

**Solar-Passivhaus „Wohnen & Arbeiten“
Freiburg, Vauban**

Förderung durch die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Förderkennzeichen: 12333

Schlussbericht: TOS-1-0103-VK-02

Auftraggeber: Wohnen & Arbeiten GbRmbH,
Freiburg

Auftragnehmer: Fraunhofer ISE
Freiburg

Freiburg, den 30. März 2001

Bearbeitet in Zusammenarbeit mit:

solares bauen GmbH
Langemarckstr. 112
79100 Freiburg

Dieser Bericht umfasst 42 Seiten, zzgl. Anhang A bis E.

Fraunhofer ISE, Gruppe Solares Bauen

Freiburg, den 30. März 2001

Dr. Volker Wittwer
Leiter der Abteilung
Thermische und Optische Systeme

Dr. Karsten Voss
Leiter der Gruppe
Solares Bauen

Inhalt

1	Zusammenfassung und Empfehlungen	1
2	Zielsetzung des Forschungsvorhabens.....	4
2.1	Die Zielvorgaben.....	4
2.2	Die Energiesparmaßnahmen im Überblick.....	4
2.3	Vergleich mit dem Solarhaus Gundelfingen	7
2.4	Ökologisches Sanitärkonzept.....	8
3	Kenndaten des Passivhaus - Wohnen & Arbeiten	10
3.1	Gebäudekenndaten	10
3.2	Kenndaten der Anlagentechnik	11
4	Energieverbrauch	12
4.1	Elektrische Energie.....	12
4.1.1	Biogas, belüfteter Sandfilter und Vakuumanlage.....	12
4.1.2	Haushaltsstrombedarf	13
4.1.3	Elektrischer Energiebedarf Haustechnik	14
4.1.4	Allgemeinstrom für Beleuchtung	15
4.1.5	Energiebilanz Strom.....	15
4.2	Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser	16
4.2.1	Heizenergieverbrauch	16
4.2.2	Wärmeverbrauch zur Warmwasserbereitung	16
4.2.3	Biogasanlage	16
4.2.4	Wärmeverteilverluste	16
4.3	Wärmeversorgung	18
4.3.1	Thermische Solaranlage	18
4.3.2	BHKW	18
4.3.3	Abgaswärmetaucher	18
4.4	Primärenergieverbrauch des gesamten Bauvorhabens	18
4.5	Energiebilanz (Zusammenfassung)	20
5	Betriebserfahrungen	23
5.1	Heizungsanlage	23

5.2	Wärmebedarf	23
5.3	Lüftungsanlage.....	23
5.3.1	Betrieb	23
5.3.2	Nutzerakzeptanz.....	24
5.3.3	Einregulierung	25
5.4	Hinweise zur Planung.....	25
5.5	Luftdichtigkeit	26
5.6	Thermische Solaranlage	26
5.7	Fotovoltaikanlage	27
5.8	Vakuumsystem und Vakuumleitung	28
5.9	BHKW	29
5.10	Schallschutz.....	30
5.11	Raumluftklima (Lüftung)	30
5.12	Sommerliches Raumklima.....	30
5.13	Tageslicht	31
5.14	Verkehr	31
6	Vergleich Planung – Istzustand	33
7	Energiekonzepte im Vergleich: Solarhaus Gundelfingen – Passivhaus Wohnen & Arbeiten.....	36
7.1	Gebäudekonzept	36
8	Entwicklungspotenziale & Forschungsaktivitäten	40
8.1	Objektbezogene Maßnahmen	40
8.2	Entwicklungsaufgaben für Nachfolgeprojekte	41
	Anhang.....	I

1 Zusammenfassung und Empfehlungen

Das Mehrfamilienhaus „Wohnen & Arbeiten“ im Freiburger Konversionsgebiet „Vauban“ entstand mit der Zielrichtung in den Bereichen Heizung, Warmwasser und Elektrizität (inkl. Haushaltsgeräte) eine CO₂-Einsparung von 80% gegenüber dem heute üblichen Neubaustandard zu erreichen. Dabei sollten die investiven Mehrkosten pro Quadratmeter Wohnfläche nicht mehr als 300 DM betragen. Mit seiner Fertigstellung 1998 ist das Gebäude das erste Passivhaus des Geschosswohnungsbaus und übernimmt damit eine Pilotfunktion.

Konzeption und Begleitforschung des Vorhabens wurden im Rahmen des Förderprojektes Nr. 12333 „Zukunftsfähiges Arbeiten und Wohnen - Energetische Optimierung eines viergeschossigen Wohn- und Bürogebäudes“ von Seiten der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU unterstützt. Dadurch konnten Detaillösungen, Wirtschaftlichkeits- und Kostenbetrachtungen detailliert bearbeitet werden.

Die Ergebnisse des Planungsprozesses wurden im Rahmen des Zwischenberichtes vom November 98 bereits vorgestellt¹. Im hier vorliegenden Endbericht werden die Ergebnisse der Bauausführungsphase erste Betriebsergebnisse zusammengefasst.

Das Mehrfamilienhaus Wohnen & Arbeiten erreichte in den ersten beiden Betriebsjahren eine CO₂-Einsparung von 77% im Vergleich zu einem typischen Neubauvorhaben vergleichbarer Nutzung. Aufgeteilt nach den Verbrauchssektoren wurden folgende CO₂-Einsparungen erzielt:

- Raumwärme 96%,
- Warmwasser 89% und
- Elektrizität 50%.

Die Einsparungen im Bereich Wärme (Raumwärme & Warmwasser) wurden durch folgende Maßnahmen erzielt:

- hoher Wärmeschutz in Verbindung mit einer zentralen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung entsprechend den Anforderungen an ein Passivhaus,
- thermische Solaranlage zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung,
- Klein-BHKW inkl. Abgaswärmetauscher,
- hoher Wärmeschutz bei der Wärmeverteilung.

¹ TOS-1-9804-UfH-E06.2

Im Bereich Elektrizität wurden folgende Maßnahmen realisiert:

- Einsatz energiesparender Haushaltsgeräte bei Neuanschaffung.
- Information der Bewohner über Stromsparmöglichkeiten.
- Gemeinsamer Wasch- und Trockenraum inkl. Gemeinschaftswaschmaschinen mit Warmwasseranschluss im warmen Kellerbereich.
- Gemeinsame Gefriergeräte im kalten Kellerbereich.
- Warmwasseranschluss für Geschirrspüler in den einzelnen Wohnungen.
- Gasversorgung je Wohneinheit zu Kochzwecken.

Sehr gut bewährt haben sich:

- Der hohe Wärmeschutz sowie die Lüftungsanlage. Beides zusammen bildet die Basis des geringen Wärmeverbrauchs sowie des angenehmen Raumklimas.
- Das eingesetzte Klein-BHKW (thermische Leistung 14,5 kW), welches nun seit 2 Jahren ohne Störung läuft und in Verbindung mit dem Pufferspeicher als alleiniger Wärmeversorger ausreicht.
- Die eingesetzten Solarsysteme, die wesentlich zur Energieversorgung beigetragen haben.
- Die Gemeinschaftseinrichtungen zum Waschen, Trocknen und Kühlen, die neben der Einsparung auch zur Kommunikation beitragen.

Entwicklungspotenziale bestehen insbesondere bei:

- Den Investitionskosten: Durch Fortschreibung des hier realisierten Konzeptes können die Investitionsmehrkosten weiter reduziert werden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass ein Nachfolgeprojekt bereits zu Mehrkosten von lediglich 200 DM/m² realisiert werden könnte.
- Der Konzeption und Umsetzung des Lüftungssystems: Entwicklungsbedarf bezieht sich auf die Zentraleinheiten (Dichtheit der Geräte gegen interne Leckage) sowie auf die Gewährleistung einer ausgewogenen Massenstrombilanz je Wohneinheit. Hierzu sind Systemalternativen zu entwickeln und in der Praxis vergleichend zu evaluieren.
- Der weiteren Senkung von Standby-Verbrauchern im Bereich Haustechnik und Haushalte.
- Der Reduktion von Wärmeverteilverlusten. Diese dominieren den Wärmeverbrauch, obwohl die Wärmeverteilsysteme bereits sehr gut wärmege-dämmt wurden.
- Der Stillstandssicherheit von thermischen Solarsystemen.

Abschließend möchten wir an dieser Stelle der DBU für die gute Unterstützung danken. Nur hierdurch war es möglich die vorliegenden Ergebnisse zu erzielen und zu verbreiten. Die große Resonanz in der Öffentlichkeit (siehe hierzu den Pressespiegel im Anhang) sowie die hohe Anzahl von Besuchergruppen (bislang ca. 1.500 Personen) aus dem In- und Ausland, zeigen welchen Stellenwert solche Projekte für die weitere Entwicklung des Klimaschutzes haben.

2 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

2.1 Die Zielvorgaben

Die wesentlichen Zielvorgaben des Forschungsvorhabens lauten wie folgt:

- Reduktion der klimarelevanten Emissionen (CO₂-Äquivalente) bei Raumwärme, Warmwasser und elektrischer Energie um mehr als 80 % im Vergleich zu einem konventionellen Neubauvorhaben. Als konventionelles Neubauvorhaben gilt ein Haus mit gleichem A/V-Verhältnis, welches alle Anforderungen der derzeitigen Gesetzgebung (Wärmeschutzverordnung, Heizungsanlagenverordnung, etc.) erfüllt.
- Reduktion der verkehrsbedingten Emissionen um mehr als 50%.
- Begrenzung der Mehrkosten für alle Maßnahmen auf weniger als 300 DM pro Quadratmeter Wohnfläche.

2.2 Die Energiesparmaßnahmen im Überblick

Hoher baulicher Wärmeschutz in Verbindung mit einem effizienten Lüftungssystem.

Im Bereich des baulichen Wärmeschutzes wurde der „Passivhausstandard“ mit einem Jahresheizenergiebedarf von unter 15 kWh/m²a angestrebt. Neben dem hohen Wärmeschutz wurde hierzu ein zentrales Lüftungssystem mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von 82% eingesetzt.

Haustechnik & Wärmeversorgung

Im Bereich Haustechnik wurde darauf geachtet, dass Zirkulations- und Bereitstellungsverluste minimiert werden. Hierzu wurden die Rohre mit wärmege-dämmten Rohrbefestigungen ausgeführt. Weiterhin wurden die Dämmstärken doppelt so hoch als nach Heizungsanlagenverordnung erforderlich ausgeführt. Weiterhin wurden Leitungswege minimiert.

Eine thermische Solaranlage dient zur Unterstützung von Heizung und Warmwasserbereitung.

Mit Hilfe eines Klein-Blockheizkraftwerkes, welches als alleiniger Wärmeerzeuger dient, wird Wärme aus Kraft-Wärmekopplung bereitgestellt.

Elektrische Energieversorgung

Es werden soweit als möglich energiesparende Haushaltsgeräte angeschafft. Die Bewohner werden über Möglichkeiten zur Einsparung des Haushaltsstromverbrauches informiert. Weiterhin erhalten Wasch- und Geschirrspülmaschine Anschluss an die Warmwasserversorgung. Um den Energiebedarf zum Trocknen von Wäsche zu minimieren wird neben dem Haustechnikraum ein

Trocken- und Waschmaschinenraum eingerichtet. Weiterhin werden Gefriergeräte im kalten Keller untergebracht und gemeinsam genutzt.

Vergleich von „Standard“ und Zielvorgaben

Die nachfolgende Bilanzierung der klimarelevanten Emissionen verdeutlicht, dass bei Ausführung des Bauvorhabens nach den Vorgaben der gültigen WSVÖ'95 der elektrische Energiebedarf² mit ca. 41% (inkl. Kochen) bereits ähnliche Klimaemissionen verursacht wie der Energiebedarf für Raumwärme. Selbst der Wärmebedarf für Brauchwasser beträgt bei Mehrfamilienhäusern bereits 1/3 des Raumwärmebedarfs.

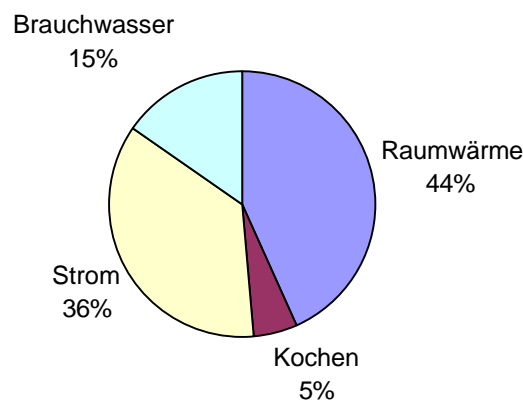


Abb. 1 Anteilige Klimagasemissionen bei einem 4-Personen-Haushalt und Bauvorhaben nach WSVÖ 94/95

Diese Tendenz wird noch deutlich verstärkt, wenn, wie vorgesehenen, Wärmedämmstandard und Lüftungstechnik wesentlich verbessert werden. Der Elektrizitätsbedarf verursacht dann (inkl. elektrischem Kochen) annähernd zwei Drittel aller Klimagasemissionen. Der Wärmebedarf für Brauchwasser beträgt das Doppelte des Wärmebedarfs für Raumheizung.

² Stromverbrauch eines durchschnittlichen 4-Personen-Haushaltes nach Faist, W.; Das Niedrigenergiehaus, 4. Aufl. Heidelberg 1997

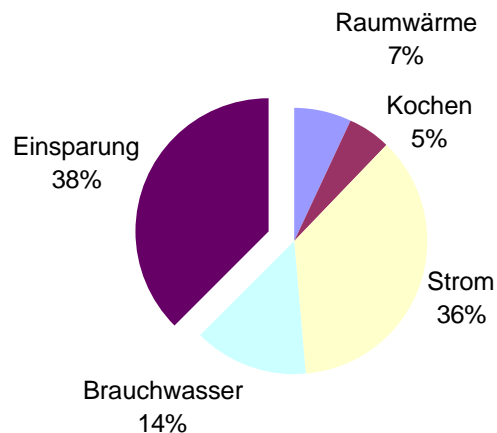


Abb. 2 Anteilige Klimagasemissionen beim typischen 4-Personen-Haushalt und Baustandard „Passiv-Haus“.

Um Klimagasemissionen maßgeblich zu reduzieren war daher eine integrale Energieplanung erforderlich, die den Bereichen elektrische Energie und Brauchwasserbereitung ebensoviel Beachtung schenkte wie dem Bereich der Raumwärme.

Um den Zielkennwert von 80% CO₂-Reduktion zu erreichen, mussten in den einzelnen Bereichen folgende Vorgaben erreicht werden:

- 93% Reduktion im Bereich Raumwärme
- 82% Reduktion im Bereich Warmwasser
- 67% Reduktion bei Haushaltsstrom- und Allgemeinstromverbrauch

Maßnahmen im Bereich Mobilität

- Innerhalb des Projektes wurde besonderer Wert auf die Nutzungsmischung gelegt. Von den insgesamt 19 Einheiten sind 4 Einheiten als Büros ausgeführt. Die durchschnittliche Entfernung von Wohnung und Arbeitsplatz beschränkt sich damit auf ein Minimum.
- Es wurde angestrebt möglichst viele Bewohner zur Nutzung von Car Sharing zu bewegen. Das Bauvorhaben verfügt über insgesamt nur 3 Besucherstellplätze.

2.3 Vergleich mit dem Solarhaus Gundelfingen

Ein weiteres Anliegen war es, das Bauvorhaben mit dem Solarhaus Gundelfingen zu vergleichen. Das Solarhaus Gundelfingen mit einer Wohnfläche von 1.000m² ist ebenfalls ein energetisch optimiertes Mehrfamilienhaus. Es wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens des BMBF³ von der W94 Baugesellschaft mit Unterstützung des Fraunhofer ISE konzipiert und 1998 fertig gestellt. In den Jahren 1999 und 2000 wurde das Bauvorhaben wissenschaftlich und messtechnisch intensiv begleitet. Ein Schlussbericht liegt ebenfalls vor⁴.

Beiden Projekten gemeinsam ist, dass unter der Vorgabe eines Einsparziels, bei gleichzeitiger Begrenzung der Investitionsmehrkosten, eine sinnvolle Abwägung zwischen Energieeffizienz und Solarenergienutzung gefordert war. Die Kostenermittlung erfolgte auf der Basis realer Ausschreibungsergebnisse. Die Ermittlung der Energieeinsparung erfolgte mit Hilfe statischer und dynamischer Rechenverfahren.

Das Solarhaus Gundelfingen unterscheidet sich vom Passivhaus - Wohnen & Arbeiten im wesentlichen durch das realisierte Lüftungskonzept sowie durch den hohen Anteil passiver Solarenergienutzung.

Das Konzept des Solarhaus Gundelfingen hat zum Ziel, durch Einsatz von passiven und aktiven Solarsystemen den Jahresheizwärmebedarf ohne Einsatz einer Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung auf unter 30 kWh/m²a zu senken. Auffallendes Merkmal der Gebäudekonzeption ist die 80 m² umfassende transparent wärmegeämmte Südfassade (TWD).

³ Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie.

⁴ Solarhaus Gundelfingen – Schlussbericht, W94 Baugesellschaft, Dezember 2000



Abb. 3: Solarhaus Gundelfingen: Erstbezug im Juli '98, Architektur: Planerwerkstatt D. Hölken, 79279 Vörstetten; Bauherr: W 94, 79100 Freiburg; Energiekonzept: Fraunhofer ISE

2.4 Ökologisches Sanitärkonzept

Die Gebäudekonzeption wird ergänzt durch ein neues ökologisches Sanitärkonzept. Hierbei wird das anfallende Schwarzwasser mittels wassersparender Vakuumtechnologie erfasst und in einen Biogasbehälter befördert. Das entstehende Biogas soll zum Kochen verwendet werden. Es trägt damit zur Minimierung der CO₂-äquivalenten Emissionen bei. Die Beheizung des Biogasreaktors erfolgt vorrangig durch regenerative Wärmequellen.

Das ökologische Sanitärkonzept wird ebenfalls im Rahmen einer DBU-Förderung realisiert. Das Förderkennzeichen lautet: „Ökologisches Sanitärkonzept für Wohn- und Bürogebäude, Bewilligungsbescheid 7.11.97, Förderkennzeichen 08891.“

Nachfolgende Abbildung zeigt das Funktionsprinzip des Sanitärsystems.

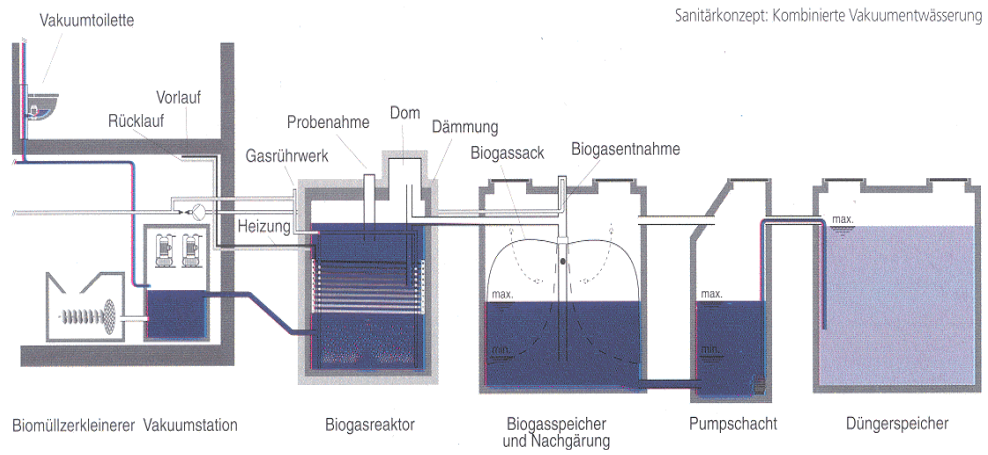


Abb. 4: Ökologisches Sanitärkonzept

3 Kenndaten des Passivhaus - Wohnen & Arbeiten

3.1 Gebäudekenndaten

Tab. 1 Gebäudekenndaten

Wohn- und Nutzfläche innerhalb der thermischen Hülle (Energiebezugsfläche)	1.428 m ²
Anzahl Wohn- bzw. Nutzeinheiten	15 WE + 4 Büros
Anzahl der Personen	36 + 8 in Büros
Energiekennzahl nach LEG-PH Passivhausrechenverfahren Freiburg ⁵	12,9 kWh/m ² a

Weitere Kenndaten zum Wärmeschutz des Bauvorhabens sind dem Anhang A dieses Berichtes zu entnehmen. In Anhang B befinden sich unmaßstäbliche Ansichten sowie der Lageplan.



Abb. 5: Das Passivhaus - Wohnen & Arbeiten im September 2000

⁵ Leitfaden Energiebewusste Gebäudeplanung, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt Oktober 1995 und Ingenieurbüro ebök Tübingen 1997

3.2 Kenndaten der Anlagentechnik

Tab. 2 Kenndaten der Anlagentechnik

Fotovoltaikanlage	Typ: Sonderanfertigung in Sicherheitsglas 3,2 kW peak, 60m ² Bruttofläche südorientiert (-20° Azimut) Neigung 15° Wechselrichter SMA-„sunnyboy“ 2,5 kW
Solarkollektor (Flachkollektor)	Typ Paradigma: 2 x Solar 500, 4 x Solar 750 Aperturfläche 39,6 m ² südorientiert (-20° Azimut) Neigung 45°
BHKW (Erdgas)	Typ: Snertec G 5,5 12,5 kW th. / 5,5 kW el.
Abgaswärmetauscher	Typ: Bomat AWR 228S 2 kW
Pufferspeicher	1.500 l Schichtenspeicher (Solvis Strato) 1.700 l Pufferspeicher (Feuron)
Lüftungszentralgerät	Typ: Menerga Trisolair 52.16.01 (Gegenstrom-Kreuz- Gegenstrom-Wärmetauscher) Elektrische Leistungsaufnahme bei 1.500m ³ /h und 80 Pascal externem Druckverlust: Abluft: 250 W, Zuluft 350 W

Prinzipskizzen und Schemata zur realisierten Technik sind Anhang C zu entnehmen.

4 Energieverbrauch

Das Passivhaus - Wohnen & Arbeiten wurde im Rahmen der Förderung insbesondere während der Konzeptions- und Planungsphase gefördert. Eine Förderung während der anschließenden Nutzungsphase erfolgte nicht. Es stand daher nur eine sehr eingeschränkte Messtechnik zur Verfügung.

Weiterhin musste eine zeitliche Abgrenzung der Messdaten vorgenommen werden, da einige bauliche Maßnahmen erst sehr spät fertig gestellt wurden. So wurden die thermische Solaranlage sowie die Dämmarbeiten an Armaturen und Leitungen erst im November 1999 abgeschlossen. Die Photovoltaikanlage wurde sogar erst im April 2000 installiert. Die vorliegenden Messwerte wurden daher im Bereich thermische Solarenergie und Photovoltaik durch Hochrechnungen ergänzt. Weitere Hinweise hierzu erfolgen an den jeweils eingefügten Tabellen.

4.1 Elektrische Energie

Im Bereich elektrische Energie bestand die Anforderung einer Reduktion des elektrischen Energiebedarfs um 67% auf ca. 400 kWh pro Person.

4.1.1 Biogas, belüfteter Sandfilter und Vakuumanlage

Tab. 3 Strombedarfsmesswerte ökologische Sanitärtechnik

Stromverbrauch	
Biogasanlage, belüfteter Sandfilter, Vakuumanlage ⁶	2.434 kWh/a

Die Vakuumentwässerung ist kein notwendiger Bestandteil des Energiekonzeptes. Deshalb wurde deren elektrischer Energiebedarf separat ermittelt und bei den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt. Durch die Vakuumentwässerung wurde ein erheblicher Anteil an Frischwasser eingespart. Im Rahmen des ebenfalls von der DBU unterstützten Fördervorhabens „Ökologisches Sanitärkonzept für Wohn- und Bürogebäude, Bewilligungsbescheid 7.11.97, Förderkennzeichen 08891.“ ist eine detaillierte Ökobilanzierung hierzu vorgesehen.

⁶ Biogasanlage war im Messzeitraum noch nicht in Betrieb

4.1.2 Haushaltsstrombedarf

Im Bereich des Haushaltsstrombedarfs sollte ein Zielkennwert von 400 kWh pro Person erreicht werden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 53% gegenüber einem Durchschnittshaushalt.

Tab. 4 Strombedarfsmesswerte der Haushalte und Büros inkl. Gemeinschaftswaschmaschinen- und Gemeinschaftsgefriertruhenverbrauch.

	Anzahl	Durchschnitt	Geringster Verbrauch	Höchster Verbrauch	Durchschnitt pro Person
1-Personen Haushalte	5 ⁷	699	406	1.025	699
2-Personen Haushalte	2	1.573	1.122	2.024	787
3-Personen Haushalte	5	1.357	1.116	1.655	452
4-Personen Haushalte	3	1.220	633	1.964	305
Alle	19	1.103	-	-	475
Büros	4	1.139	400	2.664 ⁸	570

Die angeführten Messwerte verdeutlichen, dass der Zielkennwert von 400 kWh pro Person annähernd erreicht wurde. Wobei ein Grund für die leichte Überschreitung insbesondere die hohe Anzahl von Ein- und Zweipersonenhaushalten ist.

⁷ Eine 1-Personen-Wohnung war im Messzeitraum noch nicht bezogen.

⁸ Hierbei handelt es sich um einen Verlag, der die Druckerzeugnisse selbst produziert

4.1.3 Elektrischer Energiebedarf Haustechnik

Tab. 5 Strombedarf der Haustechnik inklusive der Stand-By-Verluste errechnet über Betriebsstunden und Stromaufnahme

	Watt Stand- By	Dauer Stand-By in h/a	Verbrauch Stand-By in kWh/a)	Watt Benut- zung	Dauer Benutzung in h/a	Verbrauch inklusive Stand-By
Heizung	0	8.760	0	30	3.200	96 kWh/a
Lüftung	25	8.760	219	600	5.000	3.219 kWh/a
Warmwasserbe- reitung und Zirkulation	0	8.760	0	150	3.500	525 kWh/a
Telefon-, Klingelanlage, Computernetz	100	8.760	876	50	1.000	926 kWh/a
Antennenanlage	75	8.760	657	25	1.500	695 kWh/a
Thermische Solaranlage	5	8.760	45	120	2.000	285 kWh/a
Regelung HLS	25	8.760	219	20	5.000	319 kWh/a
BHKW	25	8.760	219	75	2.320	393 kWh/a
Abgaswärme- tauscher	10	8.760	88	30	2.320	158 kWh/a
Alle	265	8.760	2.321	-	4.295	6.616 kWh/a

Die Haustechnik und Elektrotechnik weist einen nicht unerheblichen elektrischen Energiebedarf auf. Etwa 50% des Energiebedarfs werden unmittelbar durch die Realisierung des Energiekonzeptes verursacht. Hierzu zählen: die Lüftungsanlage, die Solaranlage sowie der Abgaswärmetauscher.

4.1.4 Allgemeinstrom für Beleuchtung

Tab. 6 Strombedarf für Allgemeinbeleuchtung

Bedarf	
Beleuchtung allgemein ⁹	1.000 kWh/a

4.1.5 Energiebilanz Strom

Tab. 7 Messwerte Strombedarf und Stromproduktion

Wohnen & Arbeiten	
Verbrauch insgesamt	28.675 kWh/a
Davon Eigenproduktion mit BHKW	13.158 kWh/a
Davon Eigenproduktion mit PV ¹⁰	3.000 kWh/a
Differenz gleich Zukauf ¹¹	12.517 kWh/a

Die Bilanz verdeutlicht, dass 44% des elektrischen Energiebedarfs noch zugekauft werden müssen. Der insgesamt zugekaufte Bedarf an elektrischer Energie entspricht dem typischen elektrischen Energiebedarf von drei 4-Personen-Haushalten.

⁹ Geschätzt über Einschaltdauer und Leistungsaufnahme, da keine Messeinrichtung vorhanden ist

¹⁰ Wird noch nicht in das öffentliche Netz eingespeist

¹¹ Es konnte wegen fehlender Meßeinrichtungen nicht ermittelt werden, wieviel Strom verkauft wurde

4.2 Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser

4.2.1 Heizenergieverbrauch

Der Heizenergieverbrauch betrug im Jahr 2000 10,8 kWh/m²a. Hierin berücksichtigt ist der Energiebedarf beider Heizsysteme (Lüftung + Radiatoren) da zeitweise eine Nacherwärmung der Zuluft erfolgte. Im Zwischenbericht war ein Heizenergiebedarf von 11,6 kWh/m²a prognostiziert worden.

4.2.2 Wärmeverbrauch zur Warmwasserbereitung

Der Frischwasserverbrauch beträgt lediglich 51 Liter pro Person und Tag. Dies entspricht etwa einem Drittel des durchschnittlichen Frischwasserbedarfs. Hier zeigt sich deutlich der Einfluss der Vakuumtoiletten.

Der Warmwasserverbrauch beträgt 28 Liter pro Person und Tag bei einer Temperatur an der Zapfstelle von ca. 45 Grad. Auch hier ist ein vergleichsweise geringer Warmwasserverbrauch vorhanden. Der geringe Bedarf ist hierbei auf ein sehr sparsames Verbraucherverhalten zurückzuführen.

Der Rücklauf der Zirkulationsleitungen erreicht im Mittel ein Temperaturniveau von ca. 40°C.

Die Zirkulation ist nachts zwischen 0.30 Uhr und 6.30 Uhr ausgeschaltet. Tagsüber wird der Betrieb über die Rücklauftemperatur der Zirkulationsleitung gesteuert.

Der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung betrug insgesamt 14,2 kWh/m²a inklusive Speicher- und Zirkulationsverlusten.

4.2.3 Biogasanlage

Die Biogasanlage war bis zum Zeitpunkt der Berichtserstellung aufgrund technischer Mängel noch nicht in Betrieb. Deshalb war hierzu keinerlei Wärmeenergie erforderlich.

4.2.4 Wärmeverteilungsverluste

Im Zwischenbericht vom Nov. 98 wurde bereits erläutert, dass trotz doppelter Wärmedämmung der Verteilleitungen nach wie vor mit einem „relativ hohen“ Energiebedarf bei der Wärmeverteilung zu rechnen ist. Diese Prognose hat sich durch die vorliegenden Messwerte bestätigt.

Die Wärmeverteilungsverluste teilen sich wie folgt auf:

Tab. 8 Wärmeverluste in kWh/m²a

Wärmeverlust Lüftungsanlage ¹²	1,0
Wärmeverlust BHKW ¹³ bezogen auf Hu	4,5
Wärmeverluste der Heizleitungen außerhalb der thermischen Hülle	1,0
Wärmeverluste der Warmwasserbereitung, Speicherung und Zirkulation	3,0
Wärmeverluste der Pufferspeicher, Rohrleitungen und Armaturen	4,9
Summe	14,4

Im Zwischenbericht waren Wärmeverluste von insgesamt 18,9 kWh/m²a prognostiziert worden. Die Abweichungen ergeben sich insbesondere aufgrund der Tatsache, dass im Zwischenbericht der Wärmeverlust der Biogasanlage mit berücksichtigt wurde. Diese Anlage befindet sich noch nicht in Betrieb. Weiterhin sind Verluste in der Zirkulationsleitungen durch niedrigere Warmwasserzirkulationstemperatur und höhere Umgebungstemperatur im Kellerbereich niedriger als erwartet. Trotz massiver Wärmedämmung an Pufferspeichern, Rohrleitungen und Armaturen im Haustechnikraum, sind die Verluste dort absolut gesehen am höchsten. Leider konnten wegen fehlender Messeinrichtung die Verluste nicht detaillierter erfasst werden.

Eine deutliche Verbesserung kann in Zukunft nur dann erreicht werden, wenn die gesamte Heizzentrale innerhalb der warmen Gebäudehülle angeordnet wird. Dies führt bei Mehrfamilienhäusern jedoch zu verschiedensten Problemen:

- Einregulierung, Wartung und Reparatur erfolgen dann zumeist innerhalb der Wohnungen, dies führt mit Sicherheit zu Akzeptanzproblemen.
- Wertvoller Wohnraum geht verloren.
- Bei Erstbezug entstehen erhebliche Beeinträchtigungen der Bewohner.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung besteht durch den Umstieg von einer 4-Leiter-Technologie (2xHeizung, Warmwasser, Zirkulation) auf eine 2-Leiter-Technologie mit dezentralen Wasser-Wasser-Durchlauferwärmern.

Diese Technologie sollte Untersuchungsgegenstand weiterer Projekte sein.

¹² Verluste der Lüftungsleitungen im kalten Kellerbereich, errechnet über Temperaturdifferenzen, Flächen und U-Werte der Lüftungleitungen

¹³ Verluste über Abgaswärme und Oberfläche der Aggregats

4.3 Wärmeversorgung

4.3.1 Thermische Solaranlage

Die thermische Solaranlage erreichte im Zeitraum vom 1.1.00 bis zum 31.12.00 einen Nettoertrag von ca. 15.500 kWh/a, dies entspricht 291 kWh/a pro m² Aperturfläche des Kollektors

Im Zwischenbericht war ein Ertrag von insgesamt 20625 kWh/a prognostiziert wurden. Der Minderertrag ergibt sich vorrangig aufgrund der Tatsache, dass die Solaranlage aus statischen Gründen 10% kleiner gebaut wurde und weniger Warmwasser benötigt wird, als ursprünglich prognostiziert wurde.

4.3.2 BHKW

Das eingesetzte Klein-BHKW erreichte eine Laufzeit von 2.320 Stunden und erzeugte in diesem Zeitraum insgesamt 25.368 kWh Wärme sowie 13.158 kWh elektrische Energie. Der Einsatz des Klein-BHKW hat sich im Mehrfamilien-Passivhaus ökonomisch und ökologisch äußerst bewährt.

4.3.3 Abgaswärmetaucher

Aufgrund des eingeschränkten Messumfangs liegen keine genauen Daten zur Wärmeeinsparung des Abgaswärmetauschers vor. Dessen Funktion war über den gesamten Berichtszeitraum jedoch einwandfrei. Die geschätzte Wärmeeinsparung beträgt etwa 4.650 kWh/a.

4.4 Primärenergieverbrauch des gesamten Bauvorhabens

Ziel des Bauvorhabens ist es die CO₂-Emissionen im Bereich Heizung, Warmwasser und elektrische Energie um mindestens 80% zu reduzieren. Dies setzt zwangsläufig eine entsprechende Reduktion des Primärenergiebedarfs voraus.

Primärenergie- und Nutzenergieverbrauch sind in nachfolgender Tabelle zusammenfassend dargestellt.

Tab. 9 Primärenergiebedarf im Messzeitraum 1.1.2000 – 31.12.2000

Messwerte 1.1. – 31.12.2000	Gesamtverbrauch	Primärenergieverbrauch¹⁴
Gasverbrauch BHKW	5.061 cbm/a	49.598 kWh/a
Kochgasverbrauch	364 cbm/a	3.567 kWh/a
Strombezug (lokales Netz)	12.517 kWh/a	37.551 kWh/a
Primärenergiebedarf (gesamt)		90.716 kWh/a

Heizwert H_u des eingesetzten Gases (Erdgas L): 9,8 kWh/m³

Dies entspricht einem spezifischen Primärenergiekennwert von 63,5 kWh/m²a. Die Zielvorgaben für ein Passivhaus mit 120 kWh/m²a werden damit um 47 % unterschritten. Ein wie im Zwischenbericht dargestelltes typischen Bauvorhaben nach WSV0'95 erreicht eine Primärenergiekennzahl von etwa 220 kWh/m²a. Im Vergleich hierzu wird eine Primärenergieeinsparung von 71 % erzielt.

¹⁴ Elektrische Verbraucher werden mit Faktor 3,0; Wärmeverbraucher mit dem Faktor 1,0 bewertet.

4.5 Energiebilanz (Zusammenfassung)

Energieverbräuche und Energieerzeugung sind nachfolgend zusammenfassend dargestellt.

Tab. 10 Energie- und Wasserbedarf im Messzeitraum 1.1.2000 – 31.12.2000

Messwerte 1.1. – 31.12.2000	Gesamtverbrauch	Pro Person
Wasserverbrauch insgesamt	681 cbm/a	51 l/d
Davon Warmwasserverbrauch	365 cbm/a	28 l/d
Stromverbrauch insgesamt ¹⁵	28.675 kWh/a	651 kWh/a
Davon Individualverbrauch	21.000 kWh/a	477 kWh/a
Gasverbrauch insgesamt ¹⁶	5.425 cbm/a	123 cbm/a
Davon Kochgasverbrauch	364 cbm/a	10 cbm/a
Stromerzeugung BHKW	13.158 kWh/a	
Stromerzeugung PV ¹⁷	3.000 kWh/a	(960 kWh/kW _{peak} * a)
Wärmeerzeugung Solarkollektor ¹⁸	15.500 kWh/a	(291 kWh/m ² *a)
Wärmeerzeugung BHKW	25.368 kWh/a	
Wärmeerzeugung AGWT ¹⁹	4.650 kWh/a	

¹⁵ Ohne Stromverbrauch für Vakuumpumpen, Biogasanlage und belüfteter Sandfilter

¹⁶ Inklusive Gasverbrauch zur Stromerzeugung

¹⁷ Anlage ist erst seit April 2000 in Betrieb, Ertrag ganzes Jahr: ca. 3.000 kWh

¹⁸ Wärmemengenzähler erst ab März 2000 in Betrieb, Ertrag ganzes Jahr, ca. 15.500 kWh

¹⁹ Energieerzeugung des AGWT geschätzt.

Weiterhin ergeben sich die nachfolgenden spezifischen Energiekennwerte.

Tab. 11 Spezifische Energiekennwerte im Messzeitraum 1.1.00 bis 31.12.2000

Betrachtungszeitraum 1.1.00-31.12.00 kWh/m²a	
Nutzwärmeverbrauch	
Warmwasser	11,2
Heizung	10,8
Wärmeverluste	
Wärmeverlust Lüftungsanlage	1,0
Wärmeverlust BHKW bezogen auf Hu	4,5
Wärmeverluste der Heizleitungen außerhalb der thermischen Hülle	1,0
Wärmeverluste der Warmwasserbereitung, Speicherung und Zirkulation	3,0
Wärmeverluste der Pufferspeicher, Rohrleitungen und Armaturen	4,9
Nutzwärme + Wärmeverluste	
Nutzwärme (60%)	22,0
Wärmeverluste (40%)	14,4
Summe	36,4

Die erzielten Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die prognostizierte Nutzenergieeinsparung im Wärmebereich wurde erreicht und sogar noch überschritten. Prognostiziert wurde eine Einsparung von 76%, erreicht wurde eine Einsparung von 85% (witterungsunbereinigt).
- Der Ertrag der Solaranlage war um 25% geringer als prognostiziert. Ursache hierfür sind die um 10% geringere Fläche und der um 30% geringere Warmwasserbedarf mit 28l pro Person (rechnerischer Ansatz 40l pro Person).
- Der Haushaltsstromverbrauch ist gegenüber dem Bundesdurchschnitt (ca. 1000 kWh p. Pers.) um 52% reduziert. Der Zielkennwert von 400 kWh pro Pers. wurde noch nicht erreicht. Grund hierfür ist, dass manche Haushalte immer noch nicht überall Energiesparbeleuchtungssysteme verwenden. Weiterhin sind die um sich greifenden Stand-by-Verbraucher

Handy, (tragbares) Telefon, Fax, Anrufbeantworter, Fernseher, Rechner, Video, Hifi, etc) nahezu nicht zu kontrollieren. Teilweise ergeben sich hierbei Funktionsstörungen bei Totalabschaltungen.

- Der gemeinsame Trocken- und Waschkraum sowie die gemeinsamen Gefriergeräte haben sich sehr gut bewährt. Nur weniger Bewohner machen von der Gemeinschaftsnutzung keinen Gebrauch.
- Deutlich unterschätzt wurde der elektrische Energiebedarf der sonstigen Verbraucher wie Regelungen, Satelliten- und Telefonanlage, Klingelanlage, etc. Bei der Haustechnik bestehen insbesondere beim Stand-by-Verbrauch der Regelungen deutliche Einsparpotentiale.
- Die Verteilverluste haben einen Anteil von 40% am gesamten Wärmebedarf. Eine deutlich verbesserte Wärmedämmung von Armaturen und Leitungen wird nicht mehr für möglich gehalten, da bereits alle technisch wichtigen Maßnahmen wie doppelte Wärmedämmung gegenüber der Heizungsanlagenverordnung, wärmegeämmte Aufhängungen sowie so gut als möglich gedämmte Armaturen realisiert wurden. Hier kann nur durch eine Systemänderung wie der Integration der Haustechnik in die warme Hülle sowie die Verwendung eines 2-Leiter (statt 4-Leiter) Systems Abhilfe schaffen.
- Sehr gut bewährt hat sich der Abgaswärmetauscher, der dem Klein-BHKW nachgeschaltet wurde.

5 Betriebserfahrungen

5.1 Heizungsanlage

Das Bauvorhaben wird über insgesamt 47 Radiatoren beheizt. Eine Beheizung über die Lüftungsanlage wäre zwar technisch möglich gewesen, hätte jedoch entsprechend den Erläuterungen im Zwischenbericht vom Nov. 1998 aufgrund von Wärmeverteilung und Regelungsverlusten zu einem deutlich erhöhten Jahresheizenergiebedarf geführt.

Auf Wunsch der Bauherren ist nur etwa jeder zweite Raum mit einem Heizkörper ausgerüstet. Es sind bislang keine Beschwerden hinsichtlich Komfortproblemen aufgetaucht.

Eine Mittelwohnung, die zunächst ohne Heizkörper ausgestattet wurde, wurde mittlerweile mit Heizkörpern nachgerüstet.

Das Heizsystem erreicht eine Vorlauftemperatur von 70°C (bei -12°C AT). Zwischen 22.00 und 6.00 Uhr erfolgt eine (Nacht-)Abschaltung der Heizungsumwälzpumpe.

5.2 Wärmebedarf

Der Wärmebedarf des Bauvorhabens liegt nach Berechnungen in Anlehnung an DIN 4701 bei Vollbeheizung bei 20,6 kW. Der eingesetzte Wärmeerzeuger verfügt jedoch inkl. Abgaswärmetauscher lediglich über eine Wärmeleistung von 14,5 kW.

Die Betriebserfahrungen aus den ersten beiden Betriebsjahren zeigen, dass mit dem gewählten Konzept keine Beeinträchtigungen hinsichtlich der Wärmeerzeugung aufgetreten sind. Das BHKW lief maximal 20h pro Tag.

Wichtig war jedoch die Vorhaltung einer Leistungsreserve über den vorhandenen Pufferspeicher. Im Normalbetrieb wird hierbei ein Speichervolumen von 1.750 Liter kontinuierlich auf einem Temperaturniveau von 60°C gehalten. Bei einer Außentemperatur unterhalb minus 2°C wird zusätzlich ein Puffervolumen von 1.500l aktiviert.

5.3 Lüftungsanlage

5.3.1 Betrieb

Die Lüftungsanlage wurde in der ersten Heizperiode als Grundheizung (Bau-trocknung) benutzt. In Zukunft soll das Luftheizregister nur noch als Notheizsystem dienen. Es wird allerdings auch überlegt das Heizregister komplett zu entfernen, was zu einer Reduktion des elektrischen Energiebedarfs beim Lüftungszentralgerät führt.

Die Lüftungsanlage wird wie folgt betrieben:

- Winterbetrieb (bei Außentemperaturen unter 15 °C und manueller Betätigung): Zu- und Abluft auf 1.500 m³/h.
- Sommerbetrieb: Aufgrund innenliegender Bäder wird die Abluftseite von 6.30 Uhr bis 00.30 Uhr bei einem Volumenstrom von 1.000 m³/h betrieben.

Die Umschaltung von Sommer- auf Winterbetrieb erfolgte manuell und wurde den Bewohnern mitgeteilt.

Die Lüftungsanlage im Messzeitraum 2000 insgesamt 4.250h im Zu- und Abluftbetrieb. Außerhalb der Heizperiode war die Abluft 3.000h in Betrieb. Dies entspricht 5.000 Vollbenutzungsstunden pro Jahr.

5.3.2 Nutzerakzeptanz

Die Nutzerakzeptanz kann nur über die bislang vorliegenden (einzelnen) Rückmeldungen bewertet werden. Hierbei kann folgendes zusammengefasst werden.

- Es gab keine negativen Rückmeldungen von Seiten der Nutzer.
- Anfangs waren die Zuluftstränge nicht korrekt einreguliert, so dass manche Zimmer zu geringe Luftmengen erhalten haben. Dies wurde von den Nutzern in der Regel bemerkt und an die zuständigen Planungsverantwortlichen weiter geleitet. Es erfolgte eine „so gut wie handwerklich mögliche“ Einregulierung. Aufgrund fehlender Mittel in der Betriebsphase konnte eine Überprüfung noch nicht erfolgen.
- Sowohl der Heizenergiebedarf als auch die vereinzelt Stichproben zeigten, dass die Nutzer ohne speziell darauf angesprochen zu werden, die Fenster während der Heizperiode nicht bzw. in einem nur sehr geringem Umfang öffneten. Die Nutzer verhielten sich intuitiv richtig.
- Fenster wurden immer dann geöffnet, wenn zuwenig Zuluft vorhanden war. In einem Fall war die Zuluftöffnungen nach der Inbetriebnahme noch zugeklebt.
- Sehr gut funktioniert der interne Schallschutz. Hier gab es zu keinem Zeitpunkt Beschwerden. Vielmehr wurde dies mehrfach positiv erwähnt.
- Die einzigen maßgeblichen Beschwerden, die in den ersten Betriebsmonaten bekannt wurden, waren Geruchsbelästigungen über die Lüftungsanlage. Diese wurden letztlich durch eine erhebliche Leckage im Lüftungszentralgerät verursacht. Weitere Informationen hierzu im folgenden Abschnitt.

5.3.3 Einregulierung

Die Lüftungsanlage konnte nur in einem sehr mühsamen Prozess einreguliert werden. Offensichtlich war das Fachhandwerk eine Einregulierung in diesem Umfang nicht gewöhnt.

Nach einer ersten Einregulierung im Sept. 99 wurde eine Abnahme der Anlage durch einen Lüftungssachverständigen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die angeblich einregulierten Luftmengen nicht erreicht wurden. Dies hatte folgende Gründe:

- Die Einregulierung der Anlage wurde lediglich über die Volumenstromanzeige des Lüftungsgerätes vorgenommen. Eine externe Messung wurde vom Fachhandwerk nicht vorgenommen.
- Das Lüftungsgerät hatte erhebliche Leckagen so dass bis zu 30% des Abluftvolumenstroms in den Zuluftvolumenstrom gelangten. Dieser Defekt war nur durch richtige Messung nicht aber über die Anzeige des Lüftungsgerätes sichtbar.
- Die Leckage konnte erst nach mehreren Nachbesserungen am Lüftungsgerät behoben werden. Nach jeder Nachbesserung durch den Gerätehersteller wurde der Sachverständige erneut eingeschaltet um die Funktionsfähigkeit zu prüfen. Erst nach dem dritten Nachbesserungstermin (ca. 2 Monate später) konnte der Hersteller zusammen mit dem Lüftungssachverständigen den ordnungsgemäßen Betrieb bestätigen. Seit diesem Zeitpunkt (Nov. 99) läuft die Lüftungsanlage ohne weitere Probleme.
- Aufgrund von Beschwerden durch Bewohner mussten einzelne Zuluftstränge auf höhere Luftvolumenströme einreguliert werden. Dabei wurde ein Zuluftstrang entdeckt, der durch eine Schutzfolie vollständig verschlossen war.
- Es ist nicht konzeptionell nicht davon auszugehen, dass innerhalb einzelner Wohnungen eine ständig ausgeglichenen Massenstrombilanz gewährleistet ist. Daher kommt es zu zusätzlicher In- oder Exfiltration.

5.4 Hinweise zur Planung.

Der integrale Planungsprozess wurde von allen Planern sehr intensiv und mit viel Engagement unterstützt. Dies führte dazu, dass der Planungsprozess sehr zeitaufwendig und damit auch teuer wurde. Gegenüber vergleichbaren Bauvorhaben mussten die einzelnen Planer zwischen 20% und 50% mehr Arbeitszeit investieren.

Dieser zeitliche Mehraufwand konnte durch das Forschungsvorhaben teilweise ausgeglichen werden. Prinzipiell bleibt festzuhalten, dass dieser notwendige planerische Mehraufwand zwar zur Energie- und Kosteneinsparung führte, dieses sich beim Erbringen dieser Leistung aber nicht niederschlägt.

5.5 Luftdichtigkeit

Am 27. März 1999 erfolgte eine Blower-Door Messung am Gebäude. Die Ausführung dieser Messung gestaltete sich schwierig, da sowohl zwischen den einzelnen Wohnungen über die Außenwände (Installationsebene), als auch über die Anbindungen zum Haustechnikraum luftdurchlässige Verbindungen bestanden. Aus diesem Grund konnte nicht jede Wohnung einzeln gemessen werden; vielmehr mussten vier übereinander angeordnete Wohnungen gleichzeitig gemessen werden.

Anhand der Blower Door Messungen konnten folgende Schwachstellen aufgefunden werden.

- Fenster; trotz der von Seiten der Planer geäußerten Bedenken, entschieden sich einige Bauherren für große Schiebe- und Flügeltüren. Aufgrund der Abmessungen und des damit verbundenen Gewichtes führten diese Bauteile zu merklichen Undichtheiten.
- Die gewählte Konstruktionsart mit massiven Schotten und Holzleichtbauelementen führte zu komplizierten Anschlussdetails bei der Abdichtung zwischen den verschiedenen Materialien. Problematisch war insbesondere, dass die Abdichtarbeiten bei sehr niedrigen Außentemperaturen erfolgten und daher die Verarbeitung des verwendeten Klebers erschwert war. Der Kleber war zu diesem Zeitpunkt sehr zähflüssig, so dass die Verbindungsnahte nicht homogen verarbeitet werden konnten.
- Alle unteren Anschlüsse der Fenster ans Mauerwerk der Giebelseiten waren nur mit PU-Schaum abgedichtet. Diese Anschlussstelle führte zu Undichtheiten.
- Im Dachgeschoss führte der konstruktiv bedingte Versprung in der Luftdichtigkeitsebene zu Leckagen.

Trotz der noch vorhandenen Mängel konnte im Rohbau ein n_{50} -Kennwert von $1,05 \text{ h}^{-1}$ erreicht. Dies ist ein sehr niedriger Wert, entspricht allerdings noch nicht der Zielvorgabe eines Passivhauses von $n_{50}=0,6 \text{ h}^{-1}$.

Nach Ausbau der Gewerke und Abdichtung der Zuleitungen zum UG war eine exakte Messung des n_{50} -Kennwertes nicht mehr möglich, da dies einen gleichzeitigen Betrieb von 4 Blower-Door Geräten erfordert hätte, was von Seiten der Bauherrschaft nicht finanziert werden konnte.

5.6 Thermische Solaranlage

Mit dem Erstbezug des Bauvorhabens im Juli '99 konnten baulicher Wärmeschutz und Energietechnik wie erwartet realisiert werden. Lediglich im Bereich der Laubengangbedachung traten massive Schwierigkeiten auf.

Ursprünglich war geplant, den gesamten Laubengang mit nach Süden orientierten Kollektoren zu überdachen. Hierbei wurden jedoch von Seiten der

Prüfstatik erhebliche Bedenken angemeldet, da das eingesetzte Kollektorsystem weder die Anforderungen an die Wind- noch an die Schneelasten für den Standort Freiburg erfüllte.

Trotz intensiver mehrwöchiger Suche konnte jedoch bundesweit kein Kollektormodul gefunden werden, welches diesen Anforderungen gerecht wurde.

In Konsequenz bedeutet dies, dass aus statischer Sicht (Windsog/Winddruck) bundesweit kein System zur Verfügung steht, welches für Gebäude mit einer Höhe von mehr als 8 m zulässig wäre.

Die Bauherrschaft entschied daraufhin anstatt thermischer Kollektoren ein PV-System zu verwenden, welches die Anforderungen der Überkopfverglasungsrichtlinie des Landes Baden-Württemberg erfüllt. Die Kollektoranlage wurde daraufhin auf dem Dach montiert. Hier musste die Kollektorfläche aus statischen Gründen verkleinert werden, so dass insgesamt nur 40 qm Solarkollektor installiert werden konnten (ca. 10% weniger als geplant). Die solarthermische Anlage ging im November 1999 in Betrieb.

Trotz einer großzügigen Auslegung der Ausdehnungsgefäße nach den Vorgaben des Kollektorherstellers kochte die Anlage im Stillstand insgesamt zweimal über, so dass die Anlage erneut befüllt werden musste. Leider kann bis heute nicht bestimmt werden, warum die Stillstandssicherheit nicht gegeben ist.

5.7 Fotovoltaikanlage

Auch die Installation der Fotovoltaikanlage führt zu erheblichen Abstimmungsproblemen mit der Prüfstatik. Für das verwendete System musste eine Einzelzulassung beim Landesgewerbeamt (Baden-Württemberg) beantragt werden.

Im Dez. '99 wurde die Einzelzulassung für die Fotovoltaikanlage als Überkopfverglasung erteilt. Die Fertigstellung der Fotovoltaik erfolgte im April 2000.



Abb. 6: Fotovoltaikanlage / Passivhaus - Wohnen & Arbeiten

5.8 Vakuumsystem und Vakuumleitung

Anfängliche Probleme mit Dichtigkeit, zeitweise Probleme mit der pneumatischen Steuerung der Ventile, einmal Systemausfall wg. Putzlappen, der von Kindern ins WC geworfen wurde. Generell müssen die Vakuumpumpen regelmäßig gewartet werden (Ölwechsel, Reinigung).

5.9 BHKW

Das eingesetzte Klein-BHKW lief bis zum heutigen Tage störungsfrei. Dessen Einsatz hat sich gut bewährt.

Die vom Hersteller genannten Daten wurden annähernd erreicht. Der Gesamtwirkungsgrad betrug 87%. Der elektrische Wirkungsgrad betrug 26%.



Abb. 7: BHKW / Passivhaus - Wohnen & Arbeiten

5.10 Schallschutz

Der Schallschutz innerhalb des Gebäudes zwischen den einzelnen Wohnungen ist einwandfrei. Auch bei höherer Schallemissionen ist in den angrenzenden Wohnungen keine Belästigung aufgetreten.

Die eingesetzten Quelluftauslässe sind „unhörbar“, lediglich die Abluftventile sind bei sehr genauem Hinhören wahrnehmbar. Der sehr gute Schallschutz, insbesondere nach außen, wird von Familien teilweise auch als nachteilig erfahren, da nur bei geöffnetem Fenster die Kinder noch hör- und damit wahrnehmbar sind. Es wäre sehr wünschenswert, wenn die bislang individuelle Erfahrung des Schallschutzes auch messtechnisch erfasst werden könnte.

5.11 Raumluftklima (Lüftung)

Das Raumluftklima wurde von den Bewohnern als „gut“ bis „sehr gut“ bezeichnet. In der Heizperiode bestand bei keinem der Bewohner der dringende Wunsch die Fenster zu öffnen. Im Sommer läuft die Anlage nur im Abluftbetrieb. Hier wurde vereinzelt der Wunsch geäußert, die Zuluft wieder in Betrieb zu nehmen, damit auch im Sommer die Fenster geschlossen bleiben können. Dies ist bei einer Zentralanlage mit zentralen Ventilatoren nicht möglich. Hier bieten dezentrale Systeme pro Wohneinheit oder zentrale WRG-Systeme mit gemeinsamem Kanalnetz aber separaten Ventilatoren Vorteile.

5.12 Sommerliches Raumklima

Das sommerliche Raumklima wurde bereits im Rahmen der Energie- und Gebäudekonzeption optimiert. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Verlauf der sommerlichen Temperaturen im Gebäude nach der Simulation. Nach Aussage der Bewohnerschaft herrschten im Sommerhalbjahr 2000 angenehm kühle Temperaturen im Gebäude mit Einschränkungen auch im noch nicht verschatteten 3. Obergeschoss. Messwerte liegen nur über einen Minimal-Maximal-Thermometer in einer Wohnung im 2. Obergeschoss vor. Danach war die Maximaltemperatur in dem gemessenen südorientierten Raum 26,5°C im Juli 2000

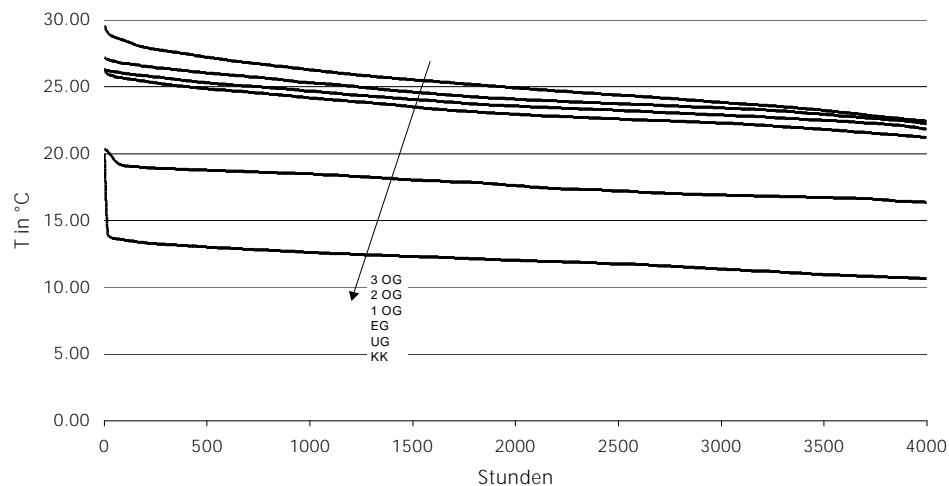


Abb. 8: Simulierte Raumtemperaturen im Sommer, sortiert, ohne Abschattung im 3. OG

Von den Bewohnern wird angemerkt, dass das Gebäude über ein sehr gutes sommerliches Raumklima verfügt. So wurden im vergangenen Sommerhalbjahr maximale Raumtemperaturen um 26 °C ermittelt (nur Ablesung, keine kontinuierliche Messung). Die feststehende Abschattung über Balkone und Bäume hat sich damit bewährt. Weiterhin wurden die Simulationsergebnisse hinsichtlich des 3. Obergeschosses bestätigt. Die in der Simulation berechneten maximalen Temperaturen von 30 °C traten ein. So dass von Seiten der Bauherren nachträglich Markisen als Sonnenschutzsystem installiert wurden.

5.13 Tageslicht

Die Tageslichtsituation wird übereinstimmend als gut bezeichnet. Im Erdgeschoss sind insbesondere auf Grund der großen Bäume die Mittelwohnungen etwas benachteiligt.

5.14 Verkehr

Die Minimierung des Verkehrs und die damit verbundene Verbesserung der Lebensqualität sind wichtige Eckpunkte der Stadtplanung im Baugebiet Vau-ban. So wurde der Stadtteil als überwiegend stellplatzfreies Baugebiet konzipiert. Die Parkierung der PKW's erfolgt in zwei Parkhäusern, die jeweils am Rand des Stadtteils angeordnet sind.

Jeder Bauherr muss einen Stellplatz im zentralen Parkhaus nachweisen und zum Preis von 33.500,- DM erwerben. Bauherren, die schriftlich erklären, dass sie kein Auto besitzen können sich gegen Gebühr 6.000 DM von der Erwerbspflicht befreien lassen.

Die Minimierung der individuellen Mobilität war auch ein zentrales Ziel des Modellvorhabens „Passivhaus Wohnen & Arbeiten“. So sollten Wohnen & Arbeiten unter einem Dach vereinigt und damit die Arbeitswege minimiert werden. Weiterhin sollten möglichst wenige individuelle PKW's vorhanden sein.

Die Ergebnisse im Bereich Verkehr können wie folgt zusammengefasst werden:

- Das gesamte Bauvorhaben verfügt über lediglich 3 Stellplätze vor dem Haus, die vorwiegend als Besucherparkplätze dienen.
- Die insgesamt 16 Haushalte und 4 Büros verfügen zusammen über 10 PKW's, die jeweils im zentralen Parkhaus untergebracht sind.
- Insgesamt 5 Haushalte sind Mitglied der Freiburger Car Sharing Organisation.

Das erzielte Ergebnis ist insbesondere auf die das gute Wohnumfeld zurückzuführen. Die eingeschränkten Parkmöglichkeiten, die schwere Erreichbarkeit mit dem PKW sowie die hohen Kosten für den Stellplatz sind mit ein Grund für die eingeschränkte Nutzung der PKW's.

Sehr verbesserungsbedürftig ist der öffentliche Nahverkehr. Hier erfolgt bislang lediglich die Anbindung über einen Stadtbus mit einem ca. 15 Min-Takt tagsüber und einem 30 Min-Takt ab 21.00 Uhr.

6 Vergleich Planung – Istzustand

Die Energiebilanzen sind auf Grund der sehr eingeschränkten Messtechnik sowie der Tatsache, dass z.B. die Solaranlage, die Dämmarbeiten an Armaturen und Leitungen erst im November 1999 abgeschlossen wurden, nur bedingt aussagekräftig. Vielfach mussten Annahmen getroffen werden. Die nachfolgend erstellte Energiebilanz unterscheidet daher zwischen Messwerten im Jahr 2000 und Hochrechnungen, die auf Grund von vereinfachten Rechenannahmen erstellt wurden. Die einzelnen Daten sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tab. 12 Energie und CO₂ Vergleich

Wohnen & Arbeiten	Hochrechnung nächste Jahre	Messwerte 1. Jahr	Planungswerte Stand Nov 98	WSVO-Standard Basisvariante
Elektrische Energie	29.000 kWh/a	28.675 kWh/a	19.000 kWh/a ¹⁴	58.000 kWh/a ²⁰
Warmwasserbedarf	24.500 kWh/a	23.758 kWh/a	35.300 kWh/a	43.110 kWh/a
Heizenergiebedarf	21.000 kWh/a	21.760 kWh/a	31.900 kWh/a	149.520 kWh/a
Kochgasverbrauch	3.750 kWh/a	3.567 kWh/a	0 ²¹	-
Stromerzeugung BHKW	13.000 kWh/a	13.158 kWh/a	17.550 kWh/a	-
Stromerzeugung PV ²²	3.000 kWh/a	3.000 kWh/a	0 ²³	-
Wärmeerzeugung Solarkollektor ²⁴	15.500 kWh/a	15.500 kWh/a	20.625 kWh/a	-
Wärmeerzeugung BHKW+AGWT	30.000 kWh/a	30.018 kWh/a	46.575 kWh/a	-
CO ₂ -Emission	21.340 kg/a	21.128 kg/a	17.700 kg/a	90.800 kg/a
CO ₂ -Einsparung	77 %	77 %	81 ²⁵ %	0 %

²⁰ Der Stromverbrauch musste gegenüber dem Planungsstand im Zwischenbericht heraufgesetzt werden, da in der Planung von 11 Vier-Personen-Haushalten ausgegangen wurde, die durchschnittliche Haushaltgröße jetzt aus 3 Personen besteht, nach Feist, W., 4. Aufl. „Das Niedrigenergiehaus“, Heidelberg 1997, liegt der durchschnittliche Haushaltsstrombedarf bei 1320 kWh pro Person

²¹ wurde im Zwischenbericht im Haushaltsstrombedarf berücksichtigt

²² Anlage ist erst seit April 2000 in Betrieb, Ertrag ganzes Jahr: ca. 3.000 kWh

²³ PV-Anlage war nicht geplant

²⁴ Wärmemengenzähler erst ab März ,00 in Betrieb, Ertrag pro Jahr, ca. 15.500 kWh

²⁵ Berechnet auf Basis der tatsächlichen Haushaltsgröße von durchschnittlich 3 Personen.

Die Auswertung zeigt eine weitgehende Übereinstimmung mit den Ansätzen der Planung. Deutlich höher als ursprünglich angesetzt, sind der Stromverbrauch sowie die Verluste im Haustechnikraum. Die frühzeitige Planung der verbesserten Wärmedämmung der Verteilungen sowie die Dämmung der Haustechnikzentrale haben sich bewährt. Es zeigt aber auch deutlich, dass hier noch mehr geleistet werden muss. Gleiches gilt für den elektrischen Energiebedarf. Hier wurde insbesondere das Ausmaß der Standby-Verbraucher sowohl bei der Haustechnik als auch bei den Haushalten unterschätzt. Wünschenswert wäre eine Fortführung des Projektes mit dem Ziel, den elektrischen Energiebedarf weiter zu senken.

Eine Senkung der Wärmeverluste scheint nur durch eine veränderte Planungskonzeption möglich, wie z. B. weniger Leitungen, weniger Armaturen, 2-Leitersystem anstatt 4-Leitersystem, Rohr-in-Rohr Systeme für die Warmwasser- und Zirkulationsleitungen.

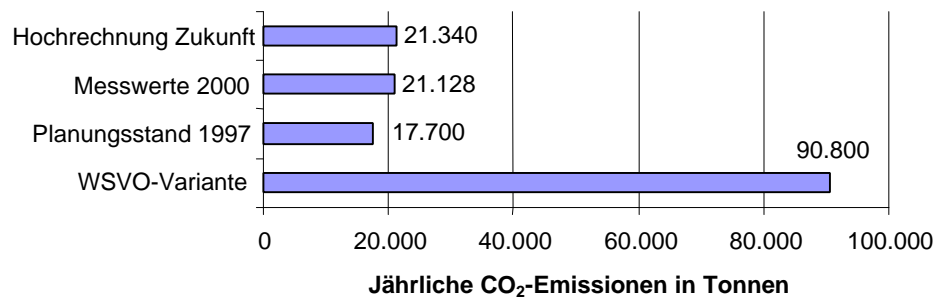


Abb. 9: Vergleich der CO₂-Emissionen der Bestands-, Planungs- und Referenzvariante

Gegenüber dem Planungsstand zum Zeitpunkt der Erstellung des Zwischenbericht ist die CO₂ Bilanz etwas schlechter (anstatt 83% Einsparung nur 77%). Dies hat verschiedene erklärbare Gründe:

- Solartechnik: wegen der bereits beschriebenen Schwierigkeiten, die der Prüfstatiker verursachte, ist die Kollektoranlage über 10% kleiner geworden, als ursprünglich geplant.
- Die Verluste bei der Wärmebereitstellung waren höher als berechnet, insbesondere die Rohrleitungs- und Armaturenverluste im Haustechnikraum sind erheblich. Durch die Vorwärmung der Zuluft im Messzeitraum gingen zudem ca. 1.500 kWh verloren, die nicht eingeplant waren.
- Die Umwandlungsverluste im BHKW sind höher als vom Hersteller angegeben. Der Wirkungsgrad liegt bei 87% anstatt 88% bezogen auf den unteren Heizwert von Erdgas. Der Gesamtwirkungsgrad ist aber zusam-

men mit dem nachgeschalteten Abgaswärmetauscher besser als der eines konventionellen Niedertemperatur-Gaskessel.

- Die Stand-by-Verbräuche der haustechnischen Anlagen sind viel höher als erwartet (8% des gesamten Stromverbrauchs des Gebäudes!).
- Auch durch das Nutzerverhalten ist der Stromverbrauch insgesamt 50% höher als erwartet. So werden vereinzelt private Waschmaschine und Gefriergeräte anstatt der energieeffizienten Gemeinschaftsmaschinen genutzt. Weiterhin wurden vielfach Elektobacköfen anstatt Gasbacköfen verwendet. Weiterhin werden vereinzelt Halogenleuchtmittel anstatt Leuchtstoffröhren eingesetzt.

7 Energiekonzepte im Vergleich: Solarhaus Gundelfingen – Passivhaus Wohnen & Arbeiten

Das Solarhaus Gundelfingen mit einer Wohnfläche von 1.000m² wurde vergleichbar mit dem vorliegenden Bauvorhaben hinsichtlich dessen Nutzwärmebedarf energetisch optimiert.

Beim Solarhaus Gundelfingen sollten die CO₂-Emissionen für Raumwärme und Warmwasser um insgesamt 70% reduziert werden.

7.1 Gebäudekonzept

Das Konzept des Solarhaus Gundelfingen hat zum Ziel, durch Einsatz von passiven und aktiven Solarsystemen den Jahresheizenergiebedarf auch ohne Einsatz einer Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung auf unter 30 kWh/m²a zu senken. Die passive Solarenergienutzung trägt dabei wesentlich zur Reduktion des Jahresheizenergiebedarfs bei.

Das Solarhaus Gundelfingen ist seit Juli '98 fertiggestellt und bezogen. Es wurde in den Jahren 98/99 und 99/00 kontinuierlich messtechnisch erfasst.

Die energetischen Merkmale des Solarhaus Gundelfingen sind:

- Eine 80m² umfassende transparent wärmegeämmte Südfassade (TWD).
- Hochwertiger Wärmeschutz mit Dämmstärken zwischen 24 cm und 30 cm in Verbindung mit 3-fach-Verglasungen.
- Abluftanlage mit nach Feuchte gesteuerten Zu- und Abluftelementen sowie eine Wärmerückgewinnung über eine Abluftwärmepumpe.
- Regenwassernutzung zur Reduktion des Frischwasserbedarfs.
- Solarkollektoranlage mit einer Fläche von 30m² zur Heizungsunterstützung und Warmwasserbereitung.
- Anschluss an die vorhandene Fernwärmeversorgung.

Die erzielten Kenndaten der beiden Vergleichsvorhaben sind nachfolgend zusammengefasst. Dabei wird unterschieden nach den flächenspezifischen sowie den personenspezifischen Kennwerten.

Tab. 13 Flächenspezifische Kenndaten der beiden Modellvorhaben im Vergleich.

	Solarhaus Gundelfingen²⁶	Passivhaus Wohnen & Arbeiten
Beheizte Nutzfläche	1.015	1.428 m ²
Nutzenergiebedarf: ²⁷		
Raumwärme [kWh/m ² a]	25,5	10,8
Warmwasser [kWh/m ² a]	9,9	11,2
Verteilverluste:		
Raumwärme [kWh/m ² a] (geschätzt)	3,0	2,0 ²⁸
Warmwasser [kWh/m ² a]	4,7	3,0
Haustechnikraum ²⁹ [kWh/m ² a]	5,2	4,9
Energiebedarf Nutzenergie + Verteilverluste	48,3	31,9
Solaranlage [kWh/m ² Wfl.]		
	6,0	10,9
[kWh/m ² Kollekt.]		
	214	391
Abluft-WP / Abgas-WT	8,7	3,3
Energieerzeugung	14,7	14,2
Fernwärme / BHKW	33,6	17,7
Elektrische Energie für Haustechn.	0,8	1,0
Solaranlage	0,2	0,2
Lüftung / Abluft-WP	5,1	2,3
Primärenergiebedarf (Wärme)	66,6	39,4

²⁶ Werte aus Endbericht 09/2000, Solarhaus Gundelfingen - Haustechnik²⁷ Bilanzierungszeitraum Solarhaus Gundelfingen: 8/99 bis 7/00.²⁸ Wärmeverluste inkl. einmalige Verteilverluste der Lüftungsanlage durch Bautrocknung.²⁹ Wärmeverluste durch Speicher, Armaturen, Verteiler, Pumpen

	Solarhaus Gundelfingen	Passivhaus Wohnen & Arbeiten
Anzahl Personen (inkl. Büros)	20	36 (44 ³⁰)
Warmwasserbedarf pro Person	32l	28l
Nutzenergiebedarf:		
Raumwärme [kWh/Pers*a]	1.295	350
Warmwasser [kWh/Pers*a]	502	444 ³¹
Verteilverluste [kWh/Pers*a]	655	321
Energiebedarf Nutzenergie + Verteilverluste	2451	1.126
Solaranlage [kWh/Pers*a]	305	350
Abluft-WP/AGWT [kWh/Pers*a]	441	100 ³²
Primärenergiebedarf (Wärme)	3.380	1.278

Tab. 14 Personenspezifische Kenndaten der beiden Modellvorhaben im Vergleich.

Die Gegenüberstellung der beiden Modellvorhaben zeigt trotz der deutlich unterschiedlichen Gebäude- und Technikkonzepte vergleichbare Verbrauchskenndaten. Das Passivhaus Wohnen & Arbeiten erreicht dabei um ca. 60% bessere personenspezifische Primärenergiekennwerte.

Beiden Vorhaben gemeinsam sind folgende Punkte:

- Der Heizenergiebedarf unterschreitet (geringfügig) die bei beiden Vorhaben mittels dynamischer simulierten Kennwerte. Hauptgrund hierfür ist das deutlich mildere Klima gegenüber dem simulierten Testreferenzjahr.
- Der Warmwasserbedarf unterschreitet bei beiden Vorhaben den ursprünglich prognostizierten Wert von 40l pro Tag um mehr als 25%.

³⁰ 8 Personen im Bereich der Büros.

³¹ Warmwasserbedarf nur Wohnnutzung, es werden lediglich 36 Pers. berücksichtigt.

³² Energieertrag der Lüftungswärmerückgewinnung ist bereits im Nutzenergiebedarf Raumwärme enthalten.

- Der Ertrag der Solaranlage ist bei beiden Vorhaben aufgrund des deutlich geringeren Warmwasserbedarfs deutlich geringer als ursprünglich prognostiziert.
- Die Wärmeverteilverluste sind bei beiden Vorhaben trotz hochwertiger Dämmung der Verteilsysteme relativ hoch und betragen zwischen 30% und 40% des gesamten Nutzenergiebedarfs.

8 Entwicklungspotenziale & Forschungsaktivitäten

Die Erfahrungen mit dem Projekt Wohnen & Arbeiten zeigen, dass sich im Bereich Mehrfamilienhäuser erhebliche CO₂- bzw. Primärenergieeinsparungen erzielen lassen.

Leider konnte bislang nur eine eingeschränkte Messphase am Objekt realisiert werden. Wünschenswert wäre eine detailliertere Untersuchung der nachfolgenden objektbezogenen Fragestellungen.

Zur weiteren Verbreitung der erzielten Ergebnisse

8.1 Objektbezogene Maßnahmen

Schallschutz innerhalb des Gebäudes und nach außen: Der Schallschutz innerhalb des Gebäudes wird von den Seiten der Bewohner als „gut“ bis „sehr gut“ beschrieben. Um diese qualitative Aussage quantifizieren zu können, ist die Durchführung entsprechender Schallmessungen erforderlich.

Luftdichtigkeitsmessungen: Aufgrund interner Undichtigkeiten (Luftverbindung zwischen den Wohnungen) kann die Luftleckrate (n_{50}) nur mit sehr hohem technischem Aufwand ermittelt werden. So ist hierzu der parallele Einsatz von mindesten 4 Blower Door Messeinrichtungen erforderlich.

Massenstrombilanz Lüftung: Bisher konnten aufgrund fehlender Messtechnik noch keine Aussagen zur Luftmassenstrombilanz einzelner Wohnungen gemacht werden. Es stellt sich die grundsätzliche Frage, ob diese mit dem vorliegenden Systemkonzept überhaupt möglich ist.

Reduktion der Stand-by-Verbraucher: Nach Analyse der einzelnen Stand-by-Verbraucher sollte ein Sanierungskonzept ausgearbeitet werden, welches zum Ziel hat den jetzigen Betriebsstrombedarf deutlich zu reduzieren.

Erfassung und Spezifizierung der Wärmeverteilverluste: Die Wärmeverteilverluste sollten hinsichtlich deren Quelle (Zirkulation, Heizung, Lüftung, Armaturen, etc.) besser analysiert werden können. Hierzu ist eine detaillierte Messphase erforderlich.

Messung der Luftqualität (CO₂): Das Raumklima wird von Seiten der Bewohner als sehr gut bezeichnet. Um diese subjektive Aussage zu bewerten sollten Luftqualitätsmessungen in ausgewählten Wohnräumen erfolgen.

8.2 Entwicklungsaufgaben für Nachfolgeprojekte

Nachfolgeprojekte sollten vor allem das Ziel der weiteren Verbreitung des hier realisierten Planungsansatzes haben. Die Reduktion der Investitionsmehrkosten sollte daher im Vordergrund der weiteren Projektentwicklung stehen. Aus heutiger Sicht müsste das gleiche Einsparziel mittlerweile zu Mehrkosten von ca. 200 DM/m² erreichbar sein.

Weitere Punkte die in nachfolgenden Projekten realisiert werden sollten sind:

- Die weitere Reduktion des Strombedarfes im Bereich Haushalt und Haus-technik.
- Klärung der Massenströme in Lüftungssystem. Gegebenenfalls Vergleich mit dezentralen bzw. semizentralen Systemkonzepten.
- Die Integration von Technikzentrale und Wärmeverteilung innerhalb der beheizten Zonen.
- Reduktion von Wärmeverteilsystemen durch Realisierung von 2-Leiter statt 4-Leiter-Systemen.
- Verbesserte und standardisierte Überkopfverglasungen für Fotovoltaik.
- Stillstandssicherheit für solarthermische Anlagen.
- Sog-Wind Belastungen für aufgeständerte Kollektorfelder.

Anhang