten war der Warmwasserverbrauch während des untersuchten Zeitraumes tiefer als bei der Planung prognostiziert. Der durchschnittliche Tagesverbrauch in Wohnung 1 lag bei 88.8 l/d, der von Wohnung 2 bei 75.7 l/d. Für Wohnung 1 wurden von Woche 45/08 bis Woche 06/09 hochgerechnete Werte verwendet, weil die Warmwasserverbrauchsmessungen aufgrund eines Computerproblems nicht aufgezeichnet werden konnten.

Insgesamt wurde folgender Elektrizitätsverbrauch in Heizstäben und Zusatzheizungen aufgewendet:

Tabelle 7.2 Elektrizitätsverbrauch durch Heizstäbe und Zusatzheizungen in den verschiedenen Wohnungen von Objekt 3 während der gesamten Messperiode (11. Februar 2008 bis 10. Februar 2009)

	Elektroheiz- stab	el. Zusatzheizung	Total elektrisch	Total elektrisch pro EBF	andere Zusatzhei- zung
Einheit	kWh	kWh	kWh	kWh/m2	kWh
Whg 1	0.0	0.0	0.0	0.0	882.0
Whg 2	0.0	1.0	1.0	0.01	970.2

7.2.3 Nutzungsgrad

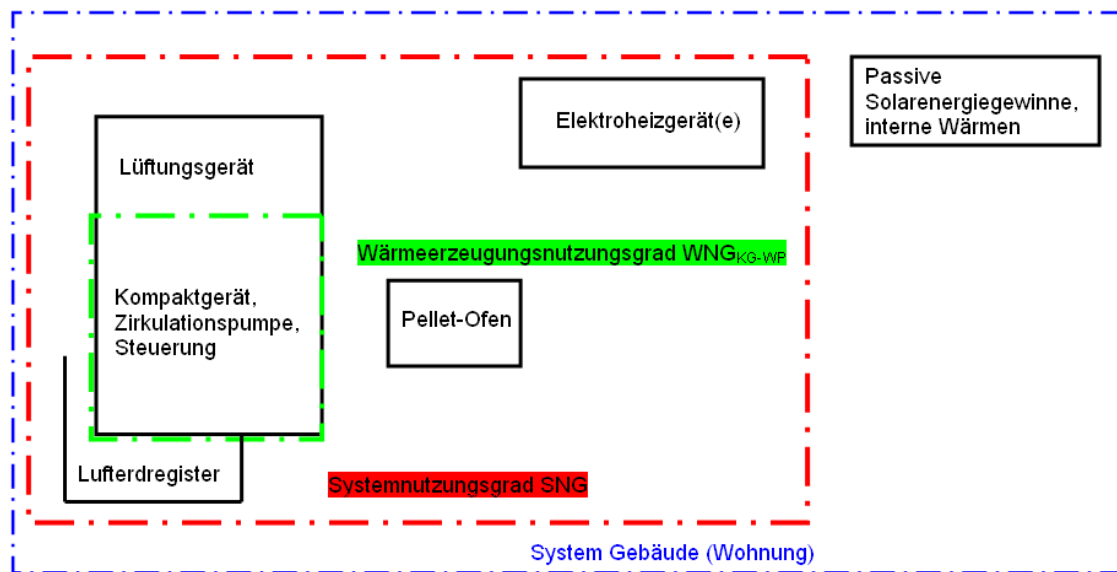


Abbildung 7.7 schematische Darstellung der Nutzungsgrade in Objekt 3

Der Wärmeerzeugungsnutzungsgrad (WNG_{KG-WP}) drückt das Warmwasser (Q_w) und die nutzbare Heizwärme ($Q_h + Q_{hr}$) im Verhältnis zum Stromverbrauch des Wärmepumpen-Kompressors und die interne Umwälzpumpe (E_{KG-WP}) aus. Dieser Nutzungsgrad umfasst also auch alle internen Verluste und ist somit sicher tiefer als die üblicherweise angegebenen COP-Werte. Die durch den Erdwärmetauscher sowie WRG gewonnene Energie und der Stromaufwand für die Lüfter wird nicht mit eingerechnet, weil eine Kennzahl analog den Angaben im MINERGIE-Nachweis gewünscht war.

Der Systemnutzungsgrad umfasst alle Heizenergien die den Wohnungen für Heizzwecke zugeführt werden dividiert durch Stromaufwand Kompaktgerät und Zusatzheizungen. Die Berechnungen lauten wie folgt: (Detaillierte Definitionen zu den Termen im Anhang).

Wärmeerzeugungsnutzungsgrad:

$$WNG_{KG-WP} = \frac{Q_w + Q_{h-WP} + Q_{hr}}{E_{KG-WP}}$$

(Nutzwärme für WW+Heizung (ohne EWT+ohne WRG)+Wärmeverluste gegen Umgebung zu aufgewendeter Energie für Solar+WP+Elektroheizung+Nebenaggregate)

Q_w	Nutzenergie Warmwasser
Q_{h-WP}	Nutzenergie Heizung, Kriterium für Heizfall: $t_{ZUL} > t_{ABL}$
Q_{hr}	Wärmeverluste Kompaktgerät gegen Umgebung (Prüfstandsgrösse, fixer Wert, nur im Winterhalbjahr eingerechnet)
E_{KG-WP}	el. Energiebezug Kompaktlüftungsgerät ohne Strom für Lüftung (ER 501)

Systemnutzungsgrad:

$$SNG = \frac{Q_w + Q_v + Q_{hr} + Q_{ZH}}{E_{KG} + E_{ZH}} \text{ oder } SNG_{\text{ohne ext. Zusatzheizung}} = SNG = \frac{Q_w + Q_v + Q_{hr}}{E_{KG}}$$

(Nutzwärme für WW+Heizung+Lüftung mit WRG (inkl. EWT)+Wärmeverluste gegen Umgebung zu aufgewendeter Energie für Solar+WP+Lüftung+Elektroheizung+Nebenaggregate+Zusatzheizung)

Q_w	Nutzenergie Warmwasser
Q_v	Nutzenergie Heizung, Lüftung mit WRG inkl. EWT
Q_{hr}	Wärmeverluste Kompaktgerät gegen Umgebung
Q_{ZH}	Nutzenergie Zusatzheizung (z.B. Elektroöfen, Holzöfen)
E_{ZH}	el. Energiebezug Zusatzheizung
E_{KG}	el. Energiebezug Kompaktlüftungsgerät (ER 601)

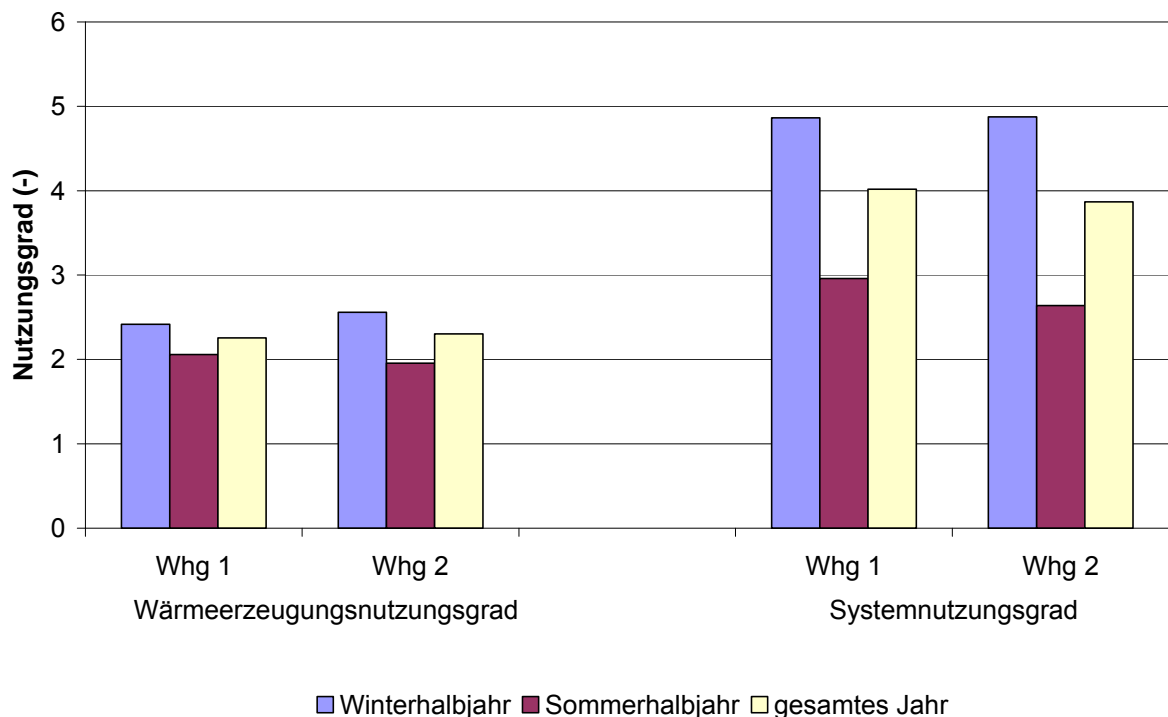


Abbildung 7.8 Wärmeerzeugungsnutzungsgrade und Systemnutzungsgrade (aber ohne externe Zusatzheizung) der verschiedenen Wohnungen von Objekt 3. (Winterhalbjahr: 11. Februar 2008 bis 31. März 2008 und 1. Oktober 2008 bis 10. Februar 2009; Sommerhalbjahr: 1. April 2008 bis 30. September 2008)

Die genaueren Berechnungen sind im Anhang erläutert.

Die berechneten Nutzungsgrade sind in einem ähnlichen Bereich wie die Prüfstandsmessungen, welche durch das Passivhaus Institut in Darmstadt durchgeführt wurden.

7.2.4 Energiekosten

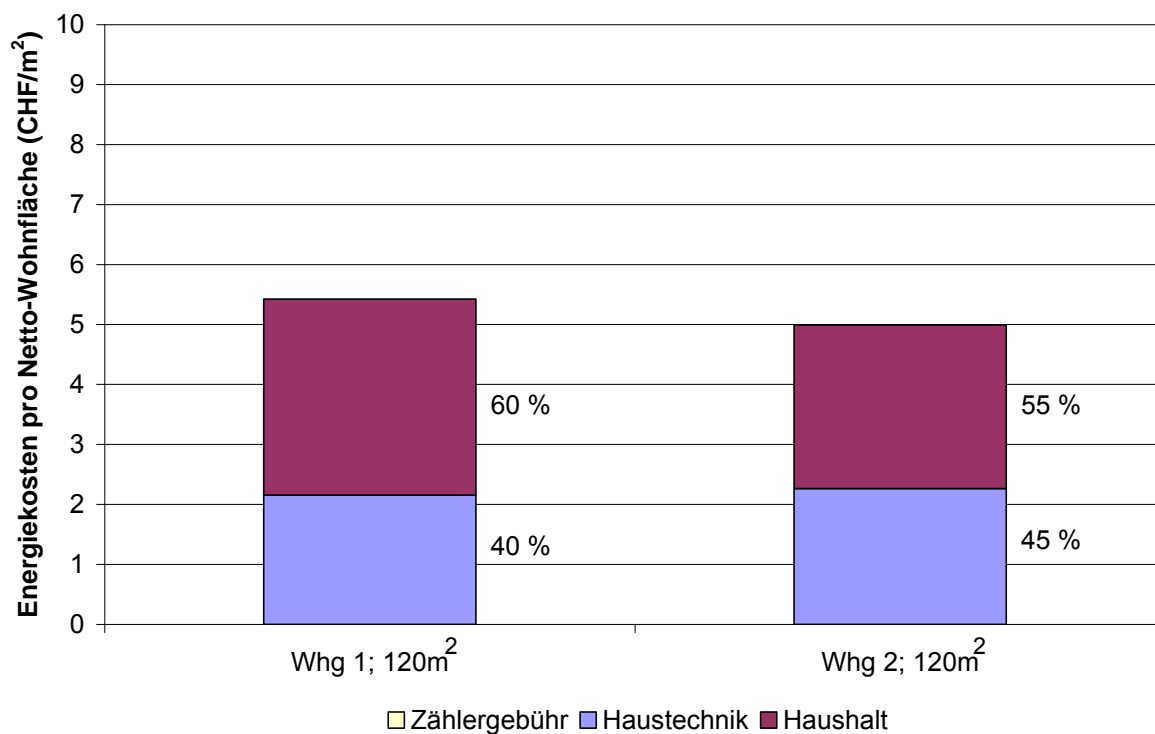


Abbildung 7.9 Spezifische Energiekosten pro m² Netto-Wohnfläche für ein gesamtes Jahr in den beiden Wohnungen von Objekt 3
Messperiode: 11. Februar 2008 bis 10. Februar 2009

Die totalen Energiekosten sind im erwarteten Bereich. Die jährlichen Kosten für die Kompaktgeräte betragen CHF 259.- für Wohnung 1 und CHF 272.- für Wohnung 2. 61 % (Whg 1) und 58 % (Whg2) der gesamten Energiekosten (Zählergebühr + Haustechnik + Haushalt) fallen dabei während dem Winterhalbjahr an.

Hinweise zur Energiekostenberechnung:

Die Berechnung basiert auf Zählerablesungen, die quartalsmässig erfolgten. Daraus konnte jeweils der totale mittlere monatliche Stromverbrauch eruiert werden. Anschliessend wurden die Strombezüge mit den für Objekt 3 geltenden Tarifen (inkl. Mwst) von IBC Energie Wasser Chur multipliziert. (Tarif: Frühling 08)

Hochtarif: 19.0 Rp/kWh

Niedertarif: 10.0 Rp/kWh

Keine Zählergebühr

7.3. OBJEKT 3, WOHNUNG 1

7.3.1 Komfort und Behaglichkeit (3/1)

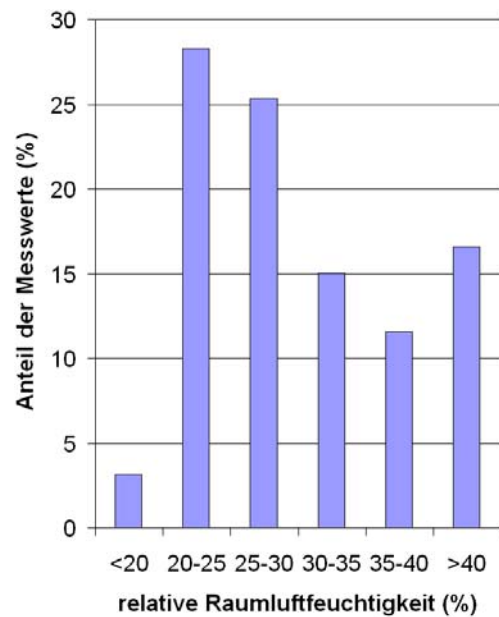
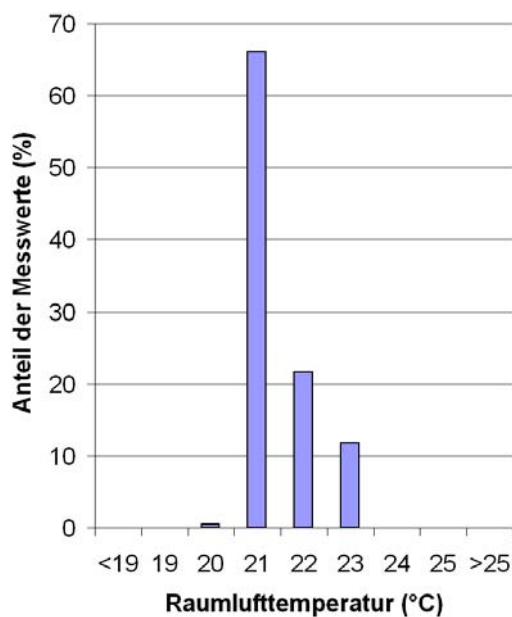


Abbildung 7.10 Häufigkeitsverteilung der Raumlufttemperatur während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 3/Wohnung 1

Abbildung 7.11 Häufigkeitsverteilung der relativen Raumluftfeuchtigkeit während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 3/Wohnung 1

Die Raumlufttemperatur ist während den letzten Wochen des Winterhalbjahres, auch bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes, stets in einem sehr angenehmen Bereich zwischen 20 und 23 °C. (Vergleich siehe Anhang). Die Schwankungen der Raumlufttemperatur sind äusserst gering. Auch im Sommerhalbjahr liegen die Werte der Raumlufttemperatur stets in einem sehr angenehmen Bereich zwischen knapp 21 und gut 25 °C.

Bezüglich der Raumluftfeuchtigkeit schneidet diese Wohnung eher schlecht ab. Insgesamt waren 56.8 % aller Messwerte unterhalb von 30 % relativer Feuchte (siehe auch Anhang). Es ist aber schwierig abzuschätzen, wie stark die Auswirkung auf den Wohnkomfort tatsächlich war, da die Raumlufttemperatur einen weitaus grösseren Einfluss hat und die relative Raumluftfeuchtigkeit nur von empfindlichen Personen als störend wahrgenommen werden kann. Weitere Überlegungen zu dieser Problematik sind in Kapitel 7.2.1 aufgeführt.

7.3.2 Energieverbrauch (3/1)

Tabelle 7.3 Vergleich der Energiekennzahlen zwischen den Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerten sowie weitere technische Informationen von Objekt 3/1

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	11.0	7.7	11.1
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	30.0	22.4	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.60	0.5	0.60
Haushaltsgeräte mit Effizienzklasse A/A ⁺	-	Ja	Nicht geprüft	Ja
Raumlufttemperatur (Winter)	°C	20	21.6	-
Warmwassertemperatur	°C	60	50.4	-
Nettowohnfläche	m ²	-	120	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	160	-
Personenbelegung	Pers	-	2	-
Zuluftvolumenstrom pro Person (Periode 1)	m ³ /(h*Pers)	-	73	30
Zuluftvolumenstrom pro Person (Periode 2)	m ³ /(h*Pers)	-	62	30

Neben dem Energiebezug des Kompaktgerätes ist während der Wintermessperiode ein Energieverbrauch in Form von 147 kWh in Form von Holz (30 kg Pellets) verzeichnet worden.

Da ein grosser Anteil des gesamten Energieverbrauchs für die Heizung des Warmwassers aufgewendet wird, wurde in beiden Wohnungen von Objekt 3 der Warmwasserbezug in Impulsen 10 Litern gemessen.

Der mittlere Warmwasserverbrauch über die gesamte Messperiode (5. Februar bis 30. März 2008) beträgt in dieser Wohnung 54.8 l/d/Pers (siehe Anhang). Damit ist er zwar etwas höher als in Wohnung 2, aber insgesamt immer noch etwas tiefer als bei der Planung angenommen wurde. (Vergleich Abbildung 7.6)

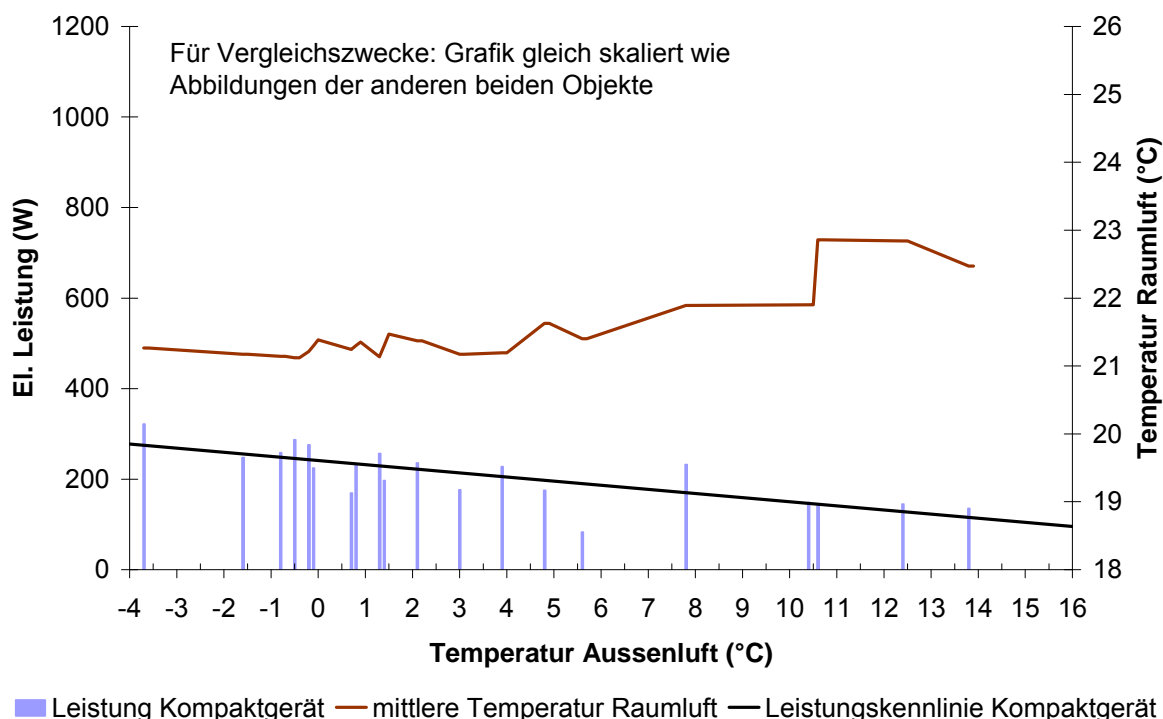


Abbildung 7.12 Leistungskennlinie des Kompaktgerätes und mittlere Raumlufttemperatur bei verschiedenen Aussenlufttemperaturen in Objekt 3/1; (Wochen 7/2008 bis 13/2008; Wochen 40/2008 bis 44/08 und Wochen 51/2008 bis 06/09)

Die Leistungskennlinie des Kompaktgerätes ist leicht fallend und insgesamt sind die Leistungen sehr tief. Da die Leistungskennlinie so flache ist, muss neben der Aussenlufttemperatur auch das Nutzungsverhalten einen erheblichen Einfluss haben. Zudem profitiert die Wohnung von passiver Sonnenheizenergie. Die Analysen der anderen Objekte bestätigen diese Annahme.

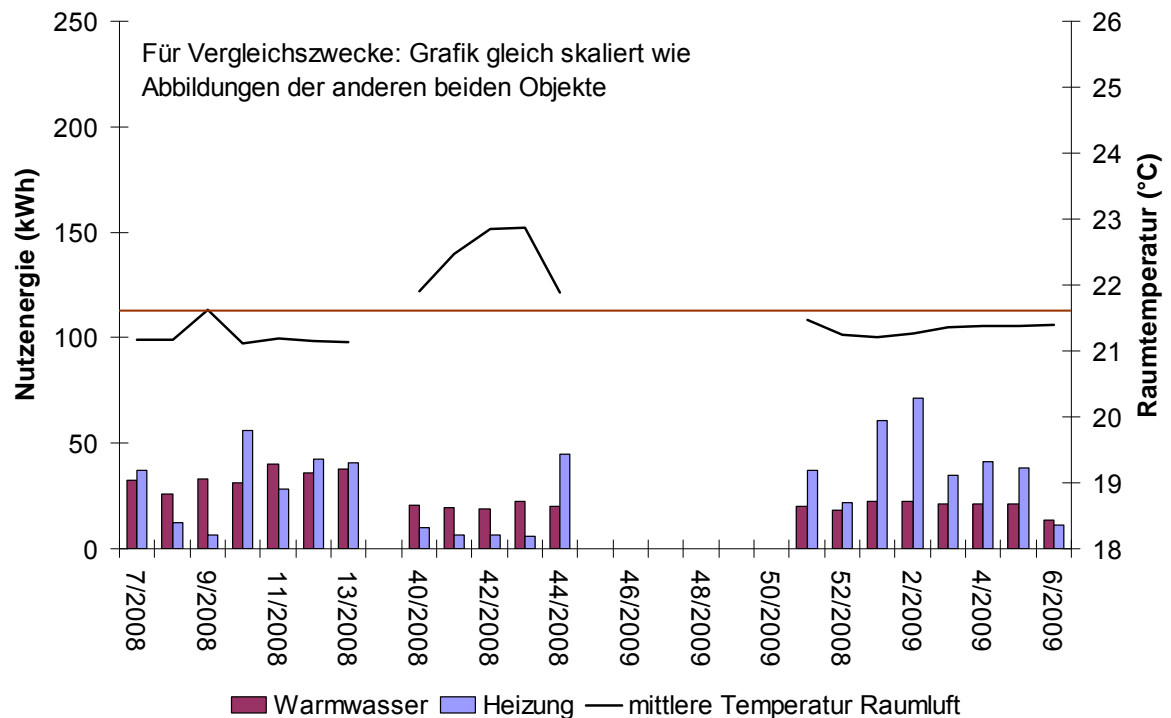


Abbildung 7.13 Nutzenergien für Warmwasser und Heizung während dem Winterhalbjahr (11. Februar 2008 bis 30. März 2008 und 1. Oktober 2008 bis 8. Februar 2009) in Objekt 3/1; braune Linie: Mittelwert der Raumtemperatur (21.6 °C).

Die Nutzenergien für die Heizung sind in dieser Wohnung sehr tief. Da die Nutzungsgrade Kompaktgerät/Wärmepumpe relativ konstant sind, die Nutzenergie für Heizung aber erheblich schwankt, muss der Energie Bezug der Wärmepumpe und Umwälzpumpe proportional zur Nutzenergie Heizung sein. Somit ist der Grundstrombedarf den das Kompaktgerät für die Steuerung und die Umwälzpumpe bezieht gering.

Weitere Energieauswertungen befinden sich in Kapitel 7.2.2.

7.4. OBJEKT 3, WOHNUNG 2

7.4.1 Komfort und Behaglichkeit (3/2)

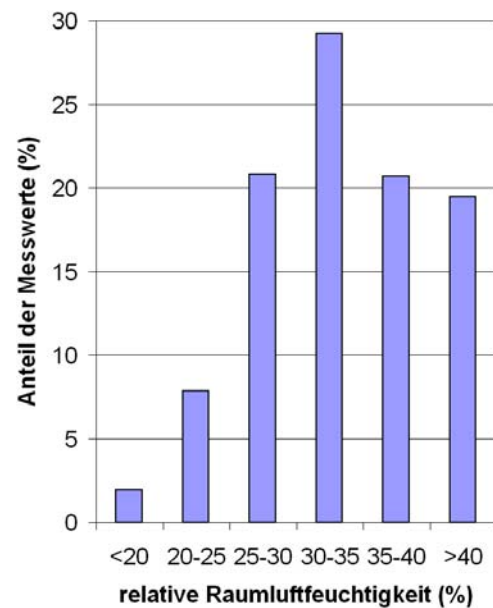
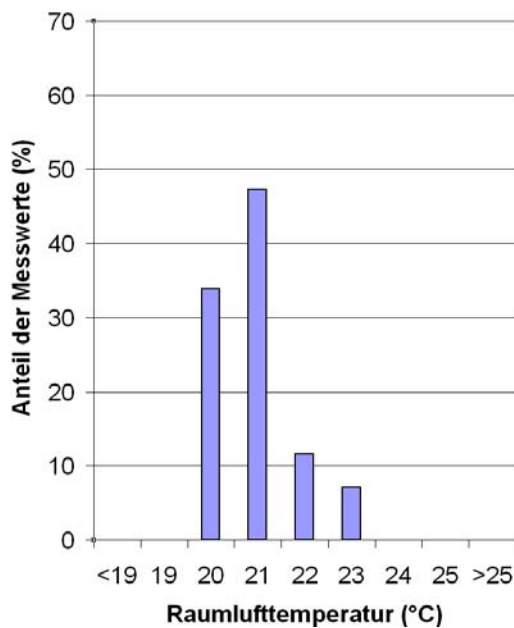


Abbildung 7.14 Häufigkeitsverteilung der Raumlufftemperatur während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 3/Wohnung 1

Abbildung 7.15 Häufigkeitsverteilung der relativen Raumlufftfeuchtigkeit während dem gesamten Winterhalbjahr in Objekt 3/Wohnung 2

Die Raumlufftemperatur ist während den letzten Wochen des Winterhalbjahres, auch bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes, stets in einem sehr angenehmen und energetisch optimalen Bereich zwischen 20 und 23 °C. Die Schwankungen der Raumlufftemperatur sind äusserst gering. Während des Sommerhalbjahres steigt die Raumlufftemperatur nie über 26 °C.

Die Werte der relativen Raumlufftfeuchtigkeit waren in dieser Wohnung etwas besser als in Wohnung 1 jedoch war das Wohnklima auch in dieser Wohnung eher trocken (vergleiche auch im Anhang). Insgesamt waren 30.6 % aller Messwerte unterhalb von 30 % relativer Raumlufftfeuchtigkeit. Es ist anzunehmen, dass diese tiefen Werte einen geringen Einfluss auf den Wohnkomfort haben, da die Raumtemperatur stets in einem sehr angenehmen Bereich lag (Siehe auch Kapitel 7.2.1).

7.4.2 Energieverbrauch (3/2)

Tabelle 7.4 Vergleich der Energiekennzahlen zwischen den Planungs-, Ist- und MINERGIE-P-Anforderungswerten sowie weitere technische Informationen von Objekt 3/2

	Einheit	Planung	Ist	Anforderung
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	11.0	10.8	11.1
Energiekennzahl Wärme	kWh/m ²	30.0	23.9	30.0
Drucktest-Ergebnis (nL50-Wert)	h ⁻¹	< 0.60	0.5	0.60
Haushaltsgeräte mit Effizienzklasse A/A ⁺	-	Ja	Nicht geprüft	Ja
Raumlufttemperatur (Winter)	°C	20	20.9	-
Warmwassertemperatur	°C	60	53.2	-
Nettowohnfläche	m ²	-	120	-
Energiebezugsfläche EBF	m ²	-	160	-
Personenbelegung	Pers	-	2	-
Zuluftvolumenstrom pro Person (Periode 1)	m ³ /(h*Pers)	-	78	30
Zuluftvolumenstrom pro Person (Periode 2)	m ³ /(h*Pers)	-	64	30

Neben dem Energiebezug des Kompaktgerätes sind während der gesamten Messperiode ein Energieverbrauch durch einen Elektroradiator von 1 kWh sowie 970.2 kWh durch Heizung mittels Pelletofen (Heizwert Pellet = 4.9 kWh/kg) verzeichnet worden.

Diese Wohnung weist einen niedrigen Warmwasserverbrauch auf. Der mittlere Bezug über die gesamte Messperiode (5. Februar bis 30. März) beträgt 36.2 l/d/Pers.

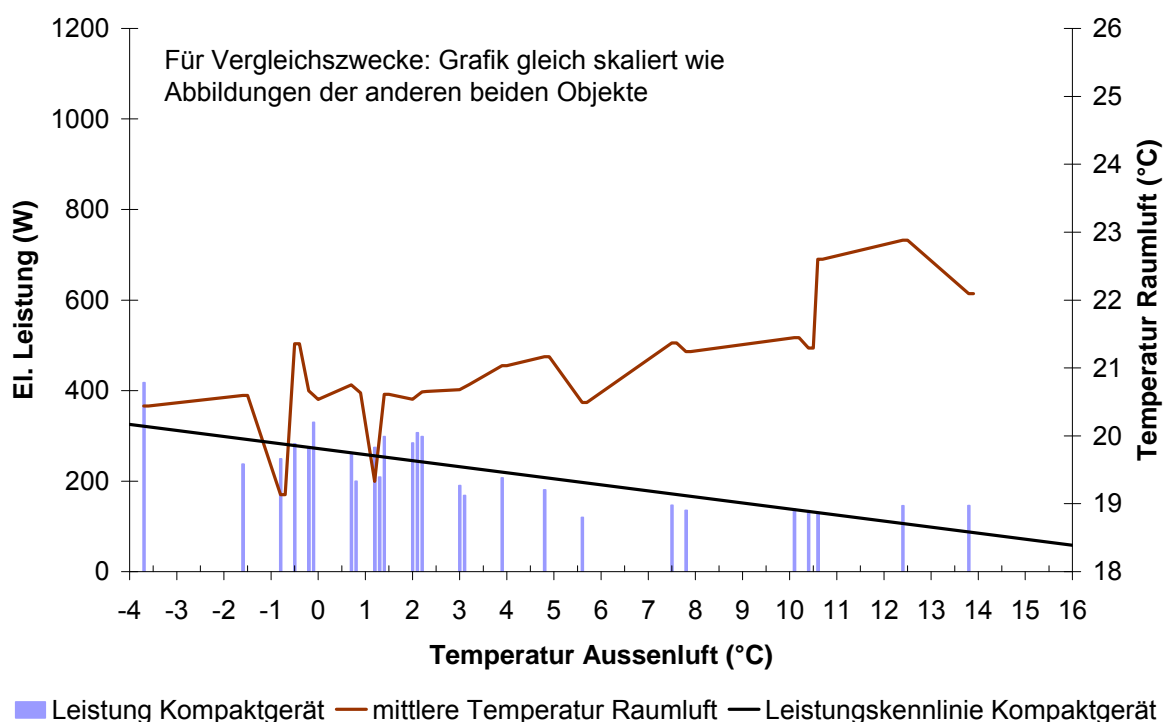


Abbildung 7.16 Leistungskennlinie des Kompaktgerätes und mittlere Raumlufttemperatur bei verschiedenen Aussenlufttemperaturen in Objekt 3/2; (Wochen 7/2008 bis 13/2008; Wochen 40/2008 bis 44/08 und Wochen 51/2008 bis 06/09)

Die elektrische Leistung dieses Kompaktgerätes ist allgemein sehr tief. Die Leistungskennlinie sinkt tendenziell wie erwartet mit steigenden Aussenlufttemperaturen. Da aber bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt ebenfalls relativ hohe Leistungen des Kompaktgerätes gemessen wurden, muss davon ausgegangen werden, dass auch das Nutzungsverhalten einen erheblichen Einfluss auf die Leistung

des Kompaktgerätes hat. Ausserdem muss auch die Erwärmung durch die passive Sonnenheizenergie beachtet werden. Mehr zu diesem Thema ist unter den entsprechenden Energieverbrauchsanalysen der anderen Objekte aufgeführt.

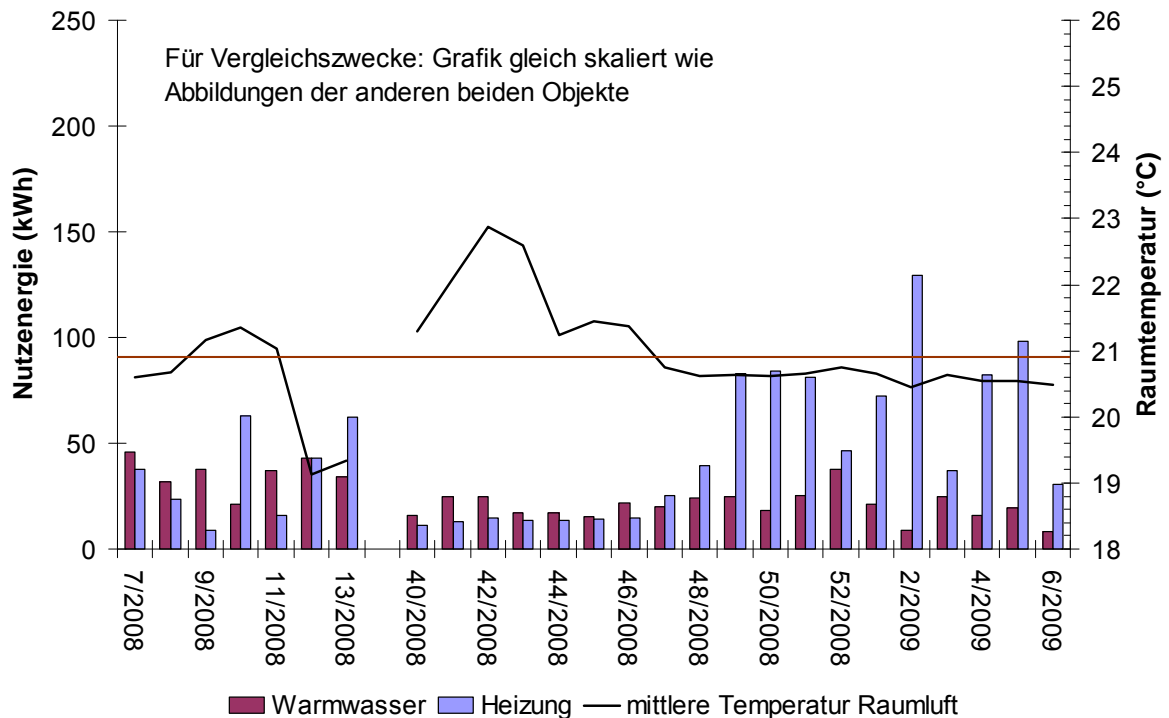


Abbildung 7.17 Nutzenenergien für Warmwasser und Heizung während dem Winterhalbjahr (11. Februar 2008 bis 30. März 2008 und 1. Oktober 2008 bis 8. Februar 2009) in Objekt 3/2; braune Linie: Mittelwert der Raumtemperatur (20,9 °C).

In dieser Wohnung ist die mittlere Raumlufttemperatur knapp 1 °C tiefer als in Wohnung 3/1. Die Wirkungsgrade sind in Wohnung 3/2 etwas höher. Dies weist also ebenfalls darauf hin, dass die mittlere Raumlufttemperatur einen erheblichen Einfluss auf die Nutzungsgrade hat. (Vergleich Kapitel 5.4.2 und 5.5.2)

Weitere Energieauswertungen befinden sich in Kapitel 7.2.2.

7.5. OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN

Obwohl die relative Raumluftfeuchtigkeit einen geringen Einfluss auf das Wohnklima hat, muss zur Kenntnis genommen werden, dass das Wohnklima während der beobachteten Zeit in beiden Wohnungen ziemlich trocken war. Ausschlaggebend dafür ist das Verhältnis Luftmenge zu Feuchtelast. Die Feuchtelast korreliert mit der Personenanzahl. Die Anlage wurde für den Betrieb bei einer Nutzung von vier Personen ausgelegt. Während der Messperiode wurden die Wohnungen aber nur von je zwei Personen genutzt. Somit muss die Luftmenge angepasst werden. Da die Programmierung der reduzierten Lüfterstufe von der Wärmepumpe überstimmt wird, kann die Luftmenge nur reduziert werden, wenn die Wärmepumpe nicht läuft. Die Analyse der Messdaten zeigt aber, dass auch während kalten Tagen die Wärmepumpe nicht durchgehend in Betrieb ist, und somit die Reduktion der Luftmenge möglich wäre. Eine automatische Reduktion der Lüfterleistung bei tiefer Feuchtigkeit wäre sehr wünschenswert.

Der Stillstand oder Standby-Verlust ist unnötig hoch. Die Wasserbehälter sollten vor allem besser wärmeisoliert und die Anschlüsse bezüglich Abkühlung optimiert werden. Heute gibt es neues Wärmeisoliermaterial auf Aerogel-Basis ($\lambda = 0.013 \text{ W/m}^2/\text{K}$), welches doppelt so gut isoliert wie PU-Schaum.

8. Literaturverzeichnis

- Afjei, T., Calculation method for the seasonal performance of heat pump compact units and validation, University of Applied Sciences Northwestern Switzerland, University of Applied Sciences Lucerne HTA, in charge of Swiss Federal Office of Energy, 2007
- Afjei, T., Wemhöner, C., Dott, R., Huber, H., Keller, P., A generic calculation scheme to estimate seasonal performance of combined systems and experimental results, Institute of Energy University of Applied Sciences Basel, HVAC Laboratory University of Applied Sciences Lucerne, 2006
- Balzer Ingenieure AG, MINERGIE-P Mehrfamilienhaus, Chur, 2007, www.balzer-ingenieure.ch
- Binz, A., MINERGIE-P MFH Eichgut Winterthur - Die Gebäudehülle als Erfolgsfaktor für MINERGIE-P-Bauten, 2007, www.minergie.ch
- Bühning, A., Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Lüftungs-Kompaktgeräten mit integrierter Kompressionswärmepumpe, technische Universität Hamburg-Harburg, 2001
- Erb, M., Feldanalyse von kondensierenden Gas- und Ölfeuerungsanlagen im Sanierungsbereich – FAGO, Dr. Eicher+Pauli AG, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 2004
- Geschäftsstelle MINERGIE, MINERGIE-P Mehrfamilienhaus Eichgut in Winterthur, 2006
- Hässig, W., Warum nach MINERGIE-P bauen? - Erste Erfahrungen eines Planers und Bauherren am gebauten Beispiel, 2006
- Huber, A., Widmer, P., Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser - Technisches Handbuch: Grundlagen, Planungsvorgehen und Praxisbeispiele, Fachhochschule bei der Basel (FHBB), im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 2000
- Kaufmann, B., Prüfbericht zur Zertifizierung einer für Passivhäuser geeigneten Komponente: Wärmepumpenkompaktgerät, Hersteller: Drexel & Weiss, Typ/Bezeichnung: aerosmart m, Passivhaus Institut Darmstadt, 2009
- Menti, U.-P., Tschui, A., Schnyder, P., MINERGIE-P und Passivhaus, Luftheizung und andere Wärmeverteilsysteme, Hochschule für Technik + Architektur Luzern, 2006
- Nilan AG, Energetische Revolution in Richtung Minergie P - mit 90 Stück dezentralen Nilan VP18-10P die für Lüftung, Luftheizung und BWW-Produktion sorgen, www.nilan.ch