

Passivhaus Vauban

- Zwischenbericht -

TOS-1-9804-Ufh-E06.2

Im Auftrag der Wohnen & Arbeiten GbR
mit Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
Förderkennzeichen 49007

Bearbeitung

M. Ufheil
Ch. Neumann
V. Bürger

Freiburg im November 98

Auftraggeber / Projektleitung:

Jörg Lange

WEG Wohnen & Arbeiten

Walter-Gropius-str.22

79100 Freiburg

Dieser Bericht enthält 77 Seiten einschließlich Anhang.

Fraunhofer ISE

Gruppe Solares Bauen

Freiburg, den 19.11.1998

Dr. K. Voss

Gruppenleiter
Solares Bauen

M. Ufheil

Projektleiter

Inhalt

1 Einleitung.....	5
2 Zusammenfassung und Empfehlungen.....	6
3 Datenbasis & Berechnungsverfahren.....	8
3.1 Datenbasis.....	9
3.2 Berechnungsverfahren.....	9
4 Zielkennwerte und Anforderungen an das Bauvorhaben.....	11
4.1 Baulicher Wärmeschutz.....	11
4.2 Haustechnik & Wärmeversorgung.....	11
4.3 Zielsetzungen im Bereich Mobilität.....	11
4.4 Ökologisches Sanitärkonzept.....	13
5 Gebäudekenndaten & Grundlagenermittlung.....	14
5.1 Kenndaten des Gebäudes und der Nutzung.....	14
5.2 Nutzenergiebedarf Brauchwasser.....	15
5.3 Energiebedarf der Biogasanlage.....	16
5.4 Innere Wärmequellen.....	17
6 Einsparkonzept: Bauliche Maßnahmen.....	18
6.1 Wärmeschutz.....	18
6.2 Luftdichtheit.....	21
7 Einsparkonzept: Haustechnik, Lüftung und Solarenergie.....	23
7.1 Lüftungsanlage.....	23
7.2 Erdreichwärmetauscher.....	24
7.3 Einsparmaßnahmen am Wärmeverteilsystem.....	25
7.4 Thermische Solarenergie.....	28
8 Raumklima & Tageslichtnutzung.....	32
8.1 Raumklima.....	32
8.2 Tageslichtsituation.....	36
8.3 Empfehlungen.....	40
9 Planung: Lüftung und Wärmeversorgung.....	41
9.1 Lüftungsanlage.....	41
9.2 Wärmebedarf.....	45
9.3 Wärmeversorgung.....	48
10 Energieversorgung (Wärme).....	55

10.1 Energiebilanz.....	55
10.2 Technische Konzeption der untersuchten Versorgungsvarianten.....	55
10.3 Emissionsbilanz.....	67
10.4 Kosten und Wirtschaftlichkeit.....	58
11 Elektrische Energieversorgung.....	61
11.1 Maßnahmen zur Energieeinsparung.....	62
11.2 Photovoltaik.....	66
11.3 Preis/Leistungsverhältnis elektrische Energie.....	66

1 Einleitung

Die Bauherrngemeinschaft „Wohnen & Arbeiten,“ errichtet im neuen Stadtteil Vauban in Freiburg erstmalig ein Passivhaus mit 5 Geschossen und ca. 1.400 m² Nutzfläche. Im Vergleich zu einem konventionellen Neubauvorhaben sollen die CO₂-äquivalenten Emissionen des Bauvorhabens um mehr als 80 % reduziert werden. Zusätzlich ist die Umsetzung eines ökologischen Sanitärkonzeptes vorgesehen.

Unter Einhaltung eines strengen Kostenplans soll erreicht werden, daß die Mehrkosten im Vergleich zum Standard weniger als 10 % bzw. 300 DM/m² betragen. Mit Einhaltung dieser Zielgröße wird erreicht, daß das Gesamtvorhaben, trotz der heute sehr niedrigen Energiepreise, eine statische Amortisationszeit von weniger als 20 Jahren aufweist.

Ein wichtiger Aspekt dieses Projektvorhabens ist es, durch die Kostenobergrenze eine bundesweite Übertragbarkeit zu gewährleisten.

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück unterstützt sowohl die Planungstätigkeiten und Maßnahmen im Bereich Energie als auch das ökologische Sanitärkonzept. Erst durch diese Unterstützung war es möglich, das Vorhaben von wissenschaftlicher Seite zu begleiten und zu dokumentieren.

2 Zusammenfassung und Empfehlungen

Das Energiekonzept des Passivhauses Vauban setzt auf hohen Wärmeschutz, aktive und passive Solarenergienutzung, Begrenzung der Lüftungswärmeverluste und den Einsatz rationeller Energiesysteme.

Nach den derzeitigen Berechnungen ist eine CO₂-Einsparung von 83% zu erwarten. Der Jahresheizenergiebedarf des Gebäudes beträgt 16.300 kWh/a. Bei einer Wohnfläche von 1.400 m² ergibt sich hiernach eine flächenbezogene Energiekennzahl von 11,6 kWh/m²a.

Um die Luftundichtheiten in der Gebäudehülle zu minimieren wurden die Anschlußdetails in Zusammenarbeit mit Planern und Handwerkern optimiert. Mehrere Luftdichtheitsmessungen dienen zur Kontrolle der Ausführungsqualität. Die eingesetzte Lüftungsanlage erreicht eine Rückwärmzahl von 82%. Die Beheizung erfolgt durch Heizkörper.

Die Solaranlage mit einer Fläche von 46 m² und einem Speichervolumen von insgesamt 3.600 l deckt 28% des Endenergiebedarfs. In den Monaten April bis September ist eine nahezu 100%ig Deckung des Energiebedarfs möglich.

Ein mit Erdgas betriebenes Klein-BHKW mit einer thermischen Leistung von 14,5 kW_{th} dient zur Wärme- und Stromerzeugung im Winter. Das Kleinkraftwerk dient als einziger Wärmeerzeuger. Die zur Verfügung stehende Leistung beträgt 10 W/m². Diese geringe Leistung sollte nach den Ergebnissen der dynamischen Simulation gerade zur Deckung des vorhandenen Wärmebedarfs ausreichen.

Weitere Stichworte.

- Optimierung entsprechend, PLV
- Grenzwerte Photovoltaik, alles was teurer ist wird nicht realisiert, wie z.B. wärmegeämmter Fensterrahmen, Erdwärmetauscher, etc.
- Gute PLV-Kennwerte für thermische Solarenergie.
- Sehr gute Kennwerte für oft vernachlässigte Maßnahmen im Bereich Haustechnik, (Wärmedämmung Rohre, Legionellenschaltung, Ausdehnungsgefäß, BHKW, Abgaswärmetauscher).
- Sehr gute Kennwerte für Energiespartechnik Elektro.
- Unerwartet schlechte Werte für Lüftung trotz vergleichsweise geringer Investitionskosten und obwohl ohne Berücksichtigung von Fehlbedingung, Mehrkosten durch aufwendige Luftdichtungsmaßnahmen, Wartungskosten.
- Tageslichtsimulation: Glasanteil von 47% auf der Südseite sollte nicht unterschritten werden. Nordräume sind wenig belichtet und weniger als hochwertiger Wohnraum verwendbar.

- Keine bewegliche Abschattung, maximale Raumtemperatur ? °C. Feststehende oder flexible Abschattung im 3. OG erforderlich. Entweder kein Balkon (um Solargewinne zu maximieren) oder mehr als 80cm um auf Abschattung verzichten zu können. Bei > 80cm freie Wahl durch Nutzer.
- Bedeutung der Wärmeverluste wurde unterschätzt und ist erst im Laufe der Berichterstellung erkannt worden. Eventuell dadurch Heizleistung des BHKW nicht ausreichend. Weitere Simulationen werden folgen. Anteil der Wärmeverluste bezogen auf Heizenergiebedarf bezogen angeben.

	Nutzung [a]	Mehrkosten [DM]	Einsparung [kWh/a]	PLV [DM/kWh]
Dämmung				
Außenwand 36cm	30	58.394	41.178	0,05
Dach 43cm	30	28.413	7.809	0,12
Boden 20cm	30	19.553	10.430	0,06
Verglasung				
3-fach-Verglasung (kv=0,6; g:0,42)	25	30.760	7.023	0,18
3-fach-Verglasung (kv=0,7; g:0,60)	25	69.210	12.448	0,22
Abstandshalter	25	3.845	1.310	0,12
Wärmegeämmter Rahmen	25	208.890	8.207	1,02
Haustechnik				
BHKW	20	31.200	38.997	0,04
Abgaswärmetauscher	20	3.000	7.295	0,02
Dämmung Verteilsystem	25	1.900	1.731	0,04
Lüftung mit Wärmerückgewinnung	20	117.561	28.900	0,20
Lüftung mit Abluftwärmepumpe	20	48.938	21.690	0,11
Erdreichwärmetauscher	30	15.800	500	1,05
Warmwasserbereitung				
Solaranlage	25	42.800	20.625	0,08
Dämmung Verteilsystem	25	2.223	2.132	0,04
Keine Legionellenschaltung	1	150	3.502	0,04
Dämmung AD-Gefäß	25	200	400	0,02
Elektrische Energie				
Energiesparende Haushaltsgeräte	15	8.150	9.960	0,05
Photovoltaik	25	15.000	2.850	0,21

3 Planungsbeteiligte

Statik:

Prüfstatik:

bitte Adressen für o.g bei M. Gies anfragen.

Architekt:

Michael Gies,
Erwinstraße 10
79102 Freiburg

Tel: 0761-7073701
Fax: 0761-7073704

Bauherr, Ansprechpartner für Biogas:

Jörg Lange,
Walter-Gropiusstr. 22
79100 Freiburg

Tel: 0761-456833-34

Fraunhofer ISE:

Haustechnik & Sanitär:

Fa. Krebsler & Freyler
Uwe Häberle, Olaf Seiter ,
Rieglerstr. 22
79331 Tenigen

Tel: 07641-9111-0 Zentrale
Fax: 07641-9111-40

4 Datenbasis & Berechnungsverfahren

4.1 Datenbasis

4.1.1 Arbeitsunterlagen.

Es wurden folgende Unterlagen verwendet:

- Entwurf, M 1:100, Stand: 11.12.97.
- Lageplan, M 1:500, Stand: 28.11.97, Flurstk. 31004/3.
- Entwurfsplanung Haustechnik, 6.3.98

4.2 Berechnungsverfahren

4.2.1 Wärme

Die Bilanzierung des Jahresheizenergiebedarfs erfolgte mit folgenden Berechnungsverfahren:

- Nachweisverfahren für den Passivhausstandard nach dem „Leitfaden energiebewußte Gebäudeplanung (LEG/Ph)“¹.
- Nachweisverfahren für den Passivhausstandard nach Modifikation des LEG/Ph durch das Ingenieurbüro ebök in Tübingen im Auftrag der Stadt Freiburg². Hierbei wurde das LEG/Ph-Verfahren mit Unterstützung durch die Fa. ebök speziell auf Freiburger-Verhältnisse angepaßt.
- Dynamisches Simulationsmodell TRNSYS³.

Die Ermittlung wärmetechnischer Kennwerte erfolgt in Anlehnung an folgende Standardwerke.

- Vornorm DIN 4108⁴.
- Passivhaus Projektierungspaket⁵.
- Anleitung zum Nachweis des Niedrigenergiehausstandards (Freiburger Verfahren), Stadt Freiburg, Juli 1997.

4.2.2 Elektrische Energie

Die Bilanzierung des elektrischen Energiebedarfs erfolgte in Anlehnung an

¹ Nachweisverfahren für den Passivhaus-Standard, IWU Darmstadt Oktober 1995.

² Modifiziertes Nachweisverfahren für die Stadt Freiburg zur Berechnung des Passivhausstandards, ebök, Tübingen, 1997.

³ TRNSYS, Version 14.2, TRANSSOLAR, Stuttgart 1997.

⁴ Vornorm vom März 1998, DIN 4108-4 bis DIN 4108-7.

⁵ Passivhaus Projektierungs Paket, Passivhaus Institut, Dr. W. Feist, Darmstadt 1998.

folgende Quellen:

- Passivhaus Projektierungspaket.
- SIA 380/4⁶.

4.2.3 Tageslichtnutzung

Die Berechnungen zur Tageslichtnutzung erfolgten mit dem Programm RADIANCE⁷.

4.2.4 Preis-Leistungs-Verhältnis

Als Anhaltspunkt für die wirtschaftliche Optimierung gilt das Preis-Leistungs-Verhältnis (PLV) einer Maßnahme. Das Preis-Leistungs-Verhältnis ist wie folgt definiert:

$$PLV = \frac{\text{Investitionsmehrkosten}}{\text{Energieeinsparung} * \text{Nutzungsdauer}}$$

Der PLV-Wert erlaubt eine pauschale Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme. Maßnahmen mit kleinen Kennwerten sind wirtschaftlicher als Maßnahmen mit großen Kennwerten. Bei einem Kennwert von mehr als 0,05 ist die Maßnahme bei heutigen Energiepreisen unwirtschaftlich. Als oberer Grenzwert gilt ein PLV-Wert von 0,21. Dieser PLV-Wert wird von einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage erreicht. Maßnahmen die den oberen Grenzwert überschreiten werden nicht realisiert. Statt dessen erfolgt eine Vergrößerung der Photovoltaikanlage.

⁶ Elektrische Energie im Hochbau, SIA 380/4, Schweizer Ingenieur- und Architekten Verein, Zürich, 1995.

⁷ Ward Gregory, The RADIANCE 3.0, University of California, 1996

5 Zielkennwerte und Anforderungen an das Bauvorhaben

Durch Optimierung von Haustechnik, Wärmeversorgung und baulichem Wärmeschutz soll erreicht werden, daß die klimarelevanten Emissionen (CO₂-Äquivalente) im Vergleich zu einem konventionellen Neubauvorhaben um mehr als 80 % reduziert werden.

5.1 Baulicher Wärmeschutz

Im Bereich des baulichen Wärmeschutzes wird ein Jahresheizenergiebedarf von unter 15 kWh/m_a angestrebt. Dieser zeichnet sich durch folgende Eckdaten aus.

- Hoch wärmegeämmte Außenhülle.
- Energetisch optimierte Grundrisse zur passiven Solarenergienutzung.
- Minimierte Wärmebrücken und luftdichte Gebäudehülle.
- Lüftungsanlage mit einem thermischen Wirkungsgrad von mehr als 80 %.

Der hochwertige Baustandard soll wo immer möglich mittels ökologischer Baumaterialien realisiert werden.

5.2 Haustechnik & Wärmeversorgung

Im Bereich Haustechnik und Wärmeversorgung sind folgende Maßnahmen vorgesehen:

- Minimierte Zirkulations- und Bereitstellungsverluste bei der Warmwasserbereitung durch verbesserte Dämmung und kurze Leitungswege.
- Thermische Solaranlage zur Unterstützung der Warmwasserbereitung.
- Effizientes Heizsystem zur Bereitstellung des verbleibenden Nutzenergiebedarfs.

5.3 Zielsetzungen im Bereich Mobilität

Der Verkehrsbereich wird heute nur selten mit dem Thema „energiesparendes Bauen“ verbunden. Ausgehend von einer durchschnittlichen Kilometerleistung von 12.700 km pro PKW und Jahr und einem Benzinverbrauch von 9,1 l pro 100 km (Durchschnittsverbrauch BRD West) ergibt sich entsprechend der Freiburger Daten mit 440 PKW pro 1000 Einwohner folgendes Bild⁸.

⁸ Öko-Institut 1995, Klimaschutzkonzept für die Stadt Freiburg, Teilbericht1; Freiburg 1995

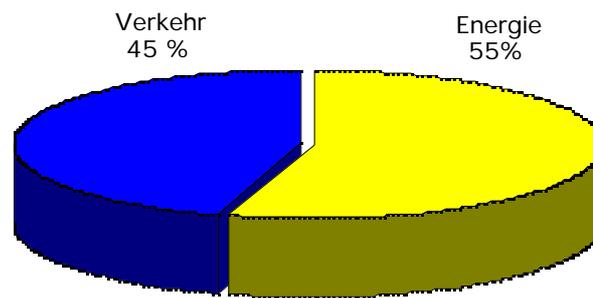


Abb. 1: Anteilige Klimagasemissionen in den Bereichen Energie (Raumwärme, Brauchwasser, Elektrizität) und Verkehr (nur PKW) bei gewöhnlichen Neubauvorhaben nach neuer Wärmeschutzverordnung.

Bereits bei einem gewöhnlichen Neubauvorhaben entsprechen die Klimaemissionen im Bereich Verkehr annähernd der Summe der Emissionen aus den Sektoren Raumwärme, Brauchwasser und Elektrizität. Eine klimagerechte Planung erfordert damit die Einbeziehung eines integrierten Verkehrskonzeptes. Im Rahmen des Modellvorhabens wird angestrebt, die klimabedingten CO₂-Emissionen im Vergleich zum BRD-Durchschnitt um mindestens 50 % zu senken.

Hierbei sind folgende Maßnahmen vorgesehen:

- Nutzungsmischung im Haus: Im Haus befinden sich Wohn- und Arbeitsräume. Die durchschnittliche Entfernung von Wohnung und Arbeitsplatz beschränkt sich auf ein Minimum.
- Minimierte Nutzung von PKW durch Car Sharing, minimierte Stellplätze und verstärkte Nutzung des ÖPNV.

5.4 Ökologisches Sanitärkonzept

Grundlegende Idee des Abfall- und Abwasserkonzeptes ist es, die Teilströme Urin und Fäkalien zu trennen, mit möglichst wenig Wasser zu transportieren und in einer Biogasanlage zusammen mit organischen Küchen- und Gartenabfällen zu behandeln. Die verbleibenden Rückstände aus der Biogasanlage sollen als vollwertiger Dünger in der Landwirtschaft ausgebracht werden.

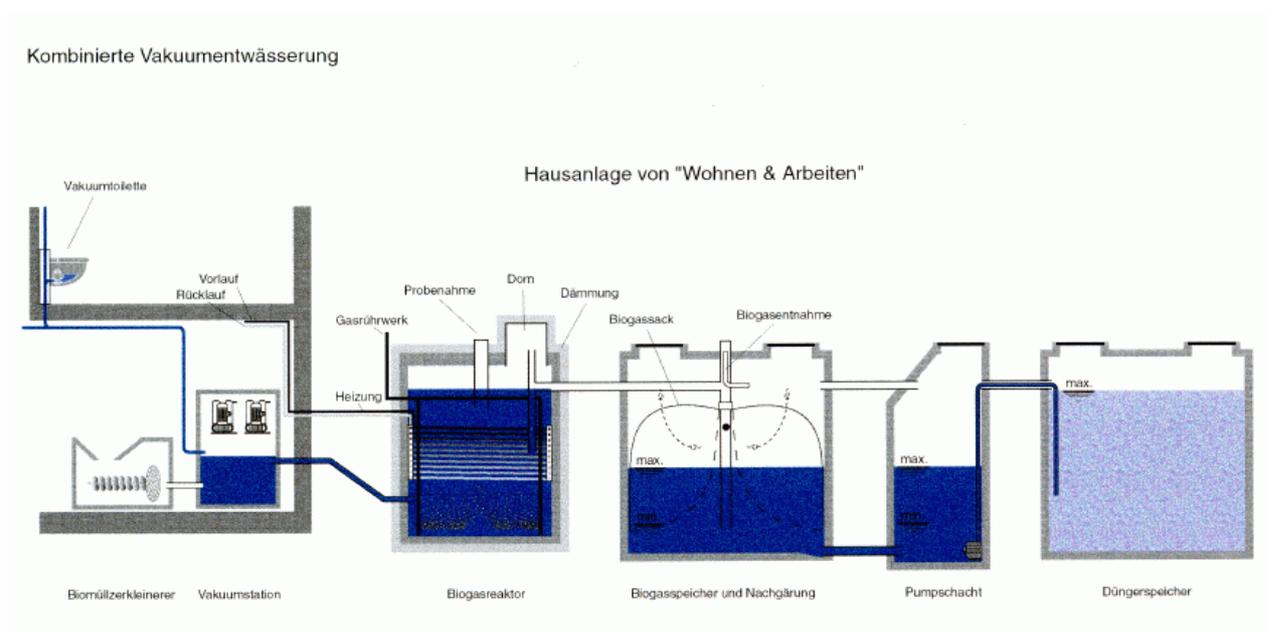
Das entstehende Biogas wird zum Kochen verwendet. Es trägt damit zur Minimierung der CO₂-äquivalenten Emissionen bei. Die Beheizung des Biogasreaktors erfolgt vorrangig durch regenerative Wärmequellen.

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. 2: Ökologisches Sanitärkonzept



6 Gebäudekenndaten & Grundlagenermittlung

6.1 Kenndaten des Gebäudes und der Nutzung

Tab. 1: Kenndaten des Bauvorhabens

Beheiztes Volumen	3.699 m ³
Bruttovolumen	5.369 m ³
A/V-Verhältnis	0.33
Beheizte Wohnfläche	1.396 m ²
Wohneinheiten	20
Nutzung	Ganztägig
Bewohner / Nutzer	40 Pers.



Abb. 3: Bauvorhaben Mehrfamilienhaus Vauban (Darstellung nicht originalgetreu)

6.2 Nutzenergiebedarf Brauchwasser

Tab. 2: Kenndaten Brauchwasserbedarf

Täglicher Bedarf	40l/Pers
Kaltwasser- / Warmwasser	10°C/45°C
Nutzenergiebedarf	23.789 kWh/a

Das Entnahmeprofil des Brauchwassers, das für die dynamische Simulation der Solaranlage gewählt wurde, ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

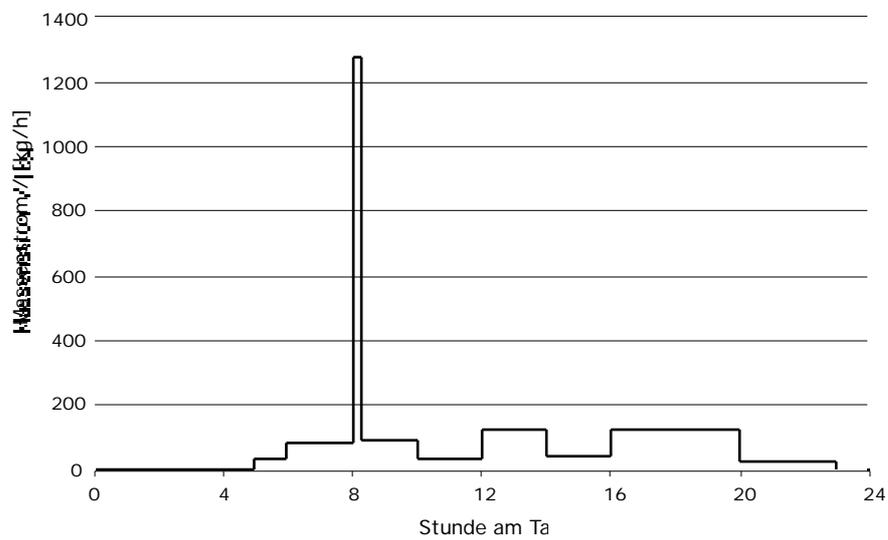


Abb. 4: Entnahmeprofil: Brauchwasser

6.3 Energiebedarf der Biogasanlage

Der Biogasreaktor hat ein Volumen von 11,4 m³. Um einen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten, ist eine ganzjährige Temperierung des Reaktors auf 35°C zu gewährleisten. Der Wärmebedarf ist erforderlich zur Deckung von Transmissionswärmeverlusten, sowie zur Erwärmung des frischen Substrats.

Tab. 3: Wärmebedarf der Biogasanlage

	Wärmebedarf [kWh/a]
Transmissionswärmeverluste	1.935
Verluste an Armaturen	390
Substraterwärmung	2410
Summe	4.735
Rechenwert für Simulation	5.150

Tab. 4: Gasertrag der Biogasanlage

	[kWh/a]
Brutto-Ertrag	ca. 13.000
Netto-Ertrag ⁹	ca. 8.000

Etwa 1/3 des produzierten Biogases wird zur Aufheizung von Substrat und zur Deckung von Transmissionswärmeverlusten benötigt, hinzu kommen die Aufwendungen für den Hilfsenergiebedarf. Das Biogas soll in der ersten Stufe zum Kochen (auf Gasherden) verwendet werden. Der Energiebedarf für Kochen beträgt etwa 5.000 kWh/a.

Ökonomie und Energiebilanz der Biogasanlage werden im Rahmen der Energiekonzeption nicht weiter betrachtet, da dies ein separater Arbeitspunkt des Forschungsprojektes „Ökologisches Sanitärkonzept“ ist. Dort werden neben der Energieeinsparung auch die anderen z.T. noch wichtigeren Aspekte der Biogasnutzung berücksichtigt, wie z.B.

- Minimierung des Frischwasserbedarfs.
- Minimierung von Abwässern.
- Vergärung von Abfällen und Abwässern zu organischem Dünger.

⁹ Im Nettoertrag der Biogasanlage wurde der erforderliche Hilfsenergiebedarf nicht berücksichtigt, da dieser zu diesem Zeitpunkt noch nicht definiert werden kann.

6.4 Innere Wärmequellen

Zur Berechnung des Nutzenergiebedarfs für Raumwärme sowie zur Berechnung des thermischen Verhaltens des Gebäudes werden folgende interne Wärmequellen angesetzt:

- Elektrische Energie:
Der elektrische Energiebedarf der Haushalte wird zu 100 % als interne Wärmequelle bilanziert.
- Personen:
Entsprechend der angeführten Nutzung wird je Person eine Leistung von 70 W in Ansatz gebracht.
- Kalt- und Warmwasser:
Wärmeströme durch Kalt- und Warmwasser werden nicht in Ansatz gebracht, da davon ausgegangen wird, daß sich Wärmeleistung (Warmwasser) und Wärmeentzug (Kaltwasser) weitgehend neutralisieren.
- Haustechnik:
Für die Verluste der verschiedenen Speicher (Brauchwasser, Biogas) wurden 680 W angesetzt, für die Wärmeabgabe der Lüftungsanlage 240 W. Die Abwärme kommt dem Technikraum im Untergeschoß zugute.

Tab. 5: Kenndaten bei der Bilanzierung der internen Wärmegewinne

	Leistung [W]	Betriebszeiten
Personen	2.800	Ganztägig (nach Anwesenheitsplan)
Haushaltsgeräte	1.400	Ganztägig
Haustechnik	920	Ganztägig (nur UG)

Tab. 6: Anwesenheitsplan Personen

Uhrzeit	Anwesenheit in %
0:00 bis 8:00	100
8:00 bis 17:00	40
17:00 bis 24:00	100

7 Einsparkonzept: Bauliche Maßnahmen

Die Minimierung des Jahresheizenergiebedarfs erfolgt vorrangig nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Ziel ist es, den vorgegebenen Passivhausstandard mit einem Zielkennwert von 15 kWh/m_a bei minimalem Investitionskostenaufwand zu erreichen.

Die Berechnung von Energiekennzahl und Energieeinsparung erfolgt auf der Basis des Freiburger Nachweisverfahrens für den Passivhausstandard (LEG/Ph Freiburg). Die Energieeinsparung des Erdreichwärmetauschers wird mit Hilfe einer dynamischen Simulation bilanziert.

7.1 Wärmeschutz

Ausgehend von einem Wärmedämmstandard nach Vorgaben der Wärmeschutzverordnung '95 (WSVO '95) werden für das betrachtete Gebäude verschiedene Einflußgrößen wie Dämmstärke, Lüftung und passive Solarenergienutzung bilanziert. Die Daten der Referenzvariante sind in nachfolgender Tabelle zusammengefaßt.

Tab. 7: Referenzvariante: Wärmedämmstandard und Lüftung nach Wärmeschutzverordnung '95

Bauteile		
Dach	Dämmung: 10 cm, k = 0.340 W/m_K	
Außenwand	Dämmung: 6 cm, k = 0.685 W/m_K (Mittelwert)	
Boden	Dämmung: 5 cm, k = 0.801 W/m_K	
Verglasung	2-fach WSV, Argon, g = 0.58, k _v = 1,4 W/m_K	
Lüftung		
Luftwechsel	0,60 1/h	
Wärmerückgewinnung	nicht vorhanden	
Energiebedarf nach LEG/Ph	133.140 kWh/a	(94,4 kWh/m_a)
Grenzwert nach WSVO' 95		64,9 kWh/m²a

Um eine Energiekennzahl von 15 kWh/m_a zu erreichen, muß der Wärmedämmstandard der Referenzvariante deutlich erhöht werden. Als Anhaltspunkt für die wirtschaftliche Optimierung gilt dabei das Preis-Leistungs-Verhältnis (PLV). Dieses ergibt sich aus:

$$PLV = \frac{\text{Investitionsmehrkosten}}{\text{Energieeinsparung} * \text{Nutzungsdauer}}$$

Der PLV-Wert erlaubt eine pauschale Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme. Maßnahmen mit kleinen Kennwerten sind wirtschaftlicher als Maßnahmen mit großen Kennwerten. Bei einem Kennwert von mehr als 0,05 ist die Maßnahme bei heutigen Energiepreisen unwirtschaftlich. Als oberer Grenzwert gilt ein PLV-Wert von 0,21. Dieser PLV-Wert wird von einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage erreicht. Maßnahmen, die den oberen Grenzwert überschreiten, werden nicht realisiert. Statt dessen erfolgt eine Vergrößerung der Photovoltaikanlage.

Für den baulichen Wärmeschutz ergeben sich nachfolgende Kennwerte:

Tab. 8: Preis-Leistungs-Verhältnis baulicher Wärmeschutz

Beschreibung		Nutz- ung	Mehrkosten Material	Mehrkosten Raum-ver- lust	Ein-spa- rung	PLV Material	PLV Material inkl. Raumverl.
		[a]	[DM]	[DM]	[kWh/a]	[DM/kWh]	[DM/kWh]
Dämmung Dach	10 cm	30	0,00	0,00	0		
	20 cm	30	8.610	24.539	4.620	0,06	0,24
	30 cm	30	17.220	49.077	6.553	0,09	0,34
	35 cm	30	21.525	61.346	7.136	0,10	0,39
	40 cm	30	25.830	73.616	7.584	0,11	0,44
Dämmung AW	6 cm	30	0,00	0,00	0		
	10 cm	30	8.054	22.955	19.921	0,01	0,05
	20 cm	30	28.190	80.343	32.849	0,03	0,11
	30 cm	30	48.326	137.730	39.178	0,04	0,16
	35 cm	30	58.394	166.424	40.902	0,05	0,18
	40 cm	30	68.462	195.118	42.284	0,05	0,21
Dämmung Boden	5 cm	30	0,00	0,00	0		
	10 cm	30	6.518	12.383	7.452	0,03	0,08
	15 cm	30	13.035	24.767	9.483	0,05	0,13
	20 cm	30	19.553	37.150	10.430	0,06	0,18

	Beschreibung	Nutz- ung [a]	Mehrkosten Material [DM]	Mehrkosten Raum-ver- lust [DM]	Ein-spa- rung [kWh/a]	PLV Material [DM/kWh]	PLV Material inkl. Raumverl. [DM/kWh]
Verglasung	2-fach WSV, Argon $k_v = 1.2 \text{ W/m}_K$, $g = 0,58$	25	0,00	0,00	0		
	2-fach WSV, Krypton $k_v = 1.1 \text{ W/m}_K$, $g = 0,58$	25	7.690	0	5.763	0,05	0,05
	3-fach WSV, Krypton $k_v = 0,6 \text{ W/m}_K$, $g = 0,42$	25	30.760	0	7.023	0,18	0,18
	3-fach WSV, Krypton $k_v = 0,7 \text{ W/m}_K$, $g = 0,6$	25	69.210	0	12.448	0,22	0,22
	Thermische Abstandshalter	25	3.845	0	1.310	0,12	0,12
	Gedämmte Fensterrahmen	25	208.890	0	8.207	1,02	1,02

Mit dem PLV der Materialkosten kann eine Reihenfolge der durchzuführenden Maßnahmen erstellt werden. Dementsprechend sollten zunächst die Außenwände, das Dach und der Boden im EG stärker gedämmt werden. Danach folgt der Einbau besserer Fenster. Um den geforderten Zielkennwert für den Heizenergiebedarf zu erreichen, müssen alle Maßnahmen umgesetzt werden.

Wenn die Außenmaße des Gebäudes durch die Vorgaben des Bebauungsplans nicht verändert werden können, bedeutet jede zusätzliche Dämmung gleichzeitig eine Verkleinerung der Nutzfläche. Aus diesem Grund sind in oben stehender Tabelle neben dem Mehraufwand für Material auch die Kosten infolge von Raumverlust bilanziert. Dabei wird deutlich, daß sich das Preis-Leistungs-Verhältnis der Dämmmaßnahmen wesentlich verschlechtert.

Da das Baufenster des Passivhaus Vauban nicht weiter überbaut werden kann, wurde die Außenwanddämmung auch nach dem Raumverlust bewertet. Bei Dach und Boden wurden die Materialkosten lediglich betrachtet, gingen allerdings nicht in die Bewertung ein, da die Gebäudehöhe die zulässige Grenze noch nicht erreicht hat.

Auf der Basis der PLV-Werte wurde der bauliche Wärmeschutz der Gebäudehülle wie folgt modifiziert.

Tab. 9: Wärmedämmstandard Passivhaus Vauban

Bauteile		
Dach	Dämmung: 43 cm, k = 0.098 W/m_K	
Außenwand	Dämmung: 36 cm, k = 0.138 W/m_K (Mittelwert)	
Boden	Dämmung: 20 cm, k = 0.160 W/m_K	
Verglasung	3-fach WSV, Krypton, g = 0.6, k _v = 0,7 W/m_K	
Lüftung		
Luftwechsel	0,40 1/h	
Wärmerückgewinnung	80%	
Energiebedarf nach LEG/Ph	18.463 kWh/a	(13,2 kWh/m_a)

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Bauteile findet sich in Anhang 1.

7.2 Luftdichtheit

Die Luftdichtheit der Gebäudehülle entscheidet wesentlich über den Nutzen einer Lüftungswärmerückgewinnung. Nachfolgende Tabelle bilanziert den Einfluß unterschiedlicher Dichtheiten am Beispiel des untersuchten Gebäudes. Zur Gewährleistung der Luftdichtheit wird neben einer detaillierten Planung insbesondere eine frühzeitige Dichtigkeitsprüfung nach ISO/DIS 9972 (Blower Door Messung) in der Phase des veredelten Rohbaus durchgeführt.

Beim Passivhaus Vauban bestehen strengste Anforderungen an die Dichtheit der Gebäudehülle. Entsprechend der nachfolgend angeführten Kennwerte ist ein n_{50} -Kennwert $< 0,5 \text{ h}^{-1}$ beim vorliegenden Projektvorhaben zwingend notwendig.

Tab. 10: Einfluß der Dichtheit der Gebäudehülle¹⁰

n_{50} : Luftwechsel bei 50 Pa Über- oder Unterdruck	n_z : Fugenluftwechsel infolge Wind und Auftrieb ¹¹	Anforderungen an die Dichtheit der Gebäudehülle	Jahresheizwärmebedarf	Energieeinsparung
5,0 h ⁻¹	0,20 h ⁻¹	wenig dicht	21,1 kWh/m_a	0,0 kWh/m_a
2,0 h ⁻¹	0,08 h ⁻¹	hohe Anforderungen, Nierigenergiebauweise	16,3 kWh/m_a	4,8 kWh/m_a
0,5 h ⁻¹	0,02 h ⁻¹	sehr hohe Anforderungen, Passivhaus	13,2 kWh/m_a	7,9 kWh/m_a

¹⁰ Die Berechnungen erfolgten mit Hilfe des Passivhausrechenverfahrens.

¹¹ Ermittlung des Fugenluftwechsel n_z entsprechend DIN V 4108-6 (4/95) bei windgeschützter Lage (Windschutzkoeffizient: 0,04).

Läge der n_{50} -Wert dem heutigen Baustandard entsprechend bei $5,0 \text{ h}^{-1}$, steigt der Heizenergiebedarf um ca. 60 % auf $21,1 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ an.

Zur Gewährleistung der Luftdicht wurden folgende Maßnahmen ergriffen.

- Planungsgespräche mit dem Architekten M. Gies im Rahmen der Vorplanung (3/98-4/98). Es wurden zu allen kritischen Anschlußpunkten Details entwickelt, die im Maßstab 1:5 protokolliert wurden. Einige wichtige Details sind Anhang 4 zu entnehmen.
- Abstimmungsgespräch mit Zimmermann, Architekt, Fachfirma für Blower Door Test (8/98). Hierbei wurden alle entwickelten Details gemeinsam besprochen. Weiterhin wurden folgende Punkte geklärt:
 - Als Luftdichtungsebene wird anstatt OSB eine PE-Folie verwendet, da das Abkleben der OSB-Platten teurer wäre.
 - Die Leichtbauelemente der Außenwand werden jeweils luftdicht an die vorhandene massive Skelettbauweise angeschlossen. Anschluß nur mit speziellen hierfür geeigneten Klebern.
 - Die Verantwortung für den luftdichten Anschluß aller Leichtbauelemente (inkl. Dach) liegt im Bereich der Zimmermannsarbeiten.
 - Die Verantwortung für den luftdichten Anschluß der Fenster liegt im Bereich des Fensterbauers. Dieser wird zum gegebenen Zeitpunkt instruiert werden.
 - Es erfolgt zunächst die Montage der Leichtbauelement ohne Installationsebene. Danach wird die Luftdichtung ausgeführt. Die Ausführung wird mittels Luftdichtigkeitstest überprüft und bei Bedarf nachgebessert. Erst nach Erreichen des Zielkennwertes von $n_{50}=0,5 \text{ h}^{-1}$ wird der Innenausbau weiter geführt.
 - Nach Abschluß aller Arbeiten erfolgt eine abschließende Messung. Eine Nachbesserung ist dann allerdings nicht mehr möglich.

8 Einsparkonzept: Haustechnik, Lüftung und Solarenergie

8.1 Lüftungsanlage

Der niedrige Zielkennwert für den Jahresheizenergiebedarf von 15 kWh/m_a macht eine Lüftungswärmerückgewinnung mit hohem Nutzungsgrad notwendig. Ohne Lüftungswärmerückgewinnung läge der Heizenergiebedarf bei 32,7 kWh/m_a.

Tab. 11: Kostenvergleich Lüftungssysteme

	Beschreibung	Nutzung [a]	Mehrkosten [DM]	Einsparung Primärenergie ¹² [kWh/a]	PLV ¹³ [DM/kWh]
Fensterlüftung	$n_L=0,6 \text{ h}^{-1}$	-	0	0	-
Abluftanlage	$n_L=0,4 \text{ h}^{-1}$	20	70.590,-	9.951	0,35
Abluftanlage mit Wärmepumpe	$n_L=0,4 \text{ h}^{-1}$, Arbeitszahl: 4,5	20	48.938,-	21.690	0,11
Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung	$n_L=0,4 \text{ h}^{-1}$, Rückwärmzahl 80%	20	117.561,-	28.900	0,20

Trotz der sehr günstigen Voraussetzungen erreicht die Lüftungsanlage mit $PLV=0,21 \text{ DM/kWh}$ lediglich einen Wert, der in etwa dem Kennwert einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage entspricht.

Neben dem vergleichsweise ungünstigen Preis-Leistungs-Verhältnis ist weiterhin zu beachten, daß die ermittelte Einsparung der Lüftungsanlage nur erreicht wird, wenn der extrem hohe n_{50} -Kennwert (Luftdichtigkeit) von $0,5 \text{ h}^{-1}$ tatsächlich erreicht wird und die Bewohner Fenster und Türen nicht offen stehen lassen.

Sehr erstaunt waren die Planungsbeteiligten über die hohen Wärmeverluste im UG. Die vom Fraunhofer ISE vorgegebene Luftgeschwindigkeit von 3 m/s wurde unter Abwägung des Mehrbedarfs für die elektrische Antriebsenergie und der eingesparten Wärmeverluste nachträglich auf 5 m/s erhöht. Die Wärmeverluste konnten so von ursprünglich 12.000 kWh um 50 % reduziert werden. Der elektrische Energiebedarf stieg, auch aufgrund der hervorragenden Antriebstechnik, lediglich um 702 kWh an.

Die Betrachtung zu den Wärmeverlusten verdeutlicht, daß eine zentrale Beheizung über das Lüftungssystem geradezu verheerende Folgen gehabt hätte.

Die derzeitigen Kosten konnten nur erreicht werden, weil im Vorfeld der Pla-

¹² Elektrische Antriebsenergie wird mit Faktor 3,0 berücksichtigt.

¹³ Inkl. Gutschrift für geringeren Bedarf an Heizkörpern bei der Variante mit WRG in Höhe von ca. 30.000,-DM.

nung sowie nach Vorliegen der Ausschreibungsergebnisse konsequent auf eine Minimierung der Investitionskosten hingearbeitet wurde. So wurden u.a. folgende Maßnahmen realisiert:

- Marktanalyse im Bereich Zubehör (Brandschutzschotts, Luftauslässe, Irisblenden, etc.).
- Verwendung standardisierter Zu- und Abluftelemente statt manuell gefertigter Quellluftsysteme.
- Strikte Verwendung von Wickelfalzrohr statt Blechkanälen und statt Edelstahlrohren bei Außenluftansaugung und Fortluft.
- Erhöhung der Luftgeschwindigkeit im Bereich des UG auf bis zu 6 m/s, da die Energieeinsparung durch Minimierung der Wärmeverluste 8-fach höher ist als der zusätzliche elektrische Energiebedarf.

8.2 Erdreichwärmetauscher

Ein Erdreichwärmetauscher kann folgende Funktionen erfüllen:

- Zuluftvorwärmung im Winter auf ca. 8°C
- Kühlen der Zuluft im Sommer auf ca. 18°C - 22°C

Dimensionierung des Erdreichwärmetauschers:

- Luftgeschwindigkeit im Kanal: < 6 m/s.
- Länge: 8 x 40m.
- Durchmesser: DN 200.
- Verlegetiefe: 1,0 m Überdeckung.

Der potentielle Energieertrag des Erdreichwärmetauschers wurde mit dem dynamischen Simulationsprogramm TRNSYS ermittelt.

Tab. 12: Energieeinsparung durch Erdreichwärmetauscher

	Beschreibung	Mehrkosten [DM]	Einsparung Primärenergie ¹⁴ [kWh/a]	PLV [DM/kWh]
ohne EWT		0	0	-
mit EWT	ohne zusätzlicher elektrischer Energiebedarf	15.800,-	500	1,05

Die zusätzliche Energieeinsparung durch den Erdreichwärmetauscher ist minimal. Das Preis-Leistungs-Verhältnis ist deutlich schlechter als der Kennwert für eine Photovoltaikanlage. Würde der zusätzlich erforderliche elektrische Energiebedarf berücksichtigt, wäre ein noch schlechterer Kennwert erzielt worden.

¹⁴ Elektrische Antriebsenergie wird mit Faktor 3,0 berücksichtigt.

Weiterhin sei angemerkt, daß der hier getroffene Kostenansatz nur unter sehr günstigen Voraussetzungen erreicht werden kann. Der ursprüngliche Kostenansatz der Haustechnikplanung belief sich auf 45.000,- DM.

Da das Hauskonzept aufgrund der massiven Bauweise und der passiven Abschattung durch Balkone keine sommerliche Kühlung benötigt, war auch die Kühlleistung des Erdreichwärmetauschers nicht erforderlich.

Aufgrund der gegebenen ökonomischen Daten wurde auf den Einbau des Erdreichwärmetauschers verzichtet.

8.3 Einsparmaßnahmen am Wärmeverteilsystem

8.3.1 Raumheizung

Die Wärmeverluste des Wärmeverteilsystems der Heizungsanlage betragen allein im UG ca. 9.560 kWh/a. Dies entspricht etwa 52 % des Jahresheizwärmebedarfs. Ausgehend von einem Wärmedämmstandard nach Heizungsanlagenverordnung mit einer Dämmstärke entsprechend des einfachen Rohrdurchmessers werden nachfolgend Mehrkosten und Energieeinsparung einer verbesserten Wärmedämmung entsprechend des zweifachen Rohrdurchmessers bilanziert.

Tab. 13: Preis-Leistungs-Verhältnis: Wärmedämmung des Wärmeverteilsystems Raumheizung

DN	Länge	Wärmeverluste bei Dämmung 100%	Wärmeverluste bei Dämmung 200%	Mehrkosten Dämmung 200%	PLV bzgl. einfacher Dämmung
	[m]	[kWh/m*a]	[kWh/m*a]	[DM]	[DM/kWh]
Untergeschoß					
20	100	38,0	27,9	319	0,01
25	145	38,9	28,2	989	0,03
32	30	39,8	28,5	205	0,02
50	20	41,0	28,8	255	0,04
Schacht					
15	125	27,4	20,6	399	0,02
20	15	28,5	20,9	48	0,02

Die Bilanz zeigt ein sehr gutes Preis-Leistungs-Verhältnis. Die Dämmstärke des Wärmeverteilsystems im UG wird daraufhin auf den zweifachen Rohrdurchmesser erhöht.

Im Vergleich zu den ökonomischen Daten anderer Energiesparsysteme müßte eigentlich eine noch stärkere Wärmedämmung vorgesehen werden. Hier

sind allerdings keine marktgängigen Standardprodukte erhältlich, so daß die Mehrkosten deutlich ansteigen.

8.3.2 Brauchwarmwasser

Wärmedämmung

Die Wärmeverluste des Brauchwasserverteilsystems (Warmwasserleitungen, Zirkulationsleitungen) sind im Vergleich zu den Wärmeverlusten der Raumheizung noch deutlicher höher, da hier ein ganzjähriger Betrieb vorliegt. Insgesamt betragen die Wärmeverluste im UG ca. 7.759 kWh/a. Dies entspricht etwa 42 % des Jahresheizwärmebedarfs.

Tab. 14: Preis-Leistungs-Verhältnis: Wärmedämmung des Wärmeverteilsystems Brauchwasser

DN	Länge [m]	Wärmeverluste bei Dämmung 100% [kWh/m*a]	Wärmeverluste bei Dämmung 200% [kWh/m*a]	Mehrkosten Dämmung 200% [DM]	PLV bzgl. Einfacher Dämmung [DM/kWh]
Untergeschoß					
15	50	59,2	44,5	165	0,01
20	40	61,6	45,3	132	0,01
25	10	63,1	45,8	55	0,01
32	25	64,5	46,2	258	0,02
40	10	65,6	46,5	157	0,03
Schacht					
15	80	44,4	33,4	264	0,01
20	30	46,2	34,0	99	0,01
25	50	47,3	34,3	275	0,02
32	5	48,4	34,7	52	0,03

Die erzielten PLV-Kennwerte sind sehr gut. Eine verbesserte Wärmedämmung bei der Brauchwasserverteilung ist zwingend erforderlich.

Nutztemperaturniveau

Als Nutztemperaturniveau an der weitest entfernten Entnahmestelle genügt ein Temperaturniveau von 45°C, um allen geforderten Brauchwarmwasseranwendungen zu genügen.

Die Einhaltung dieses niedrigen Nutztemperaturniveaus ist bei Ausführung eines Neubauvorhabens allerdings nicht möglich, da aufgrund eines möglichen

Legionellenbefalls eine minimale Rücklauftemperatur von $55 \pm 5^\circ\text{C}$ einzuhalten ist (siehe Arbeitsblatt „DVGW-Regelwerk, W 55115“). Durch die Ausführung entsprechend des DVGW-Regelwerks würden die Wärmeverluste nochmals um 12 % ansteigen.

Um diese zusätzlichen Wärmeverluste zu vermeiden, kann auf das DVGW-Regelwerk W 55216 zurückgegriffen werden. Dieses Regelwerk gilt eigentlich für Altanlagen (aber auch für Anlagen, die die DVGW W 551 nicht erfüllen). Die DVGW W 552 verlangt eine orientierende Untersuchung, um eine eventuelle Kontamination feststellen zu können. Bei negativem Befund ist nach einem Jahr eine weitere Untersuchung erforderlich. Bei zweimaligem negativem Befund kann der Untersuchungszeitraum auf 3 Jahre ausgedehnt werden.

8.3.3 Zusammenfassung

Eine verstärkte Wärmedämmung des Wärmeverteilsystems ist sehr ökonomisch und zur Erreichung des Zielkennwerts des Bauvorhabens unbedingt erforderlich. Das Nutztemperaturniveau der Brauchwasserbereitung sollte auf ein Minimum (ca. 45°C) abgesenkt werden.

Mit der Ausführung dieser Maßnahmen ergibt sich nachfolgende Energiebilanz für den Bereich der Wärmeverteilverluste. Zusätzliche Wärmeverluste an Armaturen wurden mit 50 % des Rohrleitungssystems bewertet.

Tab.15: Wärmeverteilverluste Raumheizung und Brauchwarmwasser

Wärmeverluste [kWh/a]	Rohrleitung	Armaturen	Gesamt	WSVO'95
Raumheizung				
Untergeschoß	6.374	3.187	9.561	17.264
Warmwasser				
Untergeschoß	5.173	2.586	7.759	12.867
Schacht	2.141	1.071	3.212	5.829
Summe	13.688	6.844	20.532	35.960

Trotz der deutlich verbesserten Wärmedämmung sind die Wärmeverluste beachtlich. Sie betragen immer noch 111 % des gesamten Jahresheizwärmebedarfs.

¹⁵ DVGW Regelwerk, W 551, 03/93, DVGW Bonn

¹⁶ DVGW Regelwerk, W 552, 04/96, DVGW Bonn

8.4 Thermische Solarenergie

Ertrag und thermisches Verhalten des Solarsystems wurden mit dem Simulationsprogramm TRNSYS berechnet. Nachfolgende Abbildung zeigt ein vereinfachtes Schema der berechneten Anlage.

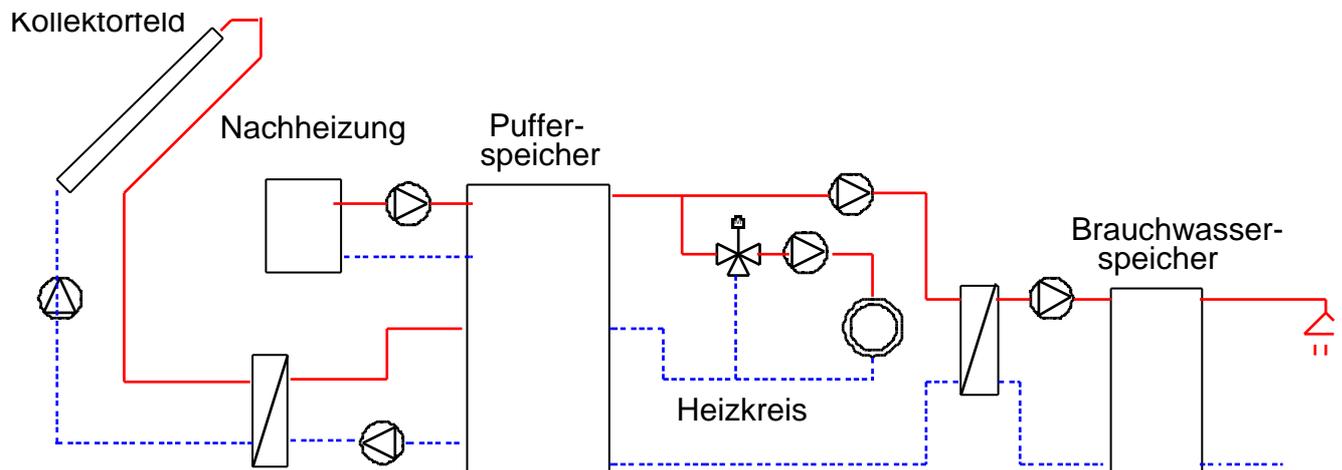


Abb. 5: Vereinfachtes Schaltschema der Solaranlage

Die Solaranlage besteht aus dem Kollektortfeld und der Speichergruppe. In den Pufferspeicher werden sowohl Solar- als auch Nachheizenergie eingespeist. Der Heizkreis ist direkt an den Pufferspeicher angeschlossen, während der Brauchwasserspeicher über einen externen Wärmetauscher beladen wird.

Nicht in das Schema eingetragen sind die Zirkulationsleitungen für das Brauchwasser und eine mögliche Wärmeversorgung der Biogasanlage vom Pufferspeicher aus. Für die Simulation wurden folgende Annahmen getroffen:

Tab. 16: Energiebilanz: Passivhaus Vauban

Heizenergiebedarf ($T_{\text{vor}}/T_{\text{rück}} = 70^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$)	16.300 kWh
Warmwasserbedarf	1600 l/d (40 l/Person am Tag) mit 45°C
Zirkulationsverluste	9.400 kWh
Energiebedarf Biogasanlage	5.150 kWh
Energiebedarf gesamt	55.200 kWh

Eine erste Vordimensionierung führt zu folgender Anlagenkonzeption:

Tab. 17: Thermische Solaranlage: Anlagenkonzeption

Kollektorfläche, 20° Neigung, südorientiert	47,7 m ₂ (SOLVIS F75)
Volumen Pufferspeicher	3.000 Liter
Volumen Brauchwasserspeicher	400 Liter

Diese Anlagenkonzeption führt zu einer jährlichen Energieeinsparung von 33 % (18.200 kWh/a). Nachfolgende Jahresbilanz verdeutlicht, daß die Solaranlage insbesondere von April bis September große Teile der Warmwasserbereitung abdecken kann. Die Heizungsunterstützung kommt aufgrund des sehr geringen Heizenergiebedarfs des Gebäudes nicht zum tragen.

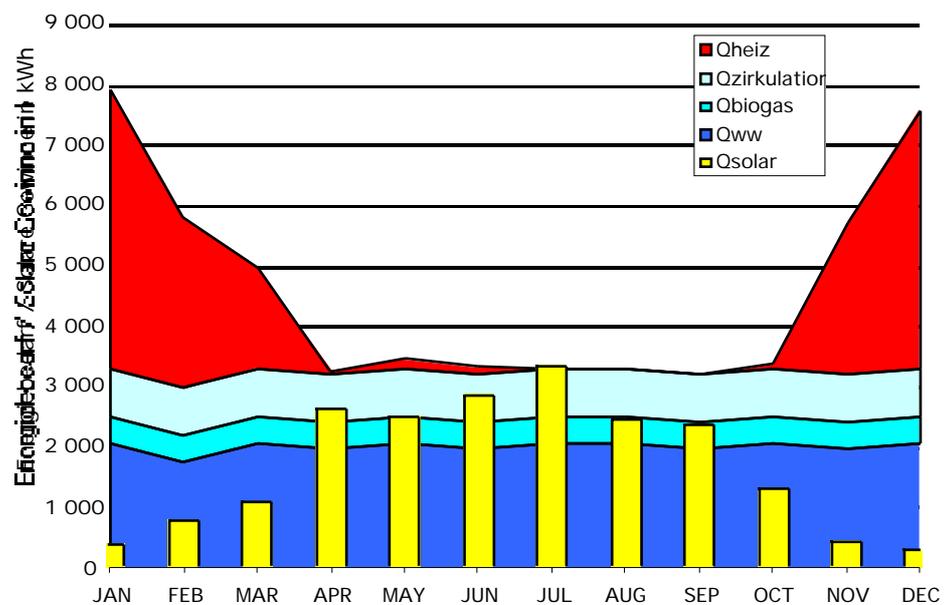


Abb. 6: Jahresenergiebilanz

Durch den Einsatz von Vakuumröhrenkollektoren sowie durch die Absenkung der Mitteltemperatur des Heizungssystems kann die Energieeinsparung weiter erhöht werden.

Tab. 18: Variantenbeschreibung Vakuumröhrenkollektor

Variantenbeschreibung	Einsparung in %
32,2 m _l Röhrenkollektor (Schweizer AG, Swisspipe) statt Flachkollektor	36,5
Heizungstemperaturen 60°C/40°C statt 70°C/50°C	33,8

Die Ergebnisse zeigen, daß Röhrenkollektoren auf dem verfügbaren Platz ca. 3,5 % mehr Einsparung erbringen als Flachkollektoren.

Die mittlere Temperatur des Heizsystems hat nur geringen Einfluß auf die Energieeinsparung, da während der Heizperiode die solaren Gewinne gering sind.

Für die untersuchten Systeme ergeben sich folgende PLV-Kennwerte:

Tab. 19: PLV-Werte der Varianten thermische Solaranlage

	Investitions- aufwand	Energieeinsparung	Nutzungsdauer	PLV
	[DM]	[kWh/a]	[a]	[DM/kWh*a]
ohne Solaranlage	0	0	-	-
Flachkollektor	42.800,- ¹⁷	18.200	25	0,09
größere Heizflächen	15.700,-	460	35	0,98
	Investitions- mehraufwand	Energieeinsparung	Nutzungsdauer	PLV
	[DM]	[kWh/a]	[a]	[DM/kWh*a]
Vakuumröhrenkollektor bzgl. Flachkollektor ¹⁸	18.100,-	1.950	25	0,37

Die Verwendung des Vakuumröhrenkollektors als auch die Vergrößerung der Heizflächen führen zu ungünstigen PLV-Verhältnissen. Das eingesetzte Flachkollektorsystem erreicht gute ökonomische Daten.

¹⁷ Kosten der Solaranlage zzgl. Speicheranteil 4.000,-.

¹⁸ Kosten: Spezifische Kosten 1.600 DM/m_l.

Energiebedarf nach Abschluß der Planungsphase.

Kalkulationsgrundlage zur Dimensionierung der Solaranlage waren die Daten aus der Vorplanung. Mittlerweile liegen die Ergebnisse aus der Ausführungsplanung vor. Hiernach ergibt sich aufgrund höherer Wärmeverteilverluste ein um 17.200 kWh (+ 31 %) erhöhter Gesamtenergiebedarf. Die überarbeitete Simulation ergibt eine solare Deckungsrate von 28,5 % (20.625 kWh/a) bei einem Gesamtenergiebedarf von 72.371 kWh/a.

9 Raumklima & Tageslichtnutzung

9.1 Raumklima

Mit Hilfe des dynamischen Simulationsprogramms TRNSYS ist es möglich, das thermische Verhalten des Gebäudes detailliert zu untersuchen. Der Einfluß einzelner Größen wie z.B. Verschattung, Fenstergröße und Lüftung auf den Heizenergiebedarf und die Raumtemperaturen im Sommer kann somit festgestellt werden.

Ausgehend von einer Referenzvariante wurden verschiedene Größen variiert, um eine - aus raumklimatischer Sicht - optimale Gebäudekonzeption zu erhalten.

9.1.1 Referenzvariante

Nur im Originalbericht

Abb. 7: Referenzvariante: Raumtemperaturen im Sommer, sortiert

Variantenbeschreibung:

Heizung: Raumtemperatur 20°C (nachts ausgeschaltet), Lüftung: 0,1 h⁻¹
Grundluftwechsel + 40 m³/h pro Person mit 80 % Wärmerückgewinnung, Abschattung durch Balkone, Bäume und Nachbargebäude, variable interne Lasten.

Tab. 20: Referenzvariante: Heizenergiebedarf und max. Raumtemperatur

Heizenergiebedarf [MWh/a]	Heizenergiebedarf [kWh/m_a]	Max. Raumtemperatur [°C]
16,3	11,6	29,6

Die Temperaturen im Wohnbereich des Gebäudes steigen im Sommer auch ohne Kühlung nicht über 30°C. Die relativ niedrigen Temperaturen werden durch die Verschattung der Südfassade durch Balkone, Bäume und Nachbargebäude erreicht. Da in der Standardvariante das 3.OG keine Abschattungseinrichtungen in Form eines Überhanges (z.B. einer Markise) besitzt, steigen hier die Temperaturen deutlich höher als in den darunterliegenden Geschossen. Die Räume im beheizten (UG) und unbeheizten (KK) Untergeschoß liegen mit ihren Temperaturen sehr viel niedriger, da sie an das kühle Erdreich angekoppelt sind.

Der Heizenergiebedarf liegt mit 11,6 kWh/m_a deutlich unter dem Zielwert von 15 kWh/m_a und auch unter dem Wert, der mit dem Kurzrechenverfahren bestimmt wurde. Der Unterschied zum Kurzrechenverfahren ist hauptsächlich durch die Nachtabsenkung der Heizung zu erklären.

9.1.2 Abschattung des 3.OG

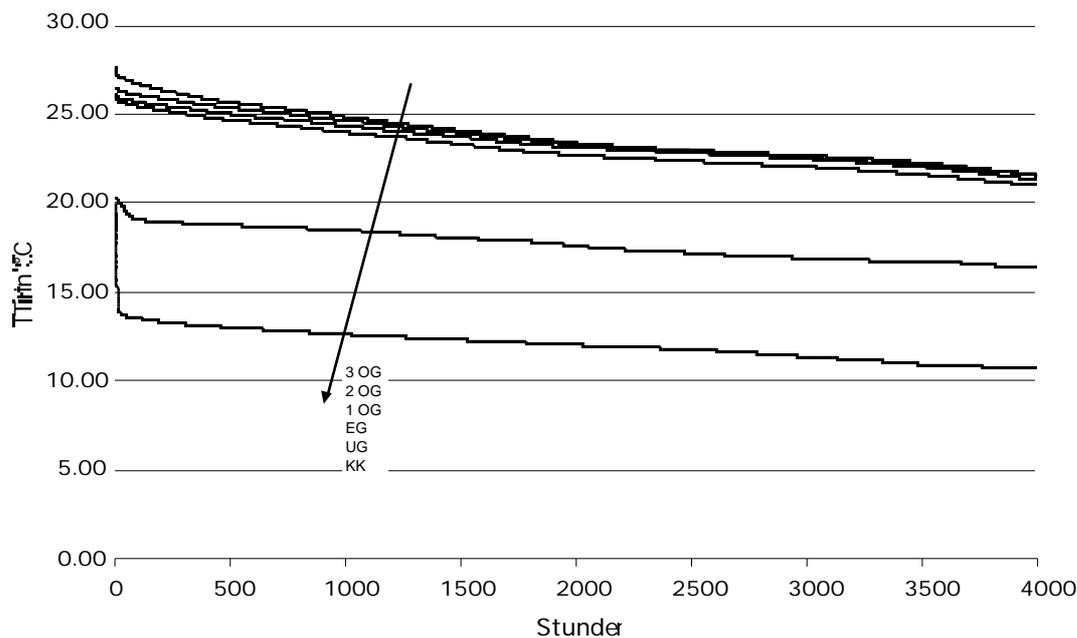


Abb. 8: Abschattung des 3.OG: Raumtemperaturen im Sommer, sortiert

Variantenbeschreibung:
wie 8.1.1, jedoch besitzt das 3.OG einen Überhang von 1,40 m Breite.

Tab. 21: Abschattung des 3.OG: Heizenergiebedarf und max. Raumtemperatur

Heizenergiebedarf [MWh/a]	Heizenergiebedarf [kWh/m_a]	Max. Raumtemperatur [°C]
17,6	12,6	27,7

Mit einem Überhang im 3.OG sinkt auch dort die Maximaltemperatur auf unter 28°C. Der Heizenergiebedarf steigt leicht an, da mit der Abschattung auch die solaren Gewinne reduziert werden.

9.1.3 Einfluß der Balkonbreite auf Heizenergie und Maximaltemperaturen

Variantenbeschreibung:
wie 8.1.2. Die Breite der Balkone und des Überhanges im 3.OG an der Südfassade wird variiert.

Tab. 22: Einfluß der Balkonbreite auf Heizenergie und Maximaltemperaturen

Balkonbreite [m]	Heizenergiebedarf [MWh/a]	Heizenergiebedarf [kWh/m_a]	Max. Raumtemperatur [°C]
0,00	13,9	9,9	30,8
0,80	16,6	11,8	28,4
1,40 (6.1.2)	17,6	12,6	27,7
2,00	18,1	12,9	27,3

Um die sommerliche Überhitzung der Räume zu vermeiden, ist eine Balkonbreite von mehr als 0,80 m notwendig. Eine größere Breite als 1,40 m ist aufgrund des Sonnenschutzes nicht notwendig.

Ergebnis: Aufgrund des geringen Einflusses auf den Heizenergiebedarf sollte die Breite der Balkone durch die Nutzung und weniger durch die angestrebte Energiekennzahl bestimmt werden.

9.2 Tageslichtsituation

Um die Tageslichtsituation im Gebäude zu untersuchen, wurde das Erdgeschoß mit dem Programm RADIANCE simuliert. Das Erdgeschoß wurde gewählt, da hier aufgrund der Verschattung durch Balkone, Bäume und Nachbargebäude mit der kritischsten Lichtsituation zu rechnen ist.

Ausgehend von der Referenzvariante wurde untersucht, welche Verbesserung durch eine Vergrößerung der Glasanteile in der Südfassade erzielt werden kann und welchen Einfluß die farbliche Gestaltung der Räume hat.

Zur Bewertung der Lichtsituation wird der Tageslichtquotient herangezogen. Er stellt das Verhältnis der Beleuchtungsstärke an einem Punkt innerhalb des Gebäudes zu derjenigen in der Umgebung dar. Als Beispiel sei folgender Fall genannt: An einem bewölkten Tag herrscht außen eine Beleuchtungsstärke von 10.000 Lux. An einer bestimmten Stelle im Gebäude sind es 500 Lux. Der Tageslichtquotient ergibt sich dann zu 5 %. In Wohnräumen sind Tageslichtquotienten ab 1 % akzeptabel, für Büroarbeitsplätze sind 3 % - 5 % erforderlich.

Die Beschreibung der einzelnen Varianten und die Darstellung des Tageslichtquotienten findet sich auf den nächsten Seiten.

9.2.1 Referenzvariante

Variantenbeschreibung: Glasanteil Südfassade: 47 %, Reflektionsgrad von

Nur im Originalbericht

Decke und Wänden: 50 %.

Abb. 10: Grundriß Erdgeschoß mit Isolinien Tageslichtquotient (1)

Die Versorgung mit Tageslicht ist noch ausreichend. In den Mittelbereichen der Wohnungen fällt der Tageslichtquotient zwar unter 1 %, allerdings wird der größte Teil der Fläche ausreichend mit Tageslicht versorgt.

9.2.2 Erhöhter Glasanteil

Variantenbeschreibung: Glasanteil Südfassade: 80 %, Reflektionsgrad von

Nur im Originalbericht

Decke und Wänden: 50 %.

Abb. 11: Grundriß Erdgeschoß mit Isolinien Tageslichtquotient (2)

Durch die größeren Glasflächen verbessert sich die Situation in den Mittelbereichen, da das Licht weiter in die Räume eindringen kann. Tageslichtquotienten unter 1 % treten nur noch selten auf.

9.2.3 Hellere Wände

Variantenbeschreibung: Glasanteil :47 %, der Reflektionsgrad der Wände ist

Nur im Originalbericht

auf 70 % erhöht.

Abb. 12: Grundriß Erdgeschoß mit Isolinien Tageslichtquotient (3)

Der Tageslichtquotient ist deutlich erhöht, Werte unterhalb von 1 % treten fast nicht mehr auf. Dadurch wird deutlich, daß die farbliche Gestaltung der Räume eine entscheidende Rolle bei der Tageslichtnutzung spielt.

9.3 Empfehlungen

Die Ergebnisse der thermischen Gebäudesimulation zeigen, daß auf ein externes Verschattungssystem (z.B. Jalousie) vollständig verzichtet werden kann, ohne daß es im Sommer zu unangenehm hohen Temperaturen kommt. Die solaren Gewinne werden allein durch die Verschattung durch die Balkone und Bäume auf der Südseite begrenzt. Allerdings muß an der Südfassade auch für das 3.OG eine Abschattung in Form eines Überhanges vorgesehen werden. Hierbei bietet sich an, diesen Überhang als PV-Element auszuführen und somit die Funktionen Abschattung und Stromproduktion in einem Bauteil miteinander zu vereinen.

Die Breite der Balkone sollte mehr als 0,80 m betragen, um die erwähnte Verschattungswirkung zu erreichen.

Um Blendung durch direkte Sonnenstrahlung zu vermeiden, wird empfohlen, ein innenliegendes Verschattungssystem einzubauen.

Der Glasanteil der Südfassade sollte aus thermischer Sicht nicht größer als nötig gewählt werden, um zusätzliche Wärmeverluste zu vermeiden. Die optische Simulation zeigt allerdings, daß ein Glasanteil von ca. 47 % nicht unterschritten werden darf, um die Innenräume ausreichend mit Tageslicht zu versorgen.

Eine Verbesserung der Tageslichtsituation ist jedoch auch dadurch zu erreichen, daß bei der Gestaltung der Räume auf die Verwendung von hellen Materialien geachtet wird, die große Anteile des Lichts reflektieren. Vor allem Wände und Decken sind hier von Bedeutung.

10 Planung: Lüftung und Wärmeversorgung.

Die Notwendigkeit einer Lüftungswärmerückgewinnung wurde bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Planungsprozesses dargestellt.

10.1 Lüftungsanlage

10.1.1 Auslegungsbedingungen

Um ein gesundes Raumklima zu gewährleisten sind nach den derzeitigen Regeln der Technik (DIN 1946-6E, u.a.) folgende Randbedingungen zur Belüftung von Wohnräumen zu beachten:

Tab. 24: Zu- und Abluftbedingungen nach DIN 1946-E6

Zuluftbedingungen:	30m ₃ /h Außenluft je Bewohner		
Abluftbedingungen:	2-facher Luftwechsel in den Ablufträumen		
	Anhaltswerte:	Küche:	60m ₃ /h
		Bad, HWR	40m ₃ /h
		WC, Vorrat	20m ₃ /h

Tab. 25: Anforderungen an Wirkungsgrad und elektrische Leistungsaufnahme

Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung: Rückwärmzahl bei (Abluft) / (Außenluft) : (20°C, 40%r.F.) / (-12°C)	> 80 %
Strom : Wärme - Verhältnis	> 1:10
elektrische Leistungsaufnahme im Betriebspunkt bei einer externen Pressung von 200 Pa.	< 0,3 W/m ₃
Luftgeschwindigkeiten im System	< 3 m/s

Um die geforderten Kennwerte bezüglich des elektrischen Energiebedarfs zu unterschreiten, sind Luftgeschwindigkeiten < 3 m/s bei einem maximalen Druckverlust von 200 Pa erforderlich.

10.1.2 Anforderungen an Bedienerfreundlichkeit.

Der Nutzer bestimmt wesentlich über die Effizienz einer Lüftungsanlage. Um die berechneten Energieeinsparungen zu erzielen, muß gewährleistet sein, daß die Fenster während der Heizperiode nur wenig geöffnet werden. Die bisherigen Erfahrungen über das Nutzerverhalten sind sehr unterschiedlich /1/. Prinzipiell sollte jedoch folgendes berücksichtigt werden:

- Der Nutzer muß über den Sinn und die Funktion der Lüftungsanlage unterrichtet sein.
- Eine Wartung und Reinigung der Lüftungsanlage muß gewährleistet sein.
- Die Lüftungsanlage muß so konzipiert sein, daß das frische Raumklima auch wirklich spürbar ist. Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmer müssen ausreichend belüftet sein. Bad, WC und Küche müssen ausreichend entlüftet werden.
- Die Dichtheit der Gebäudehülle ist sehr entscheidend. Bei undichten Gebäuden werden oft die falschen Stellen be- bzw. entlüftet. Der Nutzer spürt kein angenehmes Raumklima und öffnet daher die Fenster.
- Es muß eine individuelle Regulierung von Luftvolumenströmen möglich sein.

10.1.3 Konzeption und Planung

Konzeption und Planung erfolgten entsprechend den zuvor angeführten Auslegungsbedingungen. Bei der Festlegung der Zu- und Abluftvolumenströme zeigte sich, daß die Vorgaben der DIN 1946-E6 teilweise überschritten werden mußten, weil z.B. bei 2 Zimmern für 1 Person beide Zimmer mit einem Mindestluftvolumenstrom versehen werden müssen. Die Ergebnisse der Planung sind nachfolgend bilanziert.

Tab. 26: Kenndaten der geplanten Anlage

	Zielvorgabe	Planung
Volumenstrom (Zu- und Abluft)		
Wohnen (40 Pers.)	1.200 m _³	1.745 m _³
Trockenraum	250 m _³	250m _³
Druckverlust extern	200 Pa	230 Pa
Druckverlust Filter ¹⁹	minimal (ca. 50 Pa)	50 Pa
Elektrische Leistungsaufnahme	435 W	780 W
Rückwärmzahl bei (Abluft) / (Außenluft): (20°C, 40%r.F.) / (-12°C)	> 80%	82%

Lüftungszentrale:

Die genannten Zielvorgaben konnten nicht in allen Punkten erfüllt werden. Insbesondere die Zielvorgaben zur elektrischen Leistungsaufnahme waren nicht realisierbar. Neben den hohen Anforderungen an die externe Druckerhöhung war sicherlich auch die Tatsache von Bedeutung, daß gerade im Bereich der größeren Lüftungsgeräte (> 1.500 m_³/h) nur wenige Hersteller für die Anforderung einer hohen Rückwärmzahl bei gleichzeitig geringem elektrischen Energiebedarf sensibilisiert sind.

So waren nur wenige Hersteller überhaupt in der Lage, Rückwärmzahlen > 65 % anzubieten. Bei den verbleibenden Herstellern hatte das Lüftungsgerät der Fa. Menerga mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 680 W einen um 55 % geringeren elektrischen Energiebedarf, als das nächst bessere Lüftungsgerät mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1.500 W.

Aufgrund der großen Wärmeverluste der Leitungssysteme im UG wurde die Luftgeschwindigkeit in den Rohren im UG auf bis zu 6 m/s erhöht. Hierdurch steigt die elektrische Leistungsaufnahme im Betriebspunkt auf 780 W an.

Leitungsführung:

Die Zuluftleitungen werden über die Installationsebene der Außenwände geführt. Dies ermöglicht eine „unsichtbare“ und platzsparende Leitungsführung. Da das Raumvolumen in der Installationsebene begrenzt ist, können maximal DN 100 Systeme installiert werden. Kostenberechnungen im Rahmen des Planungsprozesses ergaben, daß die niedrigsten Investitionskosten dann anfal-

¹⁹ Druckverlust bei mittlerem Verschmutzungsgrad.

len, wenn jeder Wohnraum (Zuluft) separat mit einer Zuluftöffnung bedient wird. Hier ergeben sich insbesondere sehr kostengünstige Lösungen bezüglich Schall- und Brandschutz. Des Weiteren ist von Vorteil, daß die Einregulierung der Luftvolumenströme an zentraler Stelle im UG erfolgen kann.

Regelkonzept:

Die Lüftungsanlage wird während der Heizperiode kontinuierlich betrieben. Außerhalb der Heizperiode ist nur noch der Abluftventilator in Betrieb, dann wird die Zuluft über geöffnete oder gekippte Fenster nachgeführt. Eine Bypass-Schaltung für den Sommerfall ist damit nicht erforderlich.

Ein Heizregister ist aus Sicherheitsgründen installiert. Falls der Baustandard den Anforderungen nicht gerecht wird, kann hier zusätzlich nachgeheizt werden.

Die Luftvolumenströme können zentral im UG mittels Irisblenden je Wohnraum einreguliert werden. Eine individuelle Regulierung durch den Nutzer ist nicht möglich, weil dies zu einer wesentlich größeren Dimensionierung der Anlage führen würde. Zu- und Abluftvolumenströme können folglich nur durch Fachpersonal (bzw. Hausmeister) verändert werden.

Heizkostenabrechnung:

Die zentrale Lüftungswärmerückgewinnung führt dazu, daß z.B. einer Wohneinheit Wärme entzogen wird, die andererseits einer anderen Wohnung in Form von vorgewärmter Zuluft wieder zugeführt wird. Um diese Form der Wärmeverschiebung zu vermeiden wird in Anlage 1 der Wärmeschutzverordnung vom 16.8.94 gefordert, daß die Wärmerückgewinnung bei Gebäuden mit mehreren Nutzeinheiten für jede Nutzeinheit getrennt werden soll.

Diese Anforderung wird beim vorliegenden Bauvorhaben aus folgenden Gründen jedoch nicht beachtet:

- Die Trennung der Wärmerückgewinnung nach Nutzeinheiten führt zu deutlich höheren Investitionskosten. Dies widerspricht dem Planungsziel der Minimierung von Baukosten.
- Aufgrund des sehr geringen Jahresheizenergiebedarfs wird auf eine Heizkostenabrechnung im gesamten Bauvorhaben verzichtet. Die Tatsache der Wärmeverschiebung ist daher nicht kostenrelevant.
- Die Wärmeverschiebung infolge von Transmissionswärmeverlusten an die Nachbarwohnungen liegt in der selben Größenordnung wie die infolge von Lüftungswärmeverlusten.

Die angeführten Gründe verdeutlichen, daß die Regelung im Rahmen der Wärmeschutzverordnung vom 16.8.94 noch verbesserungsfähig ist.

10.2 Wärmebedarf

10.2.1 Normwärmebedarf nach DIN 4701/83

Zur Auslegung von Wärmeerzeuger und Wärmeverteilung wurde der Normwärmebedarf nach DIN 4701/83 berechnet. Hierbei wurden folgende Kennwerte ermittelt:

- Wärmebedarf bei Vollbeheizung.
- Wärmebedarf bei teilweise eingeschränktem Heizbetrieb entsprechend den Vorgaben der DIN 4701/83 mit Raumtemperaturen in Nachbarräumen von 15°C und 24°C in Bädern.

Tab. 27: Wärmebedarf nach DIN 4701/83

Vollbeheizung	Teilweise eingeschränkter Heizbetrieb
20.598 W	41.435 W

Um das Verhalten des Gebäudes bei Teilbeheizung besser beurteilen zu können, wurden dynamische Simulationen durchgeführt.

Als Ergebnis der Untersuchung ist folgendes festzuhalten:

- Die durchgehende Beheizung des Bades auf 24°C führt beim vorliegenden Bauvorhaben dazu, daß alle umliegenden Räume durchgehend über die Wärmeverluste des Bades beheizt werden. Die notwendige Heizleistung der angrenzenden Räume geht auf nahezu Null zurück. Um eine Überdimensionierung zu vermeiden, wird daher die Temperatur im Bad mit 20°C angesetzt.
- Zur Ermittlung des Wärmebedarfs werden angrenzende Nachbarräume nicht mit niedrigeren Raumtemperaturen bewertet, da diese von den angrenzenden Räumen mitbeheizt werden und daher nicht, wie in der DIN 4701 erläutert, auf eine Raumtemperatur von 5 K unterhalb des angrenzenden Raumes abfallen können.
- Eingehend untersucht wurden die Auswirkungen einer Temperaturabsenkung in der Nachbarwohnung. Hier ist aufgrund unterschiedlicher Nutzeranforderungen davon auszugehen, daß z.B. aufgrund von Urlaub oder unterschiedlichen Komfortansprüchen auch eine Nichtbeheizung der Nachbarwohnung möglich ist. Für diesen Fall wurden die Temperaturen unter folgenden Bedingungen ermittelt:
 - Statische Auskühlung der Nachbarwohnung, ohne Betrieb der internen Lasten und ohne Solarstrahlung.
 - Statische Auskühlung der Nachbarwohnung, unter Berück-

sichtigung der internen Lasten.

- Dynamisches Verhalten mit internen Lasten und Solarstrahlung.

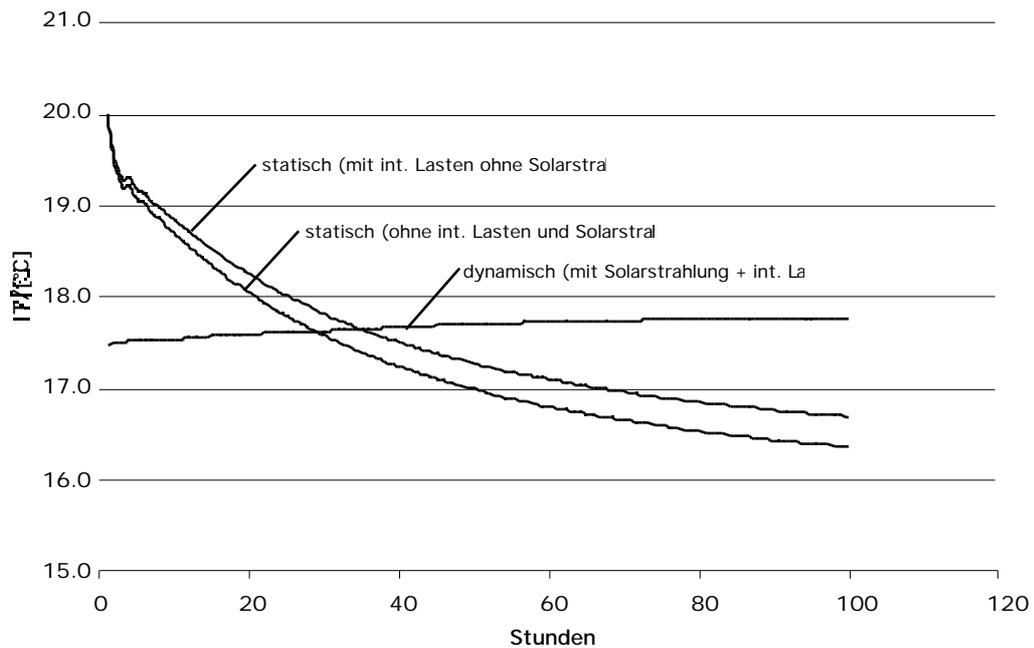


Abb. 13: Temperaturen in unbeheizter Nachbarwohnung

Ohne Berücksichtigung der internen Lasten und der Solarstrahlung ergibt sich eine Temperatur von ca. 16,5°C in der nicht beheizten Nachbarwohnung, wenn daran angrenzende Wohnungen auf 20°C gehalten werden. Die dynamische Simulation ergibt dagegen einen Minimalwert von ca. 17,8°C.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden folgende Annahmen gewählt:

- Keine Temperaturunterschiede innerhalb einer Wohnung. Sowohl Bad als auch Nachbarräume sind auf 20°C beheizt.
- Minimale Raumtemperatur in der Nachbarwohnung: 17°C.

Hiernach ergibt sich folgender Wärmebedarf:

Tab. 28: Wärmebedarf nach DIN 4701/83 mit geänderten Annahmen

	Vollbeheizung	Teilweise eingeschränkter Heizbetrieb
Leistung gesamt [W]	20.374	32.333
Leistung spezifisch [W/m ₂]	14,6	23,2

Bei Vollbeheizung wird ein spezifischer Wärmebedarf von 14,6 W/m₂ erreicht. Unter Berücksichtigung dynamischer Effekte sinkt der Wärmebedarf nochmals deutlich ab.

10.2.2 Wärmebedarf und Jahresdauerlinie auf Basis der dynamischen Simulation

Die Effekte der Solarstrahlung sowie der Gebäudemasse werden erst bei dynamischer Simulation deutlich. Hiernach ergibt sich folgender Wärmebedarf (Jahresdauerlinie).

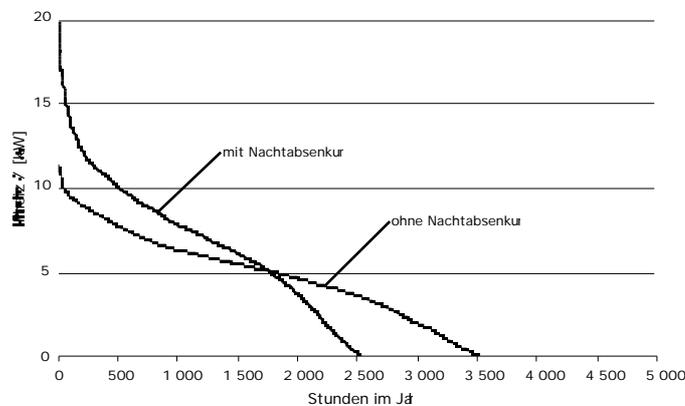


Abb. 14: Jahresdauerlinie Heizleistung

Der maximale Wärmebedarf beträgt (mit Nachtabsenkung) 20 kW. Der Wärmebedarf von 15 kW wird nur während weniger Stunden eines Jahres überschritten. Die gesamte Heizdauer beträgt 2.500 Stunden (von insgesamt 8760 h im Jahr).

Ohne Nachtabsenkung beträgt die maximale Heizleistung nur noch 11 kW, während die Heizperiode auf 3.500 Stunden ansteigt. Dies entspricht einem spezifischen Wärmebedarf von 7,9 W/m₂ und somit etwa einem Drittel des Wertes aus der statischen Berechnung.

10.3 Wärmeversorgung.

Der sehr geringe Wärmebedarf ermöglicht neue Konzepte der Wärmeversorgung. Beim derzeit geplanten Luftwechsel von $0,4 \text{ h}^{-1}$ und einer Zulufttemperatur von 55°C könnte ein Wärmebedarf von $14,8 \text{ W/m}_2$ und damit etwa das Doppelte des dynamischen Wärmebedarfs gedeckt werden.

10.3.1 Radiatoren oder Luftheizung.

Die Frage der Art der Wärmeversorgung wurde im Rahmen der Vorplanung intensiv diskutiert. Die Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefaßt.

Kosteneinsparung durch Verzicht auf separate Wärmeversorgung mittels Radiatoren

Die Kosten für Wärmeverteilung, Radiatoren und Wärmedämmung inkl. Zubehör betragen laut Ausschreibungsergebnis $65.500,- \text{ DM}$ ($47,- \text{ DM/m}_2$).

Wärmeverteilverluste

Bei Beheizung mittels Lüftungsanlage steigen die Wärmeverteilverluste deutlich an, da Oberfläche und Dämmstärke der Lüftungsrohre deutlich geringer sind als die Oberfläche der Heizkörperverteilung. So betragen die Wärmeverteilverluste im UG bei Radiatoren 6400 kWh/a sowie 13.960 kWh/a bei Beheizung über das Lüftungssystem (jeweils ohne Berücksichtigung von Armaturen). Nicht berücksichtigt sind die erheblichen Wärmeverluste innerhalb des Gebäudes, was dazu führt, daß aufgrund der Wärmeverluste der Luftheizung eine Überheizung der unteren Geschosse sowie eine Unterversorgung der oberen Geschosse erfolgen wird.

Differenzen zwischen Wärmebedarf und maximaler Heizleistung der Zuluft

Aufgrund unterschiedlicher Belegungsdichten und einem sehr unterschiedlichen Anteil von Außenflächen differieren die mögliche Wärmeleistung und der Wärmebedarf je nach Wohnung. Dies verdeutlicht die nachfolgende Auswertung der Daten aus Lüftungsplanung und statischer Wärmebedarfsberechnung.

Tab. 29: Auswertung der Daten aus Lüftungsplanung und statischer Wärmebedarfsberechnung

		Luftmenge [m ³ /h]	DIN-Wärme- bedarf [W]	Heizleistung Zu-luft bei _T=40K [W]	Deckung Wär- mebedarf [%]
UG	Wasch/Trockenraum	60	0	792	-
EG	Wohnung 1	150	2.229	1.980	89%
	Wohnung 2	90	1.205	1.188	99%
	Wohnung 3	120	1.161	1.584	136%
	Wohnung 4	100	1.238	1.320	107%
1.OG	Wohnung 5	150	1.268	1.980	156%
	Büro 6	60	720	792	110%
	Büro 7	90	810	1.188	147%
	Wohnung 8	90	1.151	1.188	103%
2.OG	Wohnung 9	125	1.318	1.650	125%
	Büro 10	60	628	792	126%
	Büro 11	60	755	792	105%
	Wohnung 12	90	1.146	1.188	104%
	Wohnung 13	90	1.151	1.188	103%
3.OG	Wohnung 14	50	639	660	103%
	Wohnung 15	60	857	792	92%
	Wohnung 16	60	638	792	124%
	Wohnung 17	50	761	660	87%
	Wohnung 18	50	829	660	80%
	Wohnung 19	50	639	660	103%
	Wohnung 20	90	1.233	1.188	96%
Summe		1.745	20.375	23.034	113%

Die Auswertung verdeutlicht die Problematik einer zentralen Beheizung mittels Luftherhitzer:

- Aufgrund der Lage der Wohnungen ergibt sich ein sehr unterschiedlicher Wärmebedarf zwischen 660 W und 1.980 W.
- Aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Belegung differieren Wärmebedarf und Wärmeleistung der Lüftungsanlage je nach Wohnung. Obwohl der Wärmebedarf zu 113 % in der Summe abgedeckt werden kann, bleibt z.B. Wohnung 1 unterversorgt. Hier müßte der Luftvolumenstrom erhöht werden. Wohnung 5 würde hingegen überversorgt, d.h. es herrschen zu hohe Raumtemperaturen vor. Der Nutzer wird versuchen durch Fensterlüftung diesen „Wärmeüberschuß“ zu vernichten.
- Eine individuelle Raumtemperaturregelung je Wohnung ist nicht möglich.

Ergebnis und Entscheidung durch den Bauherrn

Nach Vorlage der angeführten Ergebnisse entschied sich der Bauherr aus folgenden Gründen für den Einbau von Radiatoren:

- Der Verzicht auf das Radiatorensystem läßt keine wesentliche Kosteneinsparung erwarten.
- Eine Raumtemperaturregelung je Wohnung ist zwingend erforderlich.
- Eine Einzelraumregelung ist gewünscht. Die Temperatur im Schlafzimmer soll etwas kühler sein als im Rest der Wohnung. Die Temperatur im Bad bei Bedarf etwas höher (auch wenn keine 24°C erreicht werden).
- Eine zusätzliche Dämmung der Lüftungsverteilung ist aus Platzgründen nicht akzeptabel.

10.3.2 Varianten: Lüftung und Heizung.

Die Forderung nach einer individuellen Raumtemperaturregelung je Wohnung führte schließlich zu den folgenden Versorgungsvarianten.

Dezentrale Systeme

Tab. 30: Varianten Lüftung & Heizung.

Variante	
D1	Entlüftung über Rohrentlüfter (Vergleichsvariante, Standardfall): Heizung: Radiatoren. Warmwasser: Zentrale Warmwasserbereitung.
D2	Lüftungszentralgerät je Wohnung: Heizung: Luftherhitzer auf Basis Luft/Wasser. Energieversorgung über Heizzentrale. Warmwasser: Zentrale Warmwasserbereitung.
D3	Wärmepumpenkompaktaggregat je Wohnung. Heizung: Wärmepumpenkompaktaggregat, Wärmequelle Erdreichwärmetauscher. Warmwasser: Zentrale (solare) Wasservorwärmung, Nacherwärmung über Wärmepumpenkompaktaggregat.
D4	Einzelraum-Lüftungssysteme, dezentral je Raumeinheit Heizung: Heizkörper Warmwasser: Zentrale Warmwasserbereitung

Zentrale Systeme

Variante	
Z1	Zentrales Lüftungsgerät mit dezentraler Luftherwärmung. Heizung: Nachheizung über Zuluft, teilweise mit Umluftanteil. Warmwasser: Zentrale Warmwasserbereitung.
Z2	Zentrales Lüftungsgerät mit Nachheizung durch Radiatoren. Heizung: Radiatoren. Warmwasser: Zentrale Warmwasserbereitung.

10.3.3 Technologie und Bewertung der einzelnen Varianten.

Dezentrale Systeme

Die wesentlichen Vorteile der dezentralen Systeme sind:

- individuelles Eigentum; kein Gemeinschaftseigentum.
- nach Nutzeinheiten getrennte Wärmerückgewinnung; dies entspricht auch den Vorgaben der Wärmeschutzverordnung.
- Individuelle Bedienung und Regulierung.

Tab. 31: Vergleich der untersuchten Systemvarianten.

Var.	Erläuterung	Vorteile	Problempunkte
D1	Standard	• kostengünstig.	• hoher Energiebedarf.
D2	Lüftungszentralgerät je Wohnung	• Verzicht auf Radiatoren.	• Raumbedarf • Schallemission in Wohnung
D3	Wärmepumpenkompaktaggregate	• keine zentralen Wärmeversorgungsstränge erforderlich. • Verzicht auf Radiatoren	• Raumbedarf, Schall • Erdreichwärmetauscher erforderlich (Wärmequelle).
D4	Einzelraum-Lüftungssysteme.	• einfache Reinigung.	• Schallemission in jedem Raum • Getrenntes Abluftsystem erforderlich. • Eingeschränkte Entfeuchtung, da Kondensat wieder der Raumluft zugeführt wird.

Zentrale Systeme

- minimaler Raumbedarf innerhalb der Wohnungen.
- keine Leitungsführung (Querverteilung) innerhalb der Wohnungen.

Var.	Variante	Vorteile	Problempunkte
Z1	Luftheizung mit dezentraler Nacherwärmung	• keine Radiatoren erforderlich.	• keine individuelle Bedienung der Luftmengen möglich.
Z2	Radiatoren	• keine Luftherhitzer erforderlich.	• keine individuelle Bedienung der Luftmengen möglich

10.3.4 Investitionskostenvergleich

Wichtigstes Entscheidungskriterium für die Auswahl des Heiz- und Lüftungssystems waren die zu erwartenden Investitionskosten. In nachfolgender Tabelle sind die Ergebnisse der Kostenschätzung laut Vorentwurf aufgeführt.

Tab. 32: Vergleich der Investitionskosten auf Basis Kostenberechnung nach DIN 276 (3/98) und Ausschreibungsergebnisse von 10/1998.

Kostengruppe	D1	D2	D3	D4	Z1	Z2
Lüftung						
Zentralgerät		0	126.800	299.360	124.300	46.595
Zuluft		0	46.572	46.572	0	61.106
Abluft	39.250	34.841	34.841	39.250	36.042	36.042
Sonstiges	4.952	22.471	19.478	7.325	35.376	35.376
Summe Lüftung	44.201	230.683	400.250	170.874	179.120	179.120
Heizung						
Heizsystem	50.859	0	0	41.400	52.000	41.400
Wärmeverteilung	25.000	10.000	5.000	18.300	25.000	18.300
Heizzentrale	2.500	2.500	0	2.500	2.500	2.500
Sonstiges	7.000	18.800	0	5.800	5.800	5.800
Summe Heizung	85.359	31.300	5.000	68.000	85.300	68.000
Summe	129.560	261.983	405.250	238.874	264.420	247.120

10.3.5 Schlußfolgerungen und Konzeption von Lüftung und Wärmeversorgung

Die Investitionskosten der Varianten D2, D4, Z1 und Z2 unterscheiden sich nur geringfügig. Die Mehrkosten der Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung betragen ca. 130.000,- DM gegenüber der Standardausführung D1.

In die engere Auswahl kamen die Varianten Z2 und D2. Variante D4 wurde ausgeschlossen, weil von Seiten der Planer als auch des Bauherrn ein gewisses Mißtrauen gegenüber den Schallemissionen und der energetischen Effizienz des Systems bestand. So werden z.B. Bad, WC und Küche nach wie vor über ein Abluftsystem ohne Wärmerückgewinnung entlüftet. Variante Z1 wurde ausgeschlossen, weil trotz höherer Kosten kein Vorteil gegenüber der Variante Z2 gegeben war.

Die Entscheidung zwischen Z2 und D2 fiel bereits im frühen Stadium der Vorplanung. Zu diesem Zeitpunkt lagen dem Bauherrn die Daten der Kostenschätzung und nicht die Daten der oben angeführter Tabelle (Kostenberechnung und Ausschreibungsergebnisse) vor.

Tab. 33: Kosten Lüftungsanlage: Vorplanung und Ausschreibungsergebnisse

	Vorplanung	Kostenberechnung / Ausschreibung
D2: Dezentrale Lüftung		
Heizung:	86.000,-	31.300,- ²⁰
Lüftung:	311.000,-	230.700,- ²¹
Z2: Zentrale Lüftung		
Heizung:	123.000,-	68.000,-
Lüftung:	96.000,-	179.000,-

Zum Zeitpunkt der Vorplanung lag die Kostendifferenz zwischen zentraler und dezentraler Lüftung bei 81 %. Dies veranlaßte den Bauherrn zur Entscheidung für eine zentrale Lüftungsanlage.

Die ursprüngliche Kostendifferenz von 81 % ist nach Vorlage der tatsächlichen Ausschreibungsergebnisse auf unter 10 % gesunken. Das zentrale Lüftungssystem wird deutlich teurer als zunächst gedacht, das Heizsystem wird deutlich günstiger. Aus heutiger Sicht müßte die Entscheidung zwischen dezentral und zentral nochmals neu überdacht werden.

²⁰ Kostenberechnung des Fraunhofer ISE auf Basis der vorliegenden Ausschreibungsergebnisse zur zentrale Lüftungsanlage.

²¹ Kostenberechnung des Fraunhofer ISE auf Basis der vorliegenden Ausschreibungsergebnisse zur zentrale Lüftungsanlage.

11 Energieversorgung (Wärme)

11.1 Energiebilanz

Unter Berücksichtigung der thermischen Solarenergienutzung ergibt sich ein verbleibender Wärmebedarf von 51.750 kWh/a. Dieser teilt sich wie folgt auf:

Tab. 34: Wärmebedarf Passivhaus Vauban

	Passivhaus Vauban		WSVO '95 ²²
	[kWh/a]	[kWh/m_a]	[kWh/m_a]
Nutzenergiebedarf:			
Raumwärme	16.300	11,6	94,4
Brauchwasser	24.350	17,4	17,4
Biogasanlage	5.150	3,7	-
Wärmeverteilverluste:			
Raumwärme	9.600	6,8	12,4
Lüftung	6.000	4,3	-
Warmwasser (u.a. Zirkulation)	10.971	7,8	13,4
Solaranlage	- 20.625	- 14,7	
Energiebedarf gesamt ohne Biogasanlage	51.746 46.596	37,1 33,4	- 137,6

Im Vergleich zum konventionellen Bauvorhaben ergibt sich eine Nutzenergieeinsparung von 76 %.

11.2 Technische Konzeption der untersuchten Versorgungsvarianten

Zur Energieversorgung standen folgende 6 Varianten zur Diskussion.

- Blockheizkraftwerk auf Basis Erdgas oder Flüssiggas.
- Anschluß an die Nahwärmeversorgung im Versorgungsgebiet Vauban.
- Gasbrennwertkessel.
- Gas-Niedertemperaturkessel.
- Rapsöl-BHKW.
- Holzfeuerung.

²² Rechenansatz: 100% Dämmung statt 200% Dämmung,
Mittlere Temperatur von Warmwasser und Zirkulation: 55°C statt 45°C.

Die Varianten Holzfeuerung und Rapsöl-BHKW wurden nicht näher betrachtet. Für die Holzfeuerung stand keinerlei Lagervolumen zur Verfügung. Der Einsatz eines Rapsöl-BHKW wurde verworfen, da einerseits kein zuverlässiges BHKW-Modul bekannt war und andererseits die CO₂-äquivalenten Emissionen des Rapsöl-BHKW schlechter sind als die eines Erdgas-BHKW. Siehe hierzu auch die nachfolgenden Erläuterungen im Kapitel Bilanzierung der klimarelevanten Emissionen.

11.2.1 Blockheizkraftwerk (BHKW)

Die technischen Daten des BHKW der Fa. Senertec (ehem. Sachs BHKW) sind nachfolgend aufgeführt.

Tab. 35: Technische Daten BHKW (Fa. Senertec)

Leistungsaufnahme Gas	19,6 kW
Elektrische Leistung:	5 kW
Thermische Leistung:	
ohne Abgaswärmetauscher	12,3 kW
mit Abgaswärmetauscher	14,3 kW
Wirkungsgrade:	
elektrisch	25,5%
thermisch	73,0%
gesamt	98,5%

Die Wärmeleistung von 14,3 kW sollte nach den Ergebnissen der dynamischen Simulation zur Deckung des Wärmebedarfs (11 kW) ausreichen, auch wenn der nach DIN erforderliche (statische) Wärmebedarf von 20,4 kW nicht bereit gestellt werden kann. Der Einbau des Abgaswärmetauschers ist aus Gründen der erhöhten Wärmeleistung zwingend erforderlich.

11.2.2 Nahwärmeanschluß

Im Baugebiet Vauban besteht Nahwärmeanschlußzwang. Aufgrund frühzeitiger Intervention von Bürgern und Fachleuten wurde allerdings eine Ausnahmeregelung für die Passivhausbauweise gefunden. Bauvorhaben, die einen jährlichen Heizenergiebedarf von < 15 kWh/m_a aufweisen und zusätzlich über eine Solaranlage zur Warmwasserbereitung verfügen, sind nicht an den Anschlußzwang gebunden.

Die Nahwärmeversorgung des Baugebietes Vauban soll in der Endausbaustufe über Kraft-Wärme-Kopplung in Kombination mit einem Spitzenlast-Kessel erfolgen.

Die technischen Kenndaten der Nahwärmeversorgung im Baugebiet Vauban sind:

Tab. 36: Technischen Kenndaten der Nahwärmeversorgung im Baugebiet Vauban

Thermische Leistung der Übergabestation	15 kW
Netzverluste	10%
Anteile an der Wärmeerzeugung	
Kraft-Wärme-Kopplung	70%
Gasbrennwertkessel	30%
Wirkungsgrade der Wärmeerzeuger	
Kraft-Wärme-Kopplung:	
elektrischer Wirkungsgrad	34%
thermischer Wirkungsgrad	55%
Gas-Kessel	
thermischer Wirkungsgrad	90%

11.2.3 Gasbrennwertkessel

Der Einsatz eines Gasbrennwertkessels ist aus Sicht der Investitionskostenminimierung interessant. Folgende Daten wurden zu Grunde gelegt.

Tab. 37: Datengrundlage Gasbrennwertkessel

Thermische Leistung	15 kW
Thermischer Wirkungsgrad	100%

11.2.4 Gas-Niedertemperaturkessel

Der Gas-Niedertemperaturkessel wird als Vergleichsvariante herangezogen. Es wurden folgende technische Daten angesetzt.

Tab. 38: Datengrundlage Gas-Niedertemperaturkessel

Thermische Leistung	15 kW
Thermischer Wirkungsgrad	90%

11.3 Kosten und Wirtschaftlichkeit

11.3.1 Investitionsaufwand.

Die Kostenschätzung der Vorplanung ergibt folgende Daten. Zur Berechnung werden die Vollkosten angelegt. So sind alle erforderlichen Zubehörbauteile wie z.B. Schornstein, Gasanschluß, Regelung & Montage berücksichtigt. Beim Kostenansatz Nahwärme ist ein zusätzlicher Gasanschluß zur Versorgung mit Kochgas berücksichtigt. Die ausführlichen Daten sind der Kostenberechnung in Anhang 3 zu entnehmen.

Tab. 39: Investitionskosten Energieversorgung (Wärme)

	Beschreibung	Investition [DM]
Klein-BHKW (Senertec)	inkl. Abgaswärmetauscher.	50.200,-
Gasbrennwertkessel	ohne Pufferspeicher	19.000,-
Gas-Niedertemperaturk.	ohne Pufferspeicher	19.000,-
Nahwärmeversorgung	inkl. 1.700l Pufferspeicher.	26.000,-
Thermische Solaranlage	46 m ² , 1500l zusätzlicher Speicher	45.300,-
zum Vergleich: Elektrische Energie		
Photovoltaik	5 kW	75.000,-

11.3.2 Preis-Leistungs-Verhältnis

Entsprechend dem Konzept „Maximale Einsparung bei minimalen Kosten“ erfolgt bei den Energieversorgungsvarianten, vergleichbar mit der Vorgehensweise in den vorangegangenen Kapiteln, eine Bilanzierung von Preis und Leistung. Die Kosten und Nutzungsdauer werden hierbei allerdings auf die Primärenergieeinsparung (und nicht Nutzenergie) bezogen. Das PLV_{PE} wird wie folgt ermittelt.:

$$PLV_{PE} = \frac{\text{Investitionsmehrkosten}}{\text{Primärenergieeinsparung} * \text{Nutzungsdauer}}$$

Wie bereits beim Einsparkonzept gilt der Kennwert der Photovoltaik als Maximalwert.

Tab. 40: PLV_{PE} Energieversorgung (Wärme)

	Investition [DM]	Primärenergie- Einsparung [kWh/a]	Nutzungs- sd. [a]	PLV _{PE}
Klein-BHKW (Senertec)	50.200,-	39.000	20	0,04
Gasbrennwertkessel	19.000,-	6.300	20	0,00
Gas-Niedertemperaturk.	19.000,-	0	20	-
Nahwärmeversorgung	26.000,-	36.700	30	0,01
Thermische Solaranlage	45.300,-	22.300	25	0,08
Photovoltaik	75.000,-	14.100	25	0,21

Der Einsatz eines Gasbrennwertkessels erreicht das beste PLV_{PE}-Ergebnis, gefolgt von der Nahwärmeversorgung und dem Klein-BHKW. Aufgrund der sehr guten PLV_{PE}-Kennwerte fiel die Entscheidung des Bauherrn für den Einsatz des Klein-BHKW, weil einerseits die Primärenergieeinsparung die Einsparung der Nahwärmeversorgung überschreitet und andererseits nicht absehbar ist, wann die Nahwärmeversorgung im Baugebiet Vauban tatsächlich als Kraft-Wärme-Kopplung betrieben wird.

11.3.3 Vollkostenrechnung

Das ermittelte Preis-Leistungs-Verhältnis PLV_{PE} ist ausreichend um die Maßnahmen nach ihrer Emissionseinsparung zu ordnen, die tatsächlichen Vollkosten sind jedoch nicht berücksichtigt. Unter Berücksichtigung der Vollkosten (Brennstoff-, Wartungs-, Bedien-, und Kapitalkosten) ergeben sich die nachfolgenden Daten.

Tab. 41: Vollkostenrechnung Energieversorgung (Wärme)

	Kapitalkosten [DM/a]	Betriebskosten [DM/a]	Verbrauchskosten [DM/a]	Jahreskosten [DM/a]
Klein-BHKW (Senertec)	4.489,-	1.275,-	1.448,-	7.212,-
Gasbrennwertkessel	1.648,-	45,-	2.574,-	4.267,-
Gas-Niedertemperaturk.	1.603,-	150,-	2.831,-	4.584,-
Nahwärmeversorgung	2.149,-	0	4.186,-	6.335,-
BHKW + Thermische Solaranlage				
ohne Förderung.	7.044,-	835,-	1.240,-	9.119,-
mit Förderung	5.637,-	835,-	1.240,-	7.712,-

Die Vollkostenrechnung zeigt ein deutlich negativeres Bild als die Betrachtung der PLV-Verhältnisse. Grund hierfür sind die derzeit sehr niedrigen Gaspreise, die dazu führen, daß kapitalintensive Maßnahmen „unwirtschaftlich“ sind. Hinzu kommt, daß der Arbeitspreis Nahwärme höher ist, als der Arbeitspreis Erdgas, obwohl weniger Primärenergie zur Bereitstellung der Nahwärme benötigt wird. Das relativ ungünstige Abschneiden des Klein-BHKW ist auf die geringen Stromgutschriften bei Einspeisung sowie auf die relativ hohen Wartungskosten zurückzuführen.

12 Elektrische Energieversorgung

Der elektrische Energiebedarf trägt wesentlich zu den CO₂-Äquivalent-Emissionen eines Haushaltes bei. Im typischen Neubauvorhaben eines 4-Personen-Haushaltes werden etwa 30 % - 40 % der Emissionen durch den Stromverbrauch verursacht.

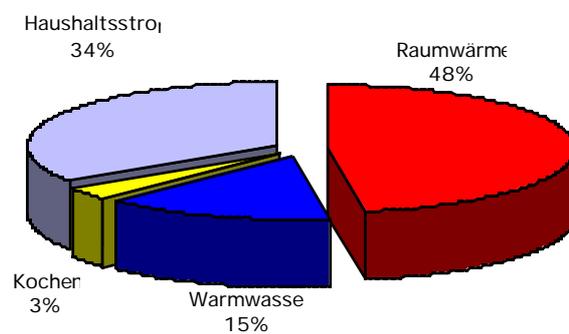


Abb. 15: Anteilige CO₂-äquivalenten Emissionen bei typischem Haushaltsstromverbrauch und Bauvorhaben nach WSVÖ 95.

Beim Bauvorhaben Vauban werden durch die Maßnahmen Passivhausstandard, Solaranlage und BHKW die CO₂-äquivalenten Emissionen im Bereich Wärme um insgesamt 73 % gesenkt. Bei unverändertem Elektrizitätsbedarf würde eine Gesamtreduktion von 64 % erreicht. 50 % aller CO₂-äquivalenten Emissionen würden dann durch den Haushaltsstromverbrauch verursacht.

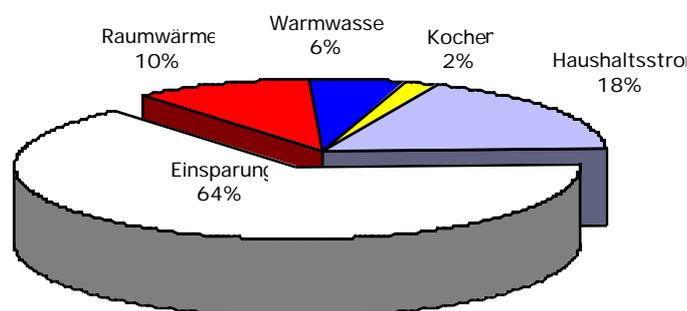


Abb. 16: Anteilige CO₂-äquivalente Emissionen beim Bauvorhaben Passivhaus Vauban.

Um das gegebene CO₂-Reduktionsziel von mehr als 80 % in allen Energieverbrauchssektoren zu erreichen, ist eine Reduktion des Haushaltsstromverbrauchs auf von heute 1.100 kWh auf unter 400 kWh pro Person zwingend erforderlich.

12.1 Maßnahmen zur Energieeinsparung

Der jährliche elektrische Energiebedarf eines typischen 4-Personenhaushaltes beträgt etwa 4.400 kWh.

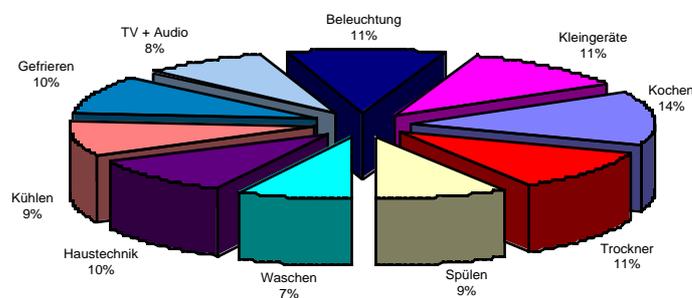


Abb. 17: Stromverbrauch eines typischen 4-Personen-Haushaltes²³.

Als Zielwert wird ein Energiebedarf von weniger als 1.500 kWh pro Jahr angestrebt.

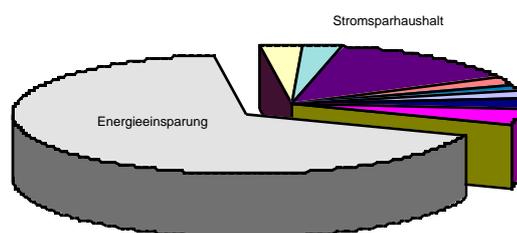


Abb. 18: Zielwert: Stromsparhaushalt

²³ Daten nach: BUND, 79110 Freiburg, 1996 und nach Fraunhofer-ISE, 79110 Freiburg, Schlußbericht BMBF 0338973A, Konzeption und Bau eines energieautarken Solarhauses, 1996

Folgende technische Möglichkeiten bestehen um dieses Ziel zu erreichen.

Tab. 42: Maßnahmen zur Energieeinsparung im Haushalt (4-Personen-Haushalt)

	Durchschnitt [kWh / a]	Marktbeste Technik [kWh / a]	Bemerkungen	Kosten [DM]
Trockner	470	-	Anbindung an Lüftungsanlage	2.000,-
Spülen	390	130	Warmwasseranschluß	0,-
Waschen	320	125	Warmwasseranschluß	300,-
Haustechnik	440	584		0,-
Kühlen	410	100	Neuanschaffung: marktbesten *-Kühlschrank	1.000,-
Gefrieren	440	90	Neuanschaffung: marktbeste Gefriertruhe	950,-
TV + Audio	360	100	Teilweise Neuanschaffung, Keine Stand-by Verluste	1.300,-
Beleuchtung	470	100	Energiesparlampen	200,-
Kleingeräte	500	200	Teilweise Neuanschaffung	1.300,-
Gasherd + Gasanschluß in der Küche	600	-	Neuanschaffung Gasherd	1.100,-
Summe	4.400	1.430		8.150,-

Die Maßnahmen im einzelnen:

Trocknen:

Im UG ist ein Trockenraum vorgesehen, der in unmittelbarer Nähe zur Haustechnikzentrale angeordnet und zusammen mit den Haustechnikräumen thermisch gegenüber dem kalten Kellerbereich gedämmt wurde. Die Ergebnisse der thermischen Simulation ergaben, daß die Temperaturen in diesen beiden Räumen nur auf maximal 16°C absinken. Eine zusätzliche Beheizung des Trockenraumes ist daher nicht vorgesehen.

Der Trockenraum wird an die Lüftungsanlage angebunden, um eine kontinuierliche Belüftung bei gleichzeitiger Wärmerückgewinnung zu ermöglichen.

Waschen:

Ebenfalls im UG befinden sich mehrere Gemeinschaftswaschmaschinen, die jeweils an Warmwasser angeschlossen werden.

Beleuchtung:

Zur Beleuchtung werden überall Energiesparlampen eingesetzt.

Spülen.

Alle Geschirrspüler werden an Warmwasser angeschlossen.

Kochen mit Gas.

Jede Küche erhält einen separaten Gasanschluß. Aus Kostengründen erfolgt keine separate Erfassung des Gasverbrauches.

Haustechnik:

Beim Einsatz der Umwälzpumpen wurde darauf geachtet, daß möglichst kleine Pumpentypen zum Einsatz kommen. Zur Raumheizung werden drehzahl-geregelte Pumpen eingesetzt.

Tab. 43: Übersicht Umwälzpumpen

Funktion	Anschlußleistung [W]	Betriebszeit [h]	Energiebedarf [kWh/a]
Biogasanlage	20	2.190	44
Heizung	20 -40	3.060	92
Lüftung (Heizregister)	20	500	10
WW-Bereitung	2 x 20	1.500	60
Abgas-WT	20	2.500	50
BHKW	20	2.500	50
Solaranlage	2 x 40 W	1.800	144
Lüftung Abluft	350	8.760	3.066
Zuluft	430	5.400	2.322
Gesamt			5.838

Kühlen und Gefrieren:

Kühlschrank und Gefriertruhen sollten neu angeschafft werden. Im Wohnraum sollten nur Kühlgeräte ohne Tiefkühlfach verwendet werden. Die Gefriertruhen sollten im kalten Kellerbereich aufgestellt werden, um bei niedriger Umgebungstemperatur einen möglichst niedrigen Energiebedarf zu gewährleisten. Ferner wird empfohlen, insgesamt nur 4 Gefriertruhen für das gesamte Gebäude vorzusehen.

TV, Video, Audio:

Minimierung der Stand-By-Verluste durch Einsatz spezieller Vorschaltgeräte sowie durch Verwendung von schaltbaren Steckleisten.

Information und Beratung:

Um die Bauherren zu sensibilisieren, wurde eine erste Informationsveranstaltung durchgeführt, die die Bedeutung des Haushaltsstromverbrauchs verdeutlichen sollte. Auf Initiative der Bauherren wurde vereinbart, daß eine Bestandsaufnahme zum derzeitigen Gerätebestand sowie zum Haushalts-

strombedarf erfolgt. Auf Basis dieser Unterlagen sollen von Seiten des Fraunhofer ISE konkrete Vorschläge für die einzelnen Haushalte erfolgen.

12.2 Photovoltaik

Photovoltaikanlagen lassen sich durch den modularen Aufbau in unterschiedlichsten Leistungsbereichen realisieren. Bei Vorhandensein einer Photovoltaik-Anlage mit Netzanschluß wird an sonnigen Tagen überschüssige Energie ins öffentliche Netz eingespeist, nachts und bei weniger günstigen Witterungsbedingungen wird Energie aus dem öffentlichen Netz bezogen.

Investitionskosten und Energieertrag

Die Investitionskosten für netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen belaufen sich zur Zeit auf etwa 15.000.-DM/kWp. Pro Kilowatt installierter Solarmodul-Spitzenleistung kann mit einem jährlichen Energieertrag von ca. 1000 kWh/a gerechnet werden.

12.3 Preis/Leistungsverhältnis elektrische Energie

Die Bilanzierung der ermittelten Daten führt zu folgendem Ergebnis.

Tab. 44: Preis/Leistungsverhältnis für den Bereich elektrische Energie

Bauteil	Nutzungsdauer [a]	Einsparung el. Energie [kWh/a]	Primärenergie-Einsparung [kWh/a]	Investition [DM]	PLV [DM/kWh]
Photovoltaik	25	950	2.850	15.000,-	0,21
Energiespar-Haushalt	15	3.110	9.960	8.150,-	0,05

Ergebnis:

Die Einrichtung eines Energiesparhaushaltes zählt zu den besonders wirtschaftlichen Maßnahmen.

13 Bilanzierung der klimarelevanten Emissionen

13.1 Datengrundlage

Mit Hilfe des Schadstoffbilanzierungsprogrammes GEMIS²⁴ wurden die CO₂-äquivalenten Emissionen der einzelnen Versorgungssysteme bewertet. Für die einzelnen Versorgungssysteme ergeben sich folgende Kennwerte:

Tab. 45: Schadstoffkennwerte

Energieversorgungssystem	klimarelevante Emissionen [kg/MWh]
Thermische Energie	
Klein-BHKW (Senertec)	81
Gas-Brennwertkessel	239
Gas-Niedertemperaturkessel	264
Rapsöl-BHKW	148
Nahwärmeversorgung (Baugebiet Vauban)	91
Thermische Solaranlage	40 ²⁵
Elektrische Energie	
Photovoltaik ²⁶	136
Strommix (lokal)	689

²⁴ GEMIS, Version 3.01, HMUEJFG, Wiesbaden, 1989-97

²⁵ Annahme: 404 kWh/m_a, 1,5% Stromverbrauch.

²⁶ Energieertrag: 950 kWh/kWp.

13.2 Emissionen des Gesamtvorhabens

Auf Basis der angeführten Schadstoffkennwerte erfolgt eine Gegenüberstellung der Ausgangssituation mit dem derzeitigen Planungsstand. Als Ausgangssituation gilt hierbei ein Bauvorhaben nach WSV0'95 mit typischen Verbrauchskennwerten für Warmwasser und elektrische Energie.

	Heizenergie		Warmwasser		Elektrische Energie		Anteil	Einsparung
Ausgangssituation								
Endenergie [kWh/a]	149.520	63%	43.120	18%	44.000	19%	100%	0%
Emissionen [kg/a]	39.500	49%	11.381	14%	30.316	37%	100%	0%
Planungsstand²⁷								
Endenergie [kWh/a]	31.900	13%	35.300	6%	14.300	6%	25%	75%
abzgl. Solaranlage			./20.625					
Emissionen [kg/a]	2.580	3%	1.990	2%	10.049	12%	17%	83%

Das vorgegebene Ziel, einer CO₂-Einsparung von mehr als 80% in den Bereichen Heizung, Warmwasser und elektrische wird gut erreicht. Im Vergleich zu einem typischen Neubauvorhaben werden 66.600 kg CO₂ äquivalente Emissionen eingespart.

²⁷ Der Wärmebedarf für die Biogasanlage wird nicht bilanziert.

Anhang 1: Bauteilbeschreibung Passivhaus Vauban

	s (m)	lambda (W/mK)	R (m ² K/W)
1 Dach (DA)			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,130
1 Gipskarton	0,013	0,210	0,062
2 Installationsebene (8% Holzanteil)	0,060	0,048	1,250
3 OSB-Platte	0,016	0,130	0,123
4 Mineralfaser-Dämmung (WLG 040), AGEPA Träger, 5% Holzanteil	0,300	0,045	6,667
5 OSB-Platte	0,022	0,130	0,169
6 Gefälledämmung (2 bis 12cm)	0,070	0,040	1,750
7 Dachabdichtung	0,001		0,000
8 Vlies und Drainagefolie	0,030		0,000
9 Humus als Pflanzentragschicht	0,070		0,000
Wärmeübergangswiderstand außen			0,040
Summe	0,582		10,191
k (W/m ² K)			0,098
2 Boden zu Keller (BK)			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,130
1 Bodenbelag	0,000		0,000
2 Estrich	0,040	1,200	0,033
3 Trennlage	0,000		0,000
4 Trittschalldämmung	0,050	0,050	1,000
5 Dämmung (PU)	0,150	0,030	5,000
6 Beton	0,180	2,100	0,086
Wärmeübergangswiderstand außen			0,000
Summe	0,420		6,249
k (W/m ² K)			0,160
3 Außenwand, nichttragend N + S ohne Installationen (AW)			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,130
1 Gipskarton	0,025	0,210	0,119
2 Installationsebene	0,100	0,048	2,083
3 PE-Folie	0,000		0,000
4 OSB-Platte	0,016	0,130	0,123
5 Mineralfaser-Dämmung (WLG 040), AGEPA Träger, 5% Holzanteil	0,242	0,045	5,378
6 Holzweichfaserplatte	0,018	0,060	0,300
7 Lattung vertikal	0,030		0,000
8 Holzemmentplatte	0,019		0,000
Wärmeübergangswiderstand außen			0,040
Summe	0,450		8,173
k (W/m ² K)			0,122

	s (m)	lambda (W/mK)	R (m ² K/W)
4 Außenwand, nichttragend N + S mit Installationen (AWI)			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,13C
1 Gipskarton	0,025	0,210	0,119
2 Installationsebene	0,000		0,00C
3 PE-Folie	0,000		0,00C
4 OSB-Platte	0,016	0,130	0,123
5 Mineralfaser (WLG040), 5% Holzanteil	0,242	0,045	5,37E
6 Holzweichfaserplatte	0,018	0,060	0,30C
7 Lattung vertikal	0,030		0,00C
8 Holzzementplatte	0,019		0,00C
Wärmeübergangswiderstand außen			0,04C
Summe	0,350		6,09C
k (W/m ² K)			0,164
5 Giebelwände, tragend, O + W (Gieb)			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,13C
1 Gipsputz	0,005	0,400	0,013
2 Mauerwerk, KS	0,240	1,100	0,21E
4 Dämmung	0,240	0,040	6,00C
6 Putz	0,005	0,400	0,013
7			0,00C
Wärmeübergangswiderstand außen			0,04C
Summe	0,490		6,413
k (W/m ² K)			0,15€
6 Geschoßdecken (GD)			
Wärmeübergangswiderstand innen	0,000		0,13C
1 Bodenbelag	0,022		0,00C
2 Estrich	0,040	1,200	0,033
3 Trennlage	0,000		0,00C
4 Trittschalldämmung	0,025	0,040	0,62E
5 Beton	0,180	2,100	0,08€
Wärmeübergangswiderstand außen			0,04C
Summe	0,267		0,914
k (W/m ² K)			1,094

	s	lambda	R
(BPhk)	(m)	(W/mK)	(m ² K/W)
7 Bodenplatte, Heizungskeller			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,130
1 Estrich	0,035	1,200	0,029
2 Beton	0,200	2,100	0,095
3 Dämmung	0,080	0,030	2,667
4 Sauberkeitsschicht	0,050		0,000
5 PE-Folie	0,000		0,000
6 Kiesfilterschicht	0,150		0,000
Wärmeübergangswiderstand außen			0,040
Summe	0,515		2,961
k (W/m ² K)			0,338
8 Bodenplatte, Lagerkeller			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,130
1 Estrich	0,035	1,200	0,029
2 Beton	0,200	2,100	0,095
3 Sauberkeitsschicht	0,050		0,000
4 PE-Folie	0,000		0,000
5 Kiesfilterschicht	0,150		0,000
Wärmeübergangswiderstand außen			0,040
Summe	0,435		0,294
k (W/m ² K)			3,397
9 Innenwand, tragend			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,130
1 Putz	0,010	0,700	0,014
2 KSV	0,240	0,789	0,304
3 Putz	0,010	0,700	0,014
Wärmeübergangswiderstand außen			0,040
Summe	0,260		0,503
k (W/m ² K)			1,989
10 Innenwand, Leichtbau			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,130
1 Gipskarton	0,025	0,211	0,118
2 Dämmung	0,100	0,040	2,500
3 Gipskarton	0,025	0,211	0,118
Wärmeübergangswiderstand außen			0,040
Summe	0,150		2,907
k (W/m ² K)			0,344

	s	lambda	R
	(m)	(W/mK)	(m ² K/W)
11 Erdreichberührende Wand, Heizungskeller (EBWhk)			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,13C
1 Dämmung	0,100	0,040	2,50C
2 Beton	0,300	2,100	0,143
Wärmeübergangswiderstand außen			0,04C
Summe	0,400		2,813
k (W/m ² K)			0,35€
12 Erdreichberührende Wand, Lagerkeller (EBWkk)			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,13C
1 Beton	0,300	2,100	0,143
Wärmeübergangswiderstand außen			0,04C
Summe			0,313
k (W/m ² K)	0,300		3,19€
13 Rahmen überdämmt (FS)			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,13C
3 Holzrahmen	0,068	0,130	0,523
4 PE-Folie	0,000		0,00C
5 OSB-Platte	0,000	0,130	0,00C
6 Mineralfaser (WLG040), 5% Holzanteil	0,172	0,045	3,822
7 Holzweichfaserplatte	0,018	0,060	0,30C
8 Lattung vertikal	0,030		0,00C
9 Holzementplatte	0,019		0,00C
Wärmeübergangswiderstand außen			0,04C
Summe	0,307		4,815
k (W/m ² K)			0,20€
14 Anschluß Wand (Ansch)			
Wärmeübergangswiderstand innen			0,13C
1 PE-Folie	0,000		0,00C
2 OSB-Platte	0,016	0,130	0,123
3 Mineralfaser (WLG040), 5% Holzanteil	0,240	0,045	5,333
4 Holzweichfaserplatte	0,018	0,060	0,30C
5 Lattung vertikal	0,030		0,00C
6 Holzementplatte	0,019		0,00C
7			0,00C
Wärmeübergangswiderstand außen			0,04C
Summe	0,323		5,92€
k (W/m ² K)			0,16€

Anhang 2: Kostenvergleich: Heiz- und Lüftungssysteme

	Variante D1	Variante D2	Variante D3	Variante D4	Variante Z1	Variante Z1
	Entlüftung über Rohrentlüfter	Lüftungszentral- gerät je Whg. Nachheizen d. Zuluft	Wärmepumpen- kompakt- aggregat je Wohnung	Einzelraum- Lüftungssysteme, dezentral je Raumeinheit	Zentrales Lüftungsgerät mit dezentraler Lufterwärmung Nachheizen d. Zuluft	Zentrales Lüftungsgerät Radiatoren
	Radiatoren			Radiatoren		
Lüftung						
Zentralgerät						
Zentralgerät + Peripherie	0	122.800	279.860	101.500	46.595	46.595
Elektro	0	0	0	10.000	0	0
Regelung	0	4.000	6.500	12.800	0	0
Heizregister	0	0	13.000	0	0	0
Summe	0	126.800	299.360	124.300	46.595	46.595
Zuluft						
Außenwand-Luftdurchlaß	0	0			0	0
Schalldämpfer	0	6.194	6.194	0	6.194	6.194
Zuluftventile	0	7.072	7.072	0	7.025	7.025
Irisklappen	0	6.500	6.500	0	6.500	6.500
Brandschutz	0	4.894	4.894	0	15.904	15.904
Leitungen + Formteile	0	11.912	11.912	0	21.726	21.726
Zuluftturm/ Dachdurchführungen	0	0	0	0	3.549	3.549
Sonstiges	0	10.000	10.000	0	208	208
Summe	0	46.572	46.572	0	61.106	61.106
Abluft						
Abluftventilator	20.250	0	0	20.250	0	0
Schalldämpfer	0	2.724	2.724	0	2.724	2.724
Abluftventile	0	3.077	3.077	0	3.220	3.220
Brandschutz	0	9.906	9.906	0	9.906	9.906
Leitungen + Formteile	13.400	13.400	13.400	13.400	13.400	13.400
Abluftturm/ Dachdurchführungen	5.600	5.600	5.600	5.600	6.718	6.718
Sonstiges	0	133	133	0	74	74
Summe	39.250	34.841	34.841	39.250	36.042	36.042
Sonstiges						
Dämmung	0	15.280	15.280	0	27.524	27.524
Sonderleistungen + Sonstiges	4.952	7.191	4.198	7.325	7.852	7.852
Summe	4.952	22.471	19.478	7.325	35.376	35.376
Summe Lüftung	44.201	230.683	400.250	170.874	179.120	179.120
Heizung						
Heizsystem (Radiatoren + Zubehör, Lufterhitzer)	50.859	13.000	0	41.400	52.000	41.400
Regelung	2.500	2.500	0	2.500	2.500	2.500
Rohrleitungen & Zubehör	25.000	10.000	5.000	18.300	25.000	18.300
Wärmedämmung	7.000	5.800	0	5.800	5.800	5.800
Heizsystem						
Summe Heizung	85.359	31.300	5.000	68.000	85.300	68.000

Anhang 3: Kostenberechnung Wärmeversorgung

Nur im Originalbericht

Anhang 4: Details (Luftdichtheit)

Nur im Originalbericht

Anhang 5: Wärmeschutznachweis

Nur im Originalbericht

Referenzen

- 1 Niedrigenergiehäuser Heidenheim, Hauskonzepte und erste Meßergebnisse, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart 1992 und 7. EUZ Baufachtagung 1995, Energie- und Umweltzentrum, Springe-Eldagsen 1995