Sonnenhaus / Passivhaus
Vergleich zweier Baukonzepte für Minimalenergiebauweise

Diplomarbeit
in der Fachrichtung regenerative Energien
Studiengang Versorgungstechnik und Umwelttechnik
der
Hochschule Esslingen

Katrin Koch

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Thomas Rohrbach (HSE)
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Wolfgang Hilz (SHI)

Bearbeitungszeitraum: 01. Oktober 2007
bis 31. Januar 2008

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Gegenstand der hier vorgestellten Arbeit ist die Untersuchung und der Vergleich von Passivhäusern und Sonnenhäusern in Bezug auf ökologische, ökonomische und Gesichtspunkte des Komforts. Hierbei werden jeweils unterschiedliche Faktoren beleuchtet wie Primärenergieaufwand, CO_2-Ausstoß, Verbrauch von „grauer Energie“ (Ökologie), Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Ökonomie) und Aspekte der Lüftungsvarianten, Behaglichkeit und Regelfähigkeit (Komfort). Als Grundlage dient ein standardisiertes Gebäude, auf welches jeweils beide Formen dieser Bauweisen angewandt werden, um eine vergleichbare Basis zu schaffen. Der Schwerpunkt dieser Ausarbeitung wird auf die Ökologie gelegt, wobei auf die unterschiedlichen Ansätze der eingesetzten Technik von Passivhaus und Sonnenhaus eingegangen wird. Anhand aktueller Projektierungsprogramme und Berechnungsverfahren wird ein aussagekräftiges Ergebnis über den Primärenergiebedarf und somit über die Umweltfreundlichkeit der beiden Bauvarianten dargestellt. Des Weiteren wird die Nutzungsfreundlichkeit und das Preis-/Leistungsverhältnis betrachtet.

Schlagwörter: Passivhaus, Sonnenhaus, Klimakompaktgerät, Wärmerückgewinnung, thermische Solaranlage, Solarspeicher, Wärmebedarf, Primärenergiebedarf, Wirtschaftlichkeit

Abstract

An essay of the analysis and the comparison of passive-houses and solar-houses in reference to environmental, financial and aspects of comfort is being presented. In each aspect different facts will be analysed like input of primary energy, CO_2-output, usage of “grey energy” (environmental), cost-effectiveness (financial) and aspects of ventilation technologies, comfortableness and controllability (comfort). Basis is a standardised building in which both methods of construction are implemented for having a base to compare them. Focus of this thesis will be the environmental aspect, mainly the difference of the implanted techniques of passive-house and solar-house. With actual software-programmes and ways of calculation a significant result about primary-energy and the eco-friendliness of those two construction-types will be demonstrated. Furthermore the friendliness of utilization and the price-performance ratio will be analysed.

Keywords: Passive House, Solar House, Compact-Energy-Tower, Heat Exchanger, Solar Heating System, Permanent Solar Storage, Heat Requirement, Primary-Energy, Cost-Effectiveness

Inhaltsverzeichnis

Erklärung **2**

Kurzfassung **3**

Abstract **3**

Inhaltsverzeichnis **4**

Abbildungsverzeichnis **7**

Tabellenverzeichnis **8**

Abkürzungsverzeichnis **9**

Formelverzeichnis **10**

Indizes **11**

1 Einleitung **12**

1.1 Grundproblematik und Handlungsbedarf 12

1.2 Passivhaus und Sonnenhaus im Vergleich 13

1.2.1 Grundlagen des Passivhauses 13

1.2.2 Grundlagen des Sonnenhauses 14

1.3 Zielsetzung 15

2 Grundlagen und Definitionen des Referenzgebäudes **16**

2.1 Gebäude 16

2.1.1 Allgemeine Anforderungen an das Referenzgebäude 16

2.1.2 Passivhaus 21

2.1.3 Sonnenhaus 22

2.1.4 Standardhaus nach EnEV 24

2.2 Anlagentechnik 25

2.2.1 Allgemein 25

2.2.2 Passivhaus 26

2.2.3 Sonnenhaus 33

2.2.4 Standardhaus nach EnEV 41

2.3 Wichtige, anzugleichende Parameter 42

2.3.1 Hygienischer Mindestluftwechsel 42

2.3.2 Trinkwasser-Wärmebedarf 43

2.3.3 Wärmegewinne durch interne Wärmequellen 43

3 Berechnungsprogramme **44**

3.1 Passivhaus-Projektierungspaket 2007 (PHPP) 44
3.1.1 Möglichkeiten und Funktion des Berechnungsprogramms 44
3.1.2 Problematik und Grenzen des Berechnungsprogramms 45
3.2 Hottgenroth Software, Energieberater 6.02 46
3.2.1 Möglichkeiten und Funktion des Berechnungsprogramms 46
3.2.2 Problematik und Grenzen des Berechnungsprogramms 47
3.3 Vela Solaris, Polysun 4.0 Designer 47
3.3.1 Möglichkeiten und Funktion des Berechnungsprogramms 47
3.3.2 Problematik und Grenzen des Berechnungsprogramms 48

4 Projektierung und Berechnungen Passivhaus 49
4.1 Passivhaus (Variante 1) 49
4.2 Passivhaus (Variante 1 mit Solaranlage) 52
4.3 Klimakompaktgerät in Variante 1 53
4.4 Passivhaus (Variante 2) 54
4.5 Passivhaus (Variante 2 mit Solaranlage) 55
4.6 Klimakompaktgerät in Variante 2 56
4.7 Passivhaus (Variante 3) 58
4.8 Nachheizung Bad 59

5 Projektierung und Berechnungen Sonnenhaus 61
5.1 Bestimmung des Heizwärmebedarfs mit Hottgenroth Energieberater-Software 64
5.2 Manuelle Berechnungen der Aufwandszahlen (DIN 4701-10) 66
5.2.1 Trinkwarmwasser 66
5.2.2 Heizung 66
5.2.3 Summe der Verluste 67
5.3 Solarsimulation mit Polysun 4.0 Designer 67
5.4 Weitere Berechnungen nach DIN 4701-10 69
5.4.1 Heizung 69
5.4.2 Hilfsenergie 69
5.4.3 Ergebnisse 70
5.5 Rechenergebnisse im Überblick, Endenergie, Primärenergie 71
5.6 Auswahl der Anlagentechnik 72
5.6.1 Kollektoren 72
5.6.2 Speicher 72
5.6.3 Nachheizung 73

6 Standardhaus nach EnEV 74
6.1.1 Berechnung nach EnEV 74
6.1.2 Auswahl des Gas-Brennwertgeräts 75

7 Überschlägige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 76
7.1 Standardhaus 77
7.2 Passivhaus 78
7.3 Sonnenhaus 79

8 Vergleich und Auswertung der Ergebnisse 80
8.1 Ökologie 80
8.1.1 Passivhaus 82
8.1.2 Sonnenhaus 83
8.2 Ökonomie 84
8.2.1 Passivhaus 84
8.2.2 Sonnenhaus 85
8.2.3 Allgemein 85
8.3 Komfort 86
8.3.1 Passivhaus 86
8.3.2 Sonnenhaus 86
8.4 Weitere Aspekte 88
8.4.1 CO_2-Bilanz 88
8.4.2 Graue Energie 88
8.4.3 Primärenergiefaktor Strom 89

9 Zusammenfassung und Ausblick 90

Anhang A: Berechnungen Passivhaus 91
A.1 Berechnungen U-Werte 91
A.2 Prüfwerte der Kompaktgeräte 93
A.3 Weitere Berechnungen 95

Anhang B: Berechnungen Sonnenhaus 100
B.1 Berechnungen U-Werte 100
B.2 Weitere Berechnungen 102

Anhang C: Weitere Berechnungen nach DIN 4701-10 106
C.1 Berechnungen Verluste 106
C.2 Berechnung Biomasse-Erzeuger Aufwandszahl und Hilfsenergien (SH) 109

Literaturverzeichnis 114

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bauvariante eines Passivhauses [1] und eines Sonnenhauses [2] 16
Abbildung 2: Ansichten Referenzgebäude 18
Abbildung 3: Vermeidung von Wärmebrücken durch umlaufende Dämmung 20
Abbildung 4: Anlagenschema Passivhaus 26
Abbildung 5: Funktionsprinzip Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung 27
Abbildung 6: Temperaturverlauf mit EWÜ im Sommer (links) und Winter (rechts) 29
Abbildung 7: Vereinfachtes Funktionsprinzip einer Wärmepumpe 30
Abbildung 8: Anlagenschema Passivhaus [1] 32
Abbildung 9: Ideale Neigung und Ausrichtung der Sonnenkollektoren 34
Abbildung 10: Schnitt durch den Sonnenkollektor HFK 35
Abbildung 11: Kollektorwirkungsgrad 35
Abbildung 12: Solartank mit 3-stufiger Be-/Entladung zur Temperaturschichtung 36
Abbildung 13: Funktionsprinzip Hochleistungs-Grundofeneinsatz Typ Powall Vario K38
Abbildung 14: Anlagenschema Sonnenhaus [2] 40
Abbildung 15: Anlagenschema Standardhaus nach EnEV 42
Abbildung 16: Auslegung des mittleren Luftwechsels im Passivhaus 50
Abbildung 17: Tabellenausschnitt „Nachweis“ Variante 1 51
Abbildung 18: Tabellenausschnitt „Nachweis“ für Variante 1 mit Solaranlage 52
Abbildung 19: Tabellenausschnitt „Nachweis“ für Variante 2 54
Abbildung 20: Vom PHPP berechnete solare Gewinne 55
Abbildung 21: Tabellenausschnitt „Nachweis“ für Variante 2 mit Solaranlage 56
Abbildung 22: Tabellenausschnitt „Heizlast“, überarbeitete Berechnung 58
Abbildung 23: Grundriss Bad 59
Abbildung 24: Energieflussdiagramm Sonnenhaus 61
Abbildung 25: Definierte Systemgrenze 62
Abbildung 26: Vorgehensweise bei den Berechnungen für das Sonnenhaus 63
Abbildung 27: Darstellung des Heizenergiebedarfs im Sonnenhaus 65
Abbildung 28: Anlagenschema Sonnenhaus für die Solarsimulation 68
Abbildung 29: Endenergie- und Primärenergiebedarf im Sonnenhaus 71
Abbildung 30: Aufbau und Anschlüsse Solarspeicher 72
Abbildung 31: Darstellung des Energieverbrauchs im Standardhaus 75
Abbildung 32: Nutz-, End- und Primärenergiebedarf im Vergleich 80
Abbildung 33: Flächenspezifischer Primärenergiebedarf 81
Abbildung 34: Primärenergiebedarf nach eingesetzten Energieträgern in kWh/a 82
Abbildung 35: Aufteilung des Energie-Inputs und des Primärenergiebedarfes im SH...83
Abbildung 36: Primärenergiebedarf im SH bei Einsatz einer Lüftungsanlage 87
Abbildung 37: CO_2-Bilanz bezogen auf den Endenergieverbrauch 88
Abbildung 38: PE-Bedarf bei der Nutzung von Strom aus erneuerbarer Energie.....89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gebäudemaße 18
Tabelle 2: Fenster 19
Tabelle 3: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Standardhaus 77
Tabelle 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Passivhaus 78
Tabelle 5: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Sonnenhaus 79

Abkürzungsverzeichnis

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
EnEV	Energieeinsparverordnung 2007
EWÜ	Erdwärmeübertrager
HP	Heizperiode
IWQ	Interne Wärmequellen
KFW	Förderbank der deutschen Wirtschaft
KFW 40	Baustandard, 45% besser als EnEV-Anforderung
KKG	Klimakompaktgerät
PE	Primärenergie
PHI	Passivhausinstitut
PHPP	Passivhaus Projektierungspaket 2007
Q	Wärmebedarf
rm	Raummeter
SHI	Sonnenhausinstitut
TWW	Trink-Warmwasser
V1	Variante 1 (ohne Solaranlage)
V1S	Variante 1 (mit Solaranlage zur Unterstützung der TWW-Bereitung)
V2	Variante 2 (ohne Solaranlage)
V2S	Variante 2 (mit Solaranlage zur Unterstützung der TWW-Bereitung)
WB	Wärmebrücke
WP	Wärmepumpe
WT	Wärmetauscher
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz

Formelverzeichnis

A	Fläche; im speziellen die Hüllfläche eines Gebäudes [m²]
c	Spezifische Wärmekapazität [Wh/(kg·K)]
e	Anlagenaufwandszahl [-]
f_P	Primärenergieumwandlungsfaktor [-]
g	Wirksamer Gesamtenergiedurchlassgrad [-]
H	Spezifischer Wärmeverlust [W/K]
L	Länge [m]
m	Masse [kg]
n	Luftwechselrate [h^{-1}]
n_{50}	Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz [h^{-1}]
Q	Wärmemenge des Jahresheizenergiebedarfs [kWh/a]
q	spezifische Wärmemenge des Jahresheizenergiebedarfs [kWh/(m²·a)]
S	Solarer Deckungsgrad [-]
t	Zeitspanne [d/a]
U	Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m²·K)]
V	Nettovolumen (belüftetes Volumen) [m³]
x	Anzahl [-]
z	Pumpenlaufzeit [h/d]
α	Deckungsanteil [-]
β	Jahresarbeitszahl Wärmepumpe [-]
ε	Leistungszahl Wärmepumpe [-]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
η	Wirkungsgrad [-]
ϑ	Temperatur [°C]
ψ	Wärmebrückenverlustkoeffizient [W/(m·K)]

Indizes

Bio	Biomasse-Wärmeerzeuger
c,e	Übergabe im Raum (control + emission)
d	Verteilung (distribution)
E	Endenergie
g	Erzeugung (generation)
GZ	Grundzyklus
HK	Heizkreis
h	Raumheizung...(Wärmebedarf)
H	Raumheizung...(Energiebedarf)
HE	Hilfsenergie
HP	Heizperiode
i	interne Gewinne
m	mittere, mittlerer
N	Nutz...
p	Primär…
s	solare Gewinne
sol	solar
t	Transmission
tw	Trinkwarmwasser... (Wärmebedarf)
TW	Trinkwarmwasser...(Energiebedarf)
u	Umgebung
WE	Wärmeenergie (auch ohne Index)
Δ	Differenz

1 Einleitung

1.1 Grundproblematik und Handlungsbedarf

Bereits bei der Ölkrise 1973 wurde deutlich, in welcher Abhängigkeit vom Ölimport sowohl Wirtschaft als auch private Haushalte stehen. Die seither stetig und derzeit nahezu explosionsartig steigenden Preise für Rohöl und andere fossile Brennstoffe sowie die Tatsache, dass die Rohölförderung bereits am Förderungspeak angelangt ist, oder jenes bereits mutmaßlich überschritten hat, machen deutlich, wie wichtig ein Umdenken beim Thema Energieverbrauch ist. Ein wichtiger Ansatzpunkt sind hierbei die privaten Haushalte, die ca. ein Viertel des Endenergieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland ausmachen, diese folgen somit dicht dem Hauptenergieverbraucher Verkehr (Verbrauch ca. 30%). Dies macht anschaulich, welch immenses Potenzial zur Energieeinsparung in der Hand der privaten Haushalte liegt.

Wie lange die fossilen Energieträger noch den Bedarf decken können, bzw. wirtschaftlich sind, kommt auf verschiedene Faktoren an. Fakt ist, dass ein Vergleich der weltweiten Energieverbrauchsentwicklung und die Kapazitäten der fossilen Energieförderung bis in wenigen Jahrzehnten eine gewaltige Diskrepanz aufweist, welche es dringend nötig macht, neue Energiekonzepte zu entwickeln und zu fördern.

Es gibt bereits zahlreiche Konzepte und Möglichkeiten in der technischen Gebäudeausrüstung, fossile Brennstoffe möglichst sparsam für die Beheizung und die Trinkwassererwärmung einzusetzen. Jedoch stellt sich hierbei die Frage, welches Konzept für welches Objekt am besten geeignet, was am umweltfreundlichsten und was am effizientesten ist. Dabei ist auch darauf zu achten, dass das Gesamtkonzept stimmt, also nicht nur ein effizientes und wirtschaftliches Heizsystem installiert wird, sondern auch eine hochdichte Wärmedämmung und ein bewusstes Nutzungsverhalten der Bewohner angestrebt wird.

Auch die Herstellung der eingesetzten Materialien und die Technik besitzen einen nicht zu vernachlässigenden Herstellungsaufwand, welcher häufig vernachlässigt wird. Bei dieser so genannten „Ökobilanz“ gestaltet es sich allerdings schwierig, bis wohin die Systemgrenzen reichen sollen, also zu entscheiden bis auf welche Ebene die Bilanzierung zurückgreifen soll. Genauso ist es nicht nur entscheidend, wie die Herstellung abläuft, sondern auch wie ressourcenschonend die eingesetzten Rohstoffe sind und wie recyclebar die Materialien nach der für das Gebäude ausgelegten Lebensdauer sind.

Bei all diesen Überlegungen sollte natürlich alles in einem finanzierbaren Rahmen stattfinden und sich die eventuellen Mehrkosten gegenüber einem konventionellen Heizsystem zumindest teilweise amortisieren.

Ein attraktiver Faktor, sich für ein energiesparendes und auf erneuerbaren Energien basierendes Bau- und Heizkonzept zu entscheiden, ist zweifellos eine weitgehende Unabhängigkeit von Energiekrisen, die innovative und zukunftsweisende Technik und der hohe Wohnkomfort. Durch die staatliche Förderung mit dem Marktanreizprogramm der BAFA und vergünstigte Kreditvergabe bei der KfW-Bank werden diese Minimalenergiebauweisen noch attraktiver.

1.2 Passivhaus und Sonnenhaus im Vergleich

In dieser Arbeit möchte ich die zwei derzeit wahrscheinlich bedeutendsten Varianten der Minimalenergiebauweise vorstellen und diese auf unterschiedlichste Aspekte hin untersuchen. Verglichen werden sollen die derzeit sehr gängige und unter den als umwelt- bzw. ressourcenschonenden Bauweisen als führend proklamierte Methode des Passivhauses in Gegenüberstellung des noch eher unbekannten Sonnenhauses.

1.2.1 Grundlagen des Passivhauses

Beim **Passivhaus** liegt das Hauptkriterium auf einem möglichst niedrigen Heizwärmebedarf, was bedeutet, dass dieser im Jahr maximal 15 kWh/(m²a) beträgt. Dies wird durch eine überdurchschnittliche, luftdichte (Drucktestluftwechsel muss $n_{50} < 0{,}6\ h^{-1}$ sein) und wärmebrückenfreie Dämmung erreicht. Der Primärenergiekennwert muss (inklusive Haushaltsstrom) < 120 kWh/(m²a) betragen [1]. Zum Einsatz kommen nur Materialien, die hochwirksame Dämmeigenschaften aufweisen, dabei dürfen keine Kompromisse eingegangen werden. Genauso wichtig ist die Ausrichtung der großen Fensterflächen nach Süden um passive, solare Wärmegewinne effektiv nutzen zu können. Somit soll auf ein konventionelles, „aktives“ Heizsystem mit wasserführenden Heizflächen zur Raumbeheizung verzichtet werden können. Es wird stattdessen ein Klimakompaktgerät eingesetzt; das darin integrierte Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung sorgt für einen konstanten Austausch der Raumluft, was unbedingt notwendig ist, da die Gebäudehülle eine so hohe Dichtheit aufweist und dadurch kaum natürliche Infiltration möglich ist. Idealerweise wird die Zuluft über einen Erdwärmetauscher angesaugt und dabei vorerwärmt, bzw. im Sommer vorgekühlt. Über einen Wärmetauscher wird die Frischluft durch die gegenströmende Raumabluft noch weiter erwärmt. Die in der kalten Jahreszeit erforderliche Restwärme wird über ein wasserführendes oder elektrisch betriebenes Nachheizregister im Zuluftkanal zugeführt. Die Wärme wird bei Einfamilienhäusern meist von einer Luft-/Wasser-Wärmepumpe erzeugt, die ihre Wärme aus der Fortluft des Lüftungsgerätes bezieht. Da eine Wärmepumpe in der Leistung nicht modulierbar ist und nur On-/Off-Funktion hat, muss ein Speicher nachgeschaltet sein. Darin wird das Trinkwasser erwärmt und zur Entnahme bereitgehalten. Einige Hersteller bieten die Geräte auch mit zusätzlichem Heizkreis für wasserführende Heizflächen an, welche ebenfalls aus dem Speicher gespeist werden.

Bei großer Wärmeabnahme kann der Speicher elektrisch nachgeheizt werden. Optional kann auch eine kleine Solaranlage zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung integriert werden.

1.2.2 Grundlagen des Sonnenhauses

Anders funktioniert das **Sonnenhaus**, teilweise auch Solar-Aktivhaus genannt. Zwar wird hier auch ein guter Dämmstandard vorausgesetzt, im Vordergrund steht aber ein geringst möglicher Primärenergiebedarf (maximal 15 kWh/m²a exklusive Haushaltsstrom), der durch die Wärmeversorgung ausschließlich über regenerative Energieträger erreicht wird. Das Sonnenhauskonzept setzt einen solaren Deckungsgrad von mindestens 50 % voraus, für die Nachheizung des Pufferspeichers wird ein effizienter Biomassekessel oder Zentralheizungsofen empfohlen. Die Anforderungen an die Wärmedämmung entsprechen dem „KFW40–Dämmstandard“ also einer Verbesserung zum von der EnEV geforderten Wert von H'_T um mindestens 45 % [2]. Die Sonnenenergie wird über ein Solarkollektorfeld gewonnen, das in das Dach oder die Fassade des Gebäudes integriert ist. Wie auch beim Passivhaus ist also eine verschattungsfreie Südlage des Gebäudes äußerst wichtig. Ein großer, vorzugsweise im beheizten Bereich untergebrachter Wasserspeicher speichert die Solarwärme verlustarm über mehrere Tage oder sogar Wochen. Auf diese Weise besteht auch keine Konkurrenz zwischen aktiver und passiver Sonnenergienutzung. Es sind grundsätzlich verschiedene Speicher- und Regelungskonzepte möglich, wobei auf eine gute Temperaturschichtung und effektive Ausnutzung der Wintersonne wert gelegt wird.

Die Wärmeverteilung im Sonnenhaus erfolgt über wasserführende Flächenheizsysteme, jeder Raum ist separat temperierbar. Niedrige Heizmitteltemperaturen begünstigen einen hohen Solarertrag.

Als Nachheizung erfreuen sich – als Alternative zu Pellet- und Stückholzvergaserkesseln – wohnraumbeheizte Stückholzöfen mit Wassereinsatz großer Beliebtheit bei Sonnenhausbewohnern. Wichtig für den Heizkomfort ist eine hohe wasserseitige Leistung bei dosierter Wärmeabgabe an den Raum. Die Nachheizperiode verkürzt sich im Sonnenhaus auf einen Zeitraum von etwa Mitte November bis Mitte Februar. Während dieser Zeit muss nur etwa 10- bis 40-Mal eingeheizt werden (je nach Kesseltyp, Heizgewohnheiten und solarem Deckungsgrad).

Wenn Wärmeerzeugung, Wärmespeicherung und Wärmeverteilung komplett innerhalb der beheizten Gebäudehülle untergebracht sind, fallen in der Anlagentechnik nur sehr geringe nicht nutzbare Wärmeverluste an.

Auf den Einsatz von Hocheffizienzpumpen wird beim Sonnenhauskonzept großen Wert gelegt, da der Hilfsenergiebedarf in Relation zur Wärmeerzeugung einen hohen Anteil am – zwar geringen – Primärenergiebedarf hat.

Auf eine Lüftungsanlage kann im Sonnenhaus aus energetischer Sicht verzichtet werden, da sie kaum Einfluss auf den Primärenergiebedarf hat. Aus anderen, wie z.B. hygienischen Gründen kann sie aber durchaus von Vorteil sein.

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit soll sein, diese beiden Konzepte anhand einer definierten Vergleichsbasis auf ihre Stärken und Schwächen hin zu überprüfen. Hauptaugenmerk soll dabei auf der Anlagentechnik und dem Energieverbrauch liegen, dafür ist eine definierte Grundlage sehr wichtig, die den Vergleich erst ermöglicht. Als Vergleichsbasis soll ein fiktives Gebäude erstellt werden, das einmal als Passivhaus und einmal als Sonnenhaus ausgelegt wird. Zur besseren Veranschaulichung wird dasselbe Gebäude auch mit einem konventionellen Standard erstellt, wie es derzeit nach den Vorgaben der Energie-Einsparverordnung üblich ist.

Der Baustandard soll als Grundlage für den tatsächlichen Energiebedarf der Referenzgebäude definiert werden. Anschließend wird ein geeignetes Anlagensystem zur Gebäudebeheizung und Trinkwarmwasserbereitung ausgewählt und dimensioniert. Anhand dieser Anlagentechnik soll wiederum eine detaillierte Untersuchung stattfinden wie hoch nun der tatsächliche Primärenergieaufwand ist, um den Energiebedarf der Gebäude zu decken. Dabei ist darauf zu achten, dass das Passivhaus und das Sonnenhaus jeweils die Auflagen des entsprechenden Konzeptes erfüllen, dieselben Rahmenbedingungen erhalten und nur bei begründeten Angaben unterschiedliche Ausgangswerte erhalten. Unterschiede können insofern auftreten, da die Anlagentechnik völlig voneinander abweicht und dadurch nicht direkt miteinander vergleichbar ist. Was im Endeffekt zählt ist das Ergebnis des tatsächlichen Energieverbrauchs, dargestellt unter realistischen Bedingungen und demselben Nutzerverhalten. Auch dieser End- und Primärenergieverbrauch soll anschließend wieder mit dem eines konventionellen Standardhauses verglichen werden.

Ausgehend von den erstellten Gebäudemodellen und der zugehörigen Anlagentechnik soll eine überschlägige Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgen, welche die Frage klären soll, ob die im Vergleich zu konventioneller Bauart vermutlich höheren Investitionskosten durch die Energieeinsparung amortisiert werden kann und in welchem Zeitraum dies ablaufen wird.

2 Grundlagen und Definitionen des Referenzgebäudes

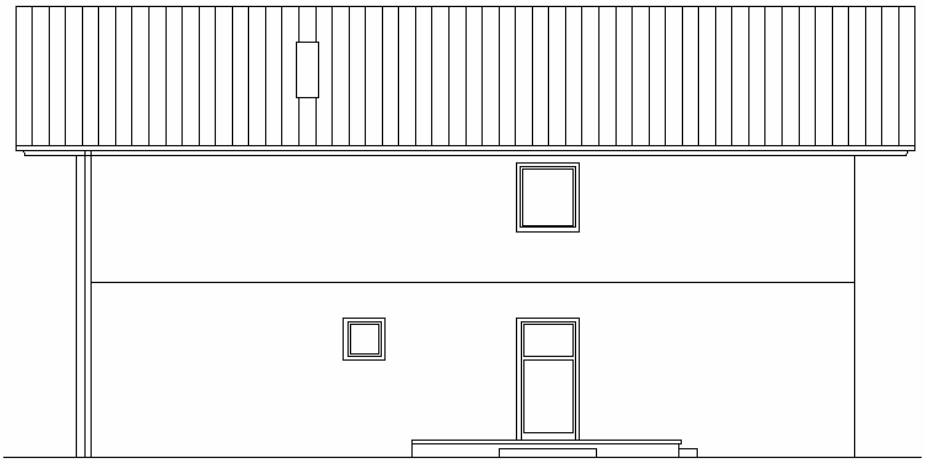
2.1 Gebäude

2.1.1 Allgemeine Anforderungen an das Referenzgebäude

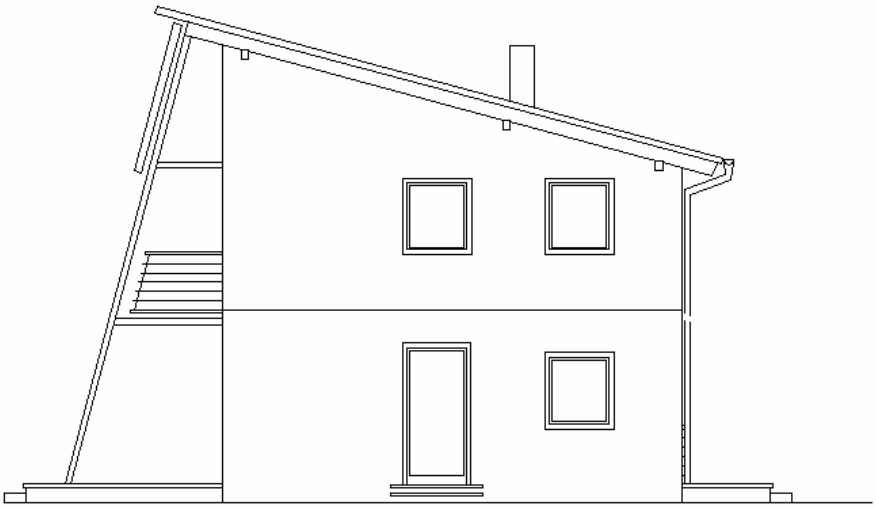
Abbildung 1: Bauvariante eines Passivhauses [1] und eines Sonnenhauses [2]

In Abbildung 1 sind zwei bereits realisierte Objekte eines Passivhauses und eines Sonnenhauses zu sehen. Die Bauformen sind einander sehr ähnlich, diese Architektur soll Grundlage für das Referenzgebäude der vorliegenden Arbeit sein. Das bedeutet, der Gebäudegrundkörper (lichte Außenmaße) mit Fensterflächen ist für beide Baukonzepte identisch um eine Vergleichsbasis (identisches A/V_e-Verhältnis, vgl. EnEV) zu schaffen. Dieser kompakte Baukörper ist eine gängige Architektur, um die Gebäudehüllfläche so gering wie möglich zu halten und somit die Heiztransmissionsverluste zu begrenzen [3]. Das Pultdach vermindert schlecht nutzbare Dachschrägen, die die anrechenbare Wohnfläche verringern und begünstigt die Ausrichtung großer Fensterflächen in Richtung Süden, wodurch die Bilanz der passiven Wärmegewinne verbessert wird. Auch der Balkon und das südseitig angebrachte Vordach werden jeweils doppelt genutzt, nämlich zum Anbringen der Sonnenkollektoren (sehr wichtig beim Sonnenhaus) und zur konstruktiven Verschattung der Fensterflächen im Sommer, um einer Überhitzung der Innenräume vorzubeugen. Jedoch kann über die Fenster auch viel Wärme verloren gehen, deshalb werden die Verglasungsflächen der Nordseite, die nicht passiv genutzt werden können, möglichst klein gehalten. In die Berechnung gehen die lichten Außenmaße nach DIN EN ISO 13789 Anhang-B ein. In Abbildung 2: Ansichten Referenzgebäude“ sind die Ansichten des zu Grunde gelegten Gebäudes sichtbar; Aus den Gebäudeplänen wurden sämtliche Außenmaße sowie Fenstermaße übernommen. Die wärmeübertragende Außenhülle hat 502,4 m², das Gebäudevo-

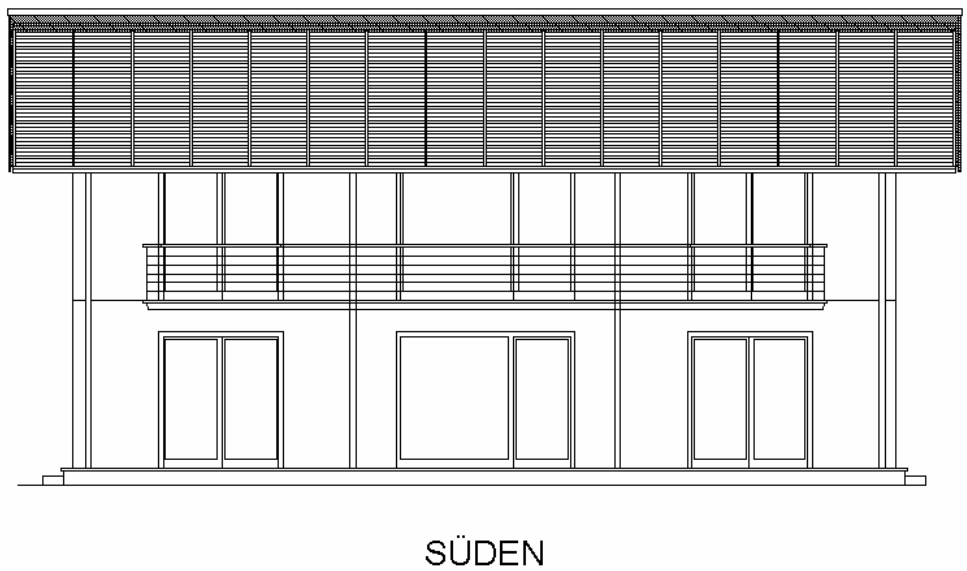
lumen beläuft sich auf 705 m³, das A/V_e-Verhältnis nach EnEV 2007 beträgt somit 0,71. Nachfolgend sind die Bezugsmaße für die Berechnungen aufgeführt:



NORDEN



OSTEN



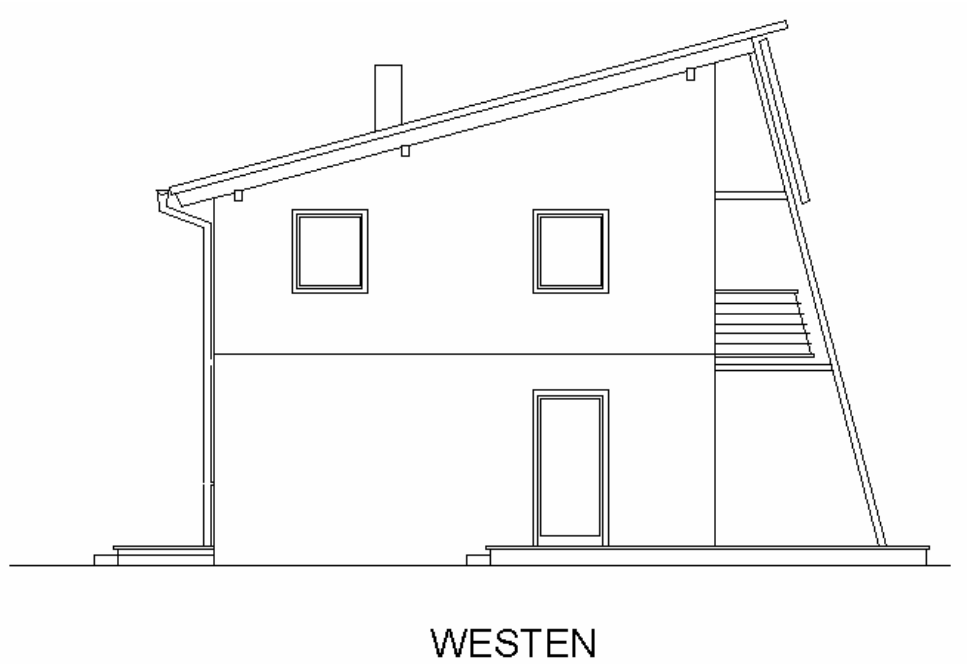


Abbildung 2: Ansichten Referenzgebäude

Tabelle 1: Gebäudemaße

Länge:	14,00 m
Breite:	7,50 m
Höhe, Süd:	7,72 m
Höhe, Nord:	5,71 m
Dachneigung:	15°

Tabelle 2: Fenster

Anzahl	Bezeichnung	Breite in [m]	Höhe in [m]
1	Nord 1.OG	1,135	1,250
1	Nord EG	0,770	0,760
2	Ost 1.OG	1,135	1,250
1	Ost EG	1,125	2,310
1	Ost EG	1,135	1,250
2	Süd 1.OG	2,120	2,310
1	Süd 1.OG	3,046	2,310
2	Süd EG	2,120	2,310
1	Süd EG	3,046	2,310
2	West 1.OG	1,135	1,250
1	West EG	1,125	2,310

Das PHPP, mit dem unter anderem der Heizwärmebedarf des Passivhauses berechnet wird, schlägt eine Wohnfläche von ca. 35 m²/Person vor (Im PHPP als Energiebezugsfläche bezeichnet). Das Referenzgebäude hat nach Wohnflächenverordnung (WoFlV) eine Wohnfläche von 152 m², was in dem geforderten Rahmen liegt. Beim Sonnenhaus entfallen ungefähr 6m² Wohnfläche auf den Ofeneinsatz der Nachheizung und den Solarspeicher ($\frac{\pi}{4} \bullet (1,6\text{m Durchm.} + 2 \bullet 0,25\text{m Dämmung})^2 = 3,5\text{m}^2$), das Passivhaus verliert durch seine dickere Außenwanddämmung ca. 4 m² an Wohnfläche. Außerdem benötigt das Klimakompaktgerät mit integriertem Speicher und evtl. Schallschutzdämmung und die Verteilung der Zu- und Abluftkanäle über dickere Innenwände bzw. Verteilschächte ebenfalls Raum, den man mit ca. 1,5-2,0 m² ansetzen kann und somit wieder eine gleiche Basis von 146 m² hat.

Aufgrund der unterschiedlichen Standards, die es zu erfüllen gilt, variiert die Dämmstärke und die Gestaltung der Südfassade. Auf die Dämmung wird in den nachfolgenden Kapiteln noch Bezug genommen. Gemeinsam sollen jedoch beide Varianten einen Balkon im 1.OG und ein Vordach zur konstruktiven Verschattung der Südfenster für die Sommermonate haben. Beide Bauteile sind so konzipiert, dass im Sommer bei Sonnenhöchststand die Fenster fast vollständig verschattet sind und im Winter bei Sonnentiefststand komplett zur passiven Sonnenenergienutzung beitragen können. In Abbildung 2 hat das Vordach eine Neigung von 75°, diese Neigung wird einmal auf das Referenzgebäude Sonnenhaus mit

65° und das Passivhaus mit 35° angepasst. Anhand der in Abbildung 2 auf Ost- und Westseite erkennbaren Stützen ist abzuleiten, dass der Balkon von der Baukonstruktion entkoppelt ist und dadurch für dieses Bauteil keine Wärmebrücken entstehen. Auch bei sämtlichen anderen Stellen, an denen Wärmebrücken entstehen können, wird jeweils wie in der Realität das Minimum an Verlust angestrebt, da bei diesen Minimalenergiebauten und vor allem beim Passivhaus eine Vernachlässigung korrekter Dämmung gravierende Auswirkungen auf den Transmissionswärmeverlust hat.

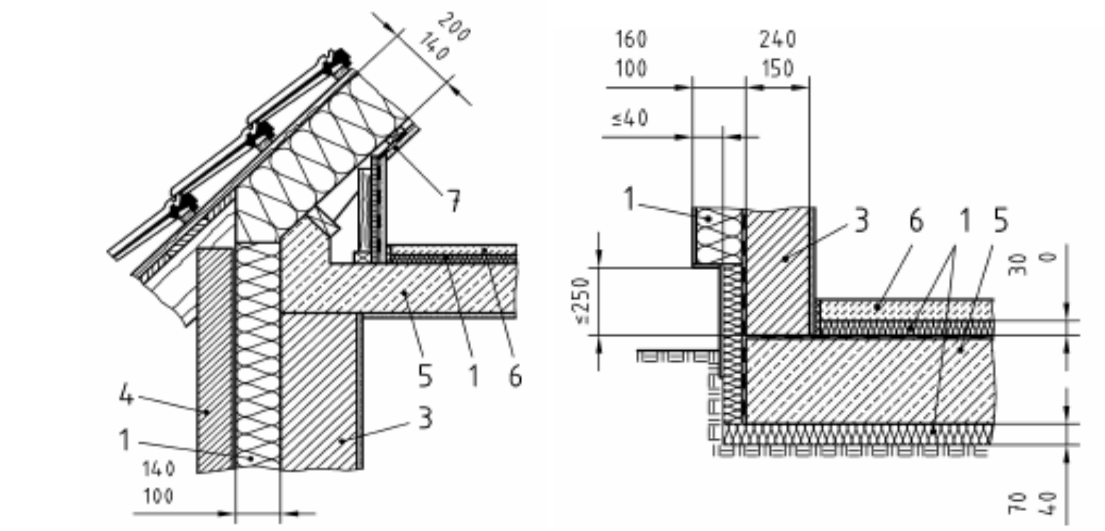


Abbildung 3: Vermeidung von Wärmebrücken durch umlaufende Dämmung

Das Gebäude soll direkt nach Süden ausgerichtet und absolut verschattungsfrei sein. Dies ist nur in relativ großzügiger Bebauung möglich und hat zur Folge, dass die Windschutzkoeffizienten mit $e_{Wind} = 0{,}07$ und $f_{Wind} = 15$ für mäßige Abschirmung anzusetzen sind [3].

Für beide Gebäude wird Massivbauweise gewählt. Das Gebäude soll von vier Personen genutzt werden. Gewählter Standort ist Würzburg, da die Stadt das mitteldeutsche Klima repräsentiert. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt hier 9,1 °C.

Für die EnEV-Berechnung wird festgelegt, dass jeweils ein Luftdichtigkeits-Drucktest nach Anhang 4 Nr. 2 EnEV stattgefunden hat.

Eine Warmwasser-Zirkulation wird weder beim Beispiel Passivhaus noch beim Sonnenhaus eingesetzt, um die damit verbundenen Leitungsverluste zu vermeiden.

Prinzipiell haben beide Baukonzepte ähnliche Vorgaben, also ein hoher Dämmstandard und ein dadurch resultierender niedriger Heizenergieverbrauch und eine hohe Dichtheit des Gebäudes. **Diese gemeinsame Basis ähnlicher baulicher Anforderungen macht den Vergleich der Baukonzepte überhaupt möglich.**

Der geforderte Wert für den Primärenergiebedarf liegt allerdings sehr weit auseinander. Zwar gehen beim Passivhaus in die geforderten 120 kWh/m²a noch die Haushaltsgeräte mit in die Berechnung ein und die fürs Sonnenhaus geforderten 15 kWh/m²a beziehen sich rein auf die Anlagentechnik. Da Haushaltsstrom jedoch sehr stark nutzerabhängig ist und als Berechnungsgrundlage ein identisches Nutzerverhalten für beide Versionen zu Grunde gelegt werden muss, kann dieser Stromverbrauch aus der Berechnung ausgeklammert werden. Somit wird in der Gesamtbilanz für den Primärenergieaufwand nur der Stromverbrauch für die Anlagentechnik bilanziert. **Die Untersuchung der Hintergründe für den evidenten Unterschied in den Anforderungen an den Primärenergiebedarf stellt einen der Schwerpunkte dieser Arbeit dar.**

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wird ein Standardhaus eingeführt, das die Vorgaben der EnEV erfüllt.

Da in dieser Diplomarbeit vorwiegend die Anlagentechnik untersucht werden soll, werden die Bauteile so genau und realistisch wie möglich aber nur so detailliert wie nötig zusammengestellt. Wichtig ist, dass sowohl die U-Werte der Einzelbauteile, als auch der Dämmstandard insgesamt realistisch sind und die jeweiligen Mindestanforderungen erfüllen.

2.1.2 Passivhaus

Wichtigster Ansatz zur Energieeinsparung beim Passivhaus ist die Minimierung des Heizwärmebedarfs. Das resultiert aus der Tatsache, dass ca. 2/3 der benötigten Energie in konventionellen Gebäuden für die Heizwärme benötigt und hierbei das größte Einsparpotential gesehen wird. Entsprechend streng sind die Anforderungen an die Wärmedämmung und Luftdichtheit der Gebäudehüllfläche, insbesondere auch an die Qualität der Fenster [4].

2.1.2.1 Hüllflächen

Für U-Werte der wärmedämmenden Außenhülle gelten folgende Mindestanforderungen:

- Außenwand: 0,1 - 0,15 W/m²K
- Dach: 0,1 - 0,15 W/m²
- Bodenplatte bzw. Kellerdecke: 0,1 - 0,15 W/m²K
- Fenster, 3fach-Wärmeschutzverglasung: 0,8 W/m²K

Dabei soll möglichst immer der beste Wert angestrebt werden.

2.1.2.2 Fenster

Die passiven solaren Gewinne gehen zu einem nicht unerheblichen Teil in die Projektierung des Passivhauses mit ein. Folglich ist es wichtig, möglichst hochwertige Fenster mit einem niedrigen U-Wert, aber einem hohen g-Wert zu wählen, um die Sonneneinstrahlung

bei sonnigem Wetter nutzen zu können, man aber möglichst geringe Verluste über die Fensterflächen bei trübem Wetter hat [5].

Die für die Berechnung relevanten Verglasungsflächen können aus dem hinterlegten Katalog im PHPP 2007 entnommen werden. Der Katalog enthält die derzeit aktuelle Liste von Fenstern und Rahmen, die nach dem Passivhaus-Prüfverfahren zertifiziert sind. Der kumulierte U-Wert für das Fenster mit Glas und Rahmenanteil wird in einer gesonderten Tabelle für jedes Fenster automatisch ermittelt.

2.1.2.3 Dichtheit

Laut Passivhausanforderung darf der durch einen Drucktest nachgewiesene Luftwechsel n_{50} 0,6 pro Stunde nicht überschreiten. Der Vergleich verschiedener realisierter Passivhäuser ergab, dass der Luftwechsel beim Drucktest meist zwischen 0,4 h^{-1} - 0,6 h^{-1} liegt. Liegt der Luftwechsel nur um wenige Zehntel höher, kann der geforderte Wert von 15 kWh/m²a häufig nicht mehr eingehalten werden. Dabei wird deutlich, welchen Einfluss eine dichte Gebäudehülle auf die Transmissionswärmeverluste ausübt.

2.1.2.4 Wärmebrücken

Wenn unterschiedliche Bauteile zusammengebaut sind (z.B. Geschossdecke/Außenwand) oder die thermische Gebäudehülle durchbrochen wird, entstehen so genannte Wärmebrücken, an denen ein größerer Wärmestrom nach außen transmittiert wird als durch den restlichen Baukörper. Beim Passivhaus ist es äußerst wichtig, solche Stellen entweder zu vermeiden oder auf ein Minimum zu beschränken. Da der Transmissionswärmeverlust beim PHPP auf die Gebäudeaußenmaße bezogen wird, kommt es an Gebäudekanten (z.B. Außenwand auf Dach) zu einer Überbewertung des dortigen H'_T - dort ist aber wegen der größeren Diagonalen bei korrekter Dämmung der Verlust kleiner als am Bauteil selbst - deshalb kann an diesen Stellen der Wärmebrückenkoeffizient ψ sogar negativ erscheinen und die Verlustbilanz verbessern.

2.1.2.5 Raumtemperatur

Die Raumtemperatur wird abweichend von der Standard-EnEV-Berechnung nicht auf 19 °C sondern auf 20 °C festgelegt. Dieser Wert wird so im PHPP vorgegeben und soll nur in begründeten Fällen geändert werden. Da anhand der Lüftungsanlage alle Räume auf dieselbe Temperatur beheizt werden, sollte dieser Wert auch eingehalten werden.

2.1.3 Sonnenhaus

Schwerpunktsetzung beim Sonnenhaus ist ein Gesamtkonzept, das für den Bau und Unterhalt mit einem möglichst geringen Primärenergieaufwand auskommt. Daher wird – neben der Forderung nach einem guten Dämmstandard – der Einsatz von Baustoffen mit einer guten Ökobilanz empfohlen.

2.1.3.1 Hüllflächen

Hier sollen die Anforderungen der Energieeinsparverordnung um wenigstens 45 % unterschritten werden bzw. es wird ein Dämmstandard nach KFW40 oder besser angesetzt. Die U-Werte werden für die hier vorliegende Berechnung so ausgelegt, dass die Anforderungen an den Transmissionswärmeverlust von H'_T = 0,508 W/m²K bei dem vorliegenden A/V_e-Verhältnis von 0,71 um 45 % besser sind, also H'_T = 0,28 W/m²K ergibt.

Als Orientierung werden folgende U-Werte vom Sonnenhaus-Institut angegeben:

- Außenwand: 0,14 - 0,18 W/m²K
- Dach: 0,12 - 0,16 W/m²
- Bodenplatte bzw. Kellerdecke: 0,20 - 0,24 W/m²K
- Fenster, 3fach-Wärmeschutzverglasung: 0,8 - 1,0 W/m²K

Der Transmissionswärmeverlust von H'_T = 0,28 W/m²K soll durch diese U-Werte erreicht werden. Dabei ist sogar noch ein Wärmebrückenzuschlag von 0,05 W/mK miteinbezogen.

2.1.3.2 Fenster

Auch beim Sonnenhaus ist eine sorgfältige Auswahl der Fenster notwendig, da über die Fenster viel Wärme gewonnen, aber auch verloren gehen kann.

Die passive Sonnenenergienutzung durch die Fenster konkurriert nicht mit der aktiven über die Sonnenkollektoren, weil die durch die Kollektoren gewonnene Solarstrahlung im Tank über mehrere Tage oder sogar Wochen zwischengespeichert werden kann. Interessant ist der überschlägige Vergleich der Jahreserträge beider Solargewinnungssysteme:

Bilanz Südfenster (3fach-Wärmeschutzglas: U-Wert 0,85 W/m²K, g-Wert 0,55 W/m²K):

nutzbarer Solarertrag:	100 kWh/m²a
Wärmeverlust :	- 70 kWh/m²a
„Bilanzgewinn“:	+ 30 kWh/m²a

Bilanz Solaranlage (Kollektorneigung 60°, sol. Deckungsgrad 60 %)

Bruttoertrag ca.	280 kWh/m²a
Überschüsse / Verluste	- 80 kWh/m²a
Nettoertrag ca.	+ 200 kWh/m²a

Durch die aktive Nutzung der Sonnenenergie kann also im Vergleich zur passiven Nutzung pro m² Solarfläche über das Jahr etwa der sechs bis siebenfache Ertrag gewonnen werden.

2.1.3.3 Dichtheit

Eine Anforderung an die Dichtheit des Gebäudes wird an das Sonnenhaus nicht explizit gestellt, sondern größtmögliche Dichtigkeit als selbstverständlich vorausgesetzt. Durch Leckagen in der Gebäudehülle könnten sonst nicht nur Wärmeverluste (insbesondere bei Wind) entstehen, sondern auch Tauwasserprobleme auftreten.

In der EnEV 2007 wird eine Luftwechselrate von 0,7 h^{-1} für Gebäude angesetzt, mit nachgewiesenem Drucktest darf 0,6 h^{-1} verwendet werden. Da aber beide Werte nicht praxisnah sind, wird der Wert manuell mit 0,4 h^{-1} eingesetzt, welcher ein repräsentativerer Wert aus Blower-Door getesteten Sonnenhäusern ist und der Mindestanforderung an den Luftwechsel nach DIN 1946-6 entspricht.

2.1.3.4 Wärmebrücken

In der Praxis werden die Wärmebrücken für die wärmeübertragende Umfassungsfläche im Sonnenhaus mit 0,05 W/m²K beaufschlagt, wie nach EnEV 2007 zulässig durch Anwendung von Planungsbeispielen nach DIN 4108 Beiblatt 2. Wie bereits unter 2.1.2.4 Wärmebrücken im Passivhaus beschrieben, werden bei Minimalenergiebauweisen diese eher überschätzt und zu hoch bewertet, was auch beim Sonnenhaus der Fall ist.

Allerdings soll das Referenzgebäude des Sonnenhauses lediglich den KFW40-Standard erfüllen. Wie dies erreicht wird, ist in der theoretischen Berechnung nicht relevant. Somit werden die Wärmebrücken für die Berechnung mit 0,05 W/m²K angesetzt [6].

2.1.3.5 Raumtemperatur

Bei einer Wärmebedarfsberechnung nach festen Bedingungen der EnEV wird eine Raumtemperatur von 19 °C angesetzt [6]. Diese Temperatur macht für das Sonnenhaus insofern Sinn, da die Räume auf unterschiedliche Innentemperaturen geregelt werden können und folglich kaum alle auf 20 °C beheizt werden, sondern in Schlaf- und Abstellräumen eher niedrigere und nur im Bad höhere Temperaturen gewünscht und eingestellt werden. Als Durchschnittswert für das gesamte Gebäude sind somit die 19 °C durchaus realistisch und werden für das Sonnenhaus übernommen.

2.1.4 Standardhaus nach EnEV

Das Standardhaus wird lediglich als Vergleichsmittel eingesetzt und soll den allgemeinen Standard, bzw. die tatsächlichen, von der EnEV geforderten Werte repräsentieren. Es werden keine detaillierten Bauteile erstellt sondern nur Referenzwerte festgelegt.

2.1.4.1 Hüllfläche

Insgesamt ist ein Transmissionswärmeverlust von H'_T = 0,508 W/m²K nach EnEV 2007 zu erreichen. Die Grenzwerte nach EnEV betragen hierfür:

- Außenwand: 0,40 W/m²K
- Dach: 0,30 W/m²K
- Bodenplatte: 0,35 W/m²K

2.1.4.2 Fenster

Für Fenster werden von der EnEV keine Mindestanforderungen an den U-Wert gestellt. Derzeit gängige U-Werte liegen zwischen 1,2 - 1,4 W/m²K für Verglasungsflächen.

2.1.4.3 Dichtheit

Ein Drucktest soll wie beim Passivhaus und beim Sonnenhaus stattfinden. Dafür darf als „Belohnung“ in der EnEV-Berechnung mit einem Wert von 0,6 h^{-1} anstatt mit 0,7 h^{-1} gerechnet werden.

2.1.4.4 Wärmebrücken

Die Wärmebrückenverluste werden pauschal mit dem Wärmebrückenzuschlag von ΔU_{WB} = 0,1 W/m²K (ohne Nachweis) nach EnEV 2007 eingerechnet.

(Hier gilt das Gleiche wie für die Wärmebrücken im Sonnenhaus: Der Zuschlag ist in der Regel zu hoch angesetzt, realistischer wäre ΔU_{WB} = 0,05 W/m²K. Jedoch soll nur die Anforderung nach EnEV erfüllt werden)

2.2 Anlagentechnik

2.2.1 Allgemein

Passivhaus und Sonnenhaus haben durchaus ähnliche Anforderungen an den Gebäudegrundkörper. Ganz anders sieht es bei der Anlagentechnik aus, die technische Gebäudeausrüstung verfolgt komplett unterschiedliche Konzepte, die einen Vergleich auf Energieeffizienz, Nutzerfreundlichkeit, Realitätsbezug und Wirtschaftlichkeit sehr interessant macht. Zunächst müssen die Anlagenkonzepte für die beiden Baustandards bestimmt werden, die auch einen repräsentativen Schnitt der Realität widerspiegeln. Zwar gibt es an die Anlagentechnik vom jeweiligen Institut keine konkreten Vorgaben, trotzdem lassen sich Anhand verschiedener Rahmenbedingungen, auf die in den nachfolgenden Kapiteln eingegangen wird, anschauliche Lösungen definieren.

2.2.2 Passivhaus

2.2.2.1 Festlegung und Begründung des gewählten Heizsystems

Zwar wird vom PHI keine Vorgabe gemacht, wie die Trinkwassererwärmung und die Nachheizung des Gebäudes zu erfolgen hat, jedoch ist die Auswahl für Einfamilienhäuser begrenzt. Aufgrund des äußerst niedrigen Heizwärmebedarfs im Passivhaus soll die Beheizung für das Referenzgebäude nur über die Zuluft erfolgen. Angesichts der höheren Baukosten und des sehr geringen Heizwärmebedarfes stellt sich beim Passivhaus letztendlich auch die Frage nach einem wirtschaftlich vertretbaren Investitionsaufwand für das Heizsystem [7].

Die meisten gängigen Systeme haben wesentlich zu hohe Leistungsbereiche, die Heizquelle müsste stets am untersten Leistungslimit arbeiten und ein ständiger Taktbetrieb wäre die Folge, was beides die Systemausnutzung enorm herabsetzen würde. Möglich wäre eine Nachheizung mit Erdgas, wobei in diesem Fall meist ein Anschluss an das Gasnetz aufgrund der kleinen abgenommenen Gasmenge unrentabel ist. Somit fällt die Wahl schlussendlich auf ein Klimakompaktgerät, das speziell für den Einsatz in Passivhäusern konzipiert wurde. Diese Geräte sind auch die einzigen Wärmeerzeuger, die zum Einsatz in Passivhäusern vom PHI zertifiziert sind.

Da Luft aber nur eine begrenzte Menge an Energie aufnehmen kann, sind die Anforderungen an das Gesamtsystem hoch. Die Wärmeversorgung muss in jedem Fall sichergestellt sein, um die Behaglichkeit zu gewährleisten. Ob und wie dies erreicht wird, soll in Kapitel 4 untersucht werden.

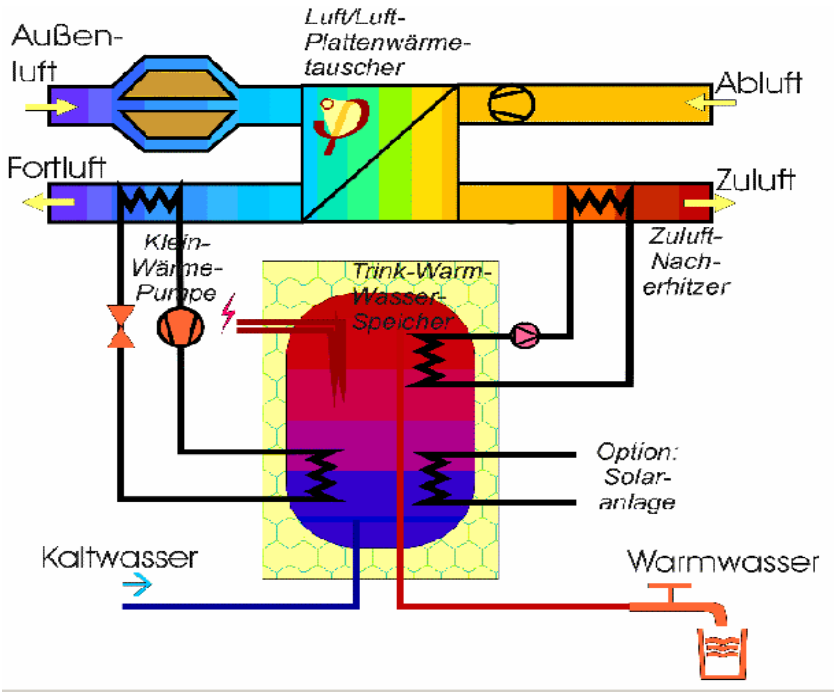


Abbildung 4: Anlagenschema Passivhaus

Im PHPP-Handbuch wird darauf verwiesen, dass eine Nachtabschaltung des Systems nur eine vernachlässigbar geringe Bedeutung besitzt. Zwar wird in der Fachinformation kein Bezug darauf genommen, in welchem Fall die Nachtabschaltung bedeutungslos ist - immerhin wird dadurch eine nicht zu vernachlässigende Menge an Hilfsstrom benötigt - dennoch wird dies für die Auslegung umgesetzt und auf eine Nachtabschaltung verzichtet.

2.2.2.2 Kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung

Aufgrund der hohen Dichtheit der Gebäudehülle ist eine kontrollierte Wohnraumlüftung (KWL) von hoher Bedeutung, da sonst die hygienische Mindestluftwechselrate und die von Menschen, Tieren und Prozessen (kochen, waschen, duschen, etc.) ausgehende Luftfeuchtigkeit nur über Fensterlüftung stattfinden und abtransportiert werden kann. Fensterlüftung führt zu hohen Wärmeverlusten und ist schwierig kontrollierbar, eine angemessene Wärmeversorgung kann bei starkem (auch zusätzlichem) Lüften im Winter entweder nicht mehr oder nur unter enormem elektrisch-energetischem Aufwand sichergestellt werden [8].

Vom PHPP wird ein Luftvolumen von 30 m³/(h•Person), nach DIN 1946-6 vorgeschlagen, also ein Zuluftvolumenstrom von 120 m³/h bei der gewählten Bewohnerzahl von vier Personen. Höhere Luftwechselraten können zwar mehr Heizwärme in die Räume nachspeisen, verbrauchen aber wiederum mehr Lüfterstrom und machen die Raumluft vor allem im Winter zu trocken.

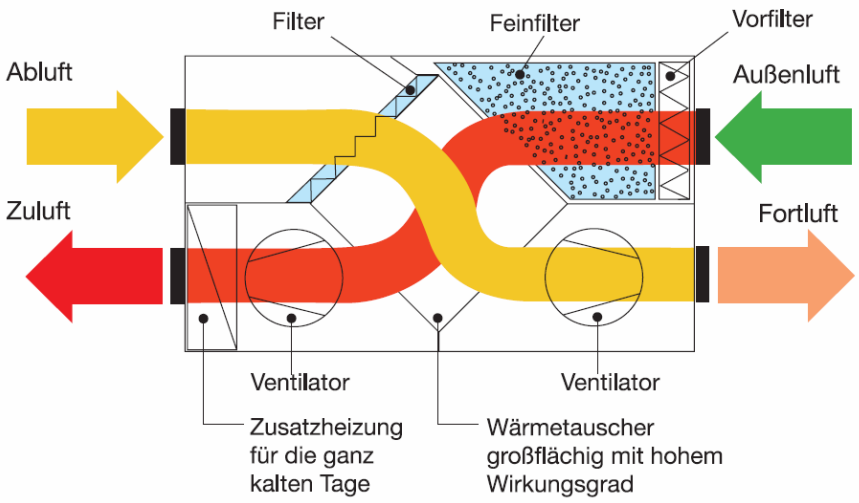


Abbildung 5: Funktionsprinzip Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung

Bei der kontrollierten Wohnraumlüftung wird die benötigte Außenluftmenge (Außenluft) über einen Filter angesaugt und zum Lüftungszentralgerät transportiert. Gleichzeitig wird aus dem Badezimmer, WC und der Küche die verbrauchte Luft (Abluft) abgesaugt und ebenfalls dem Lüftungszentralgerät zugeführt. Im Wärmetauscher des Lüftungsgeräts wird die in der Abluft enthaltene Wärmeenergie entzogen und an die Außenluft übertragen.

Beide Luftströme sind vollständig voneinander getrennt, so dass keine Vermischung stattfinden kann. Somit tritt weder eine Geruchsübertragung noch eine Übertragung von Schadstoffen auf. Vor dem Wärmetauscher sind zur Verhinderung von Staub- und Schmutzablagerungen Filter eingebaut. Die erwärmte und gefilterte Außenluft wird den Wohn- und Schlafräumen über Lüftungsrohre als Frischluft zugeführt (Zuluft). Dabei ist darauf zu achten, dass die Türen in den Innenräumen entsprechende Öffnungen aufweisen, die eine Strömung der Zuluft in die Überströmzonen und Ablufträume nicht behindern. Damit keine Schallübertragung von der Lüftungsöffnung in Raum A zu Raum B stattfinden kann, sollten in die Lüftungskanäle Telefonieschalldämpfer eingebaut werden. Eine zusätzliche Lüftung durch Öffnen der Fenster ist nicht mehr erforderlich und sollte auch aus Gründen der Energieeinsparung nicht durchgeführt werden. Die nach dem Wärmetauscher abgekühlte, verbrauchte Luft (Fortluft) wird ein weiteres Mal von einer Fortluftwärmepumpe genutzt und anschließend nach außen geführt.

Die Wärmerückgewinnung muss bei diesem System mindestens 75% betragen, um die Wärmeverluste klein genug für ein Passivhaussystem zu halten.

Die Nachheizung der Zuluft funktioniert nur in begrenztem Maße, da Luft nur eine relativ geringe Wärmemenge aufnehmen kann (bei Überhitzung, über 52 °C kann Staubverschwelung eintreten).

2.2.2.3 Außenluftvorwärmung mittels Erdwärmeübertrager

Der Außenluftansaugung der Lüftungsanlage wird ein Erdwärmeübertrager vorgeschaltet, der im Winter die Außenluft vorwärmen und im Sommer vorkühlen soll.

Für den Erdwärmeübertrager (EWÜ) wird in 0,5 – 2 m Tiefe ein Kunststoffrohr mit ca. 20 cm Durchmesser im Erdreich verlegt. Die Länge beträgt als Richtwert ca. 40 m, bei kürzeren Rohren ist die Frostfreiheit nicht mehr gewährleistet, bei längeren Rohren wird der Druckverlust zu hoch. Durch dieses Rohr wird die Außenluft angesaugt, bevor sie ins Lüftungsgerät transportiert wird. Da der Erdboden in dieser Tiefe ganzjährig frostfrei ist, wird die angesaugte Luft auch im Winter bis über den Gefrierpunkt erwärmt. Für den Betrieb des Lüftungsgeräts ist ein EWÜ nicht zwingend, aber von Vorteil: Die Luft wird vorerwärmt und somit die Frostgefahr am Wärmetauscher behoben. Im Sommer tritt der umgekehrte Fall auf: Die warme Außenluft wird im Erdboden deutlich abgekühlt, bevor sie das Lüftungsgerät erreicht und anschließend in das Haus strömt. Die Temperaturzyklen sind im Gegensatz zur direkten Sonnenenergienutzung relativ konstant über das Jahr verteilt.

Beim Bau ist darauf zu achten, dass folgende Punkte eingehalten werden:

- absolute Luft- und Wasserdichtheit, insbesondere an den Verbindungsstellen
- gleichmäßiges und ausreichendes Gefälle (2 bis 3°)

- lebensmittelechtes Material (innenseitig mit antibakterieller Schutzbeschichtung)
- Einplanung eines Spül- und Wartungsschachtes und eines Luftvorfilters
- Versickerungsschacht oder Abfluss für das entstehende Kondenswasser

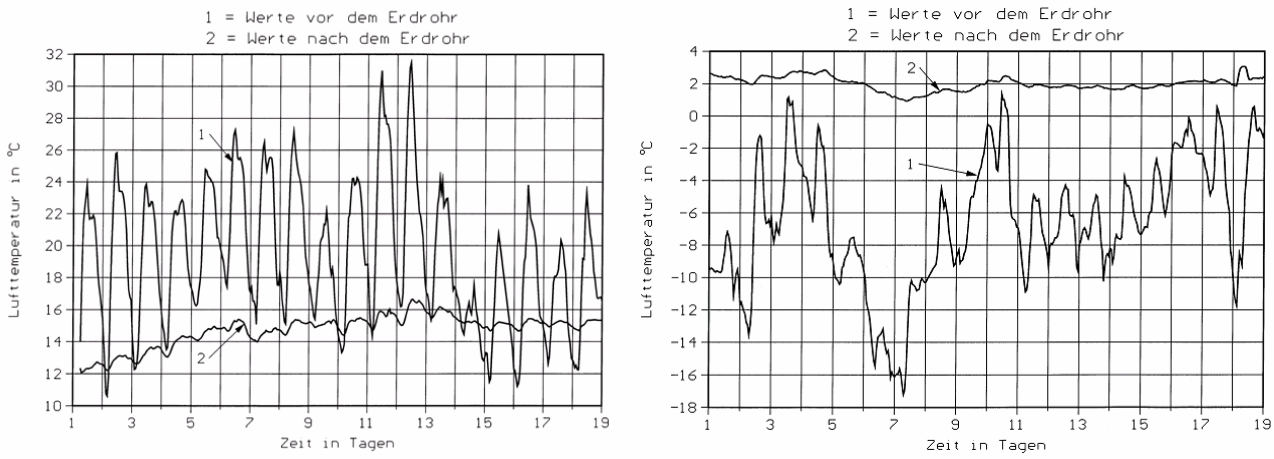


Abbildung 6: Temperaturverlauf mit EWÜ im Sommer (links) und Winter (rechts)

In Abbildung 6 wird ersichtlich, welch konstante Temperaturverläufe eine Außenluftansaugung über einen ca. 40 m langen Erdwärmeübertrager hat. Die Werte wurden in einer 19-tägigen Sommer- bzw. Winterphase ermittelt. Die durchschnittlichen 15 °C in der Sommerphase eignen sich gut um das Gebäude mit kühler Luft zu versorgen und helfen einer Überhitzung der Wohnräume vorzubeugen [9].

2.2.2.4 Trinkwassererwärmung und Nachheizung mittels Wärmepumpe

Zur Warmwasserbereitung und Nachheizung der Zuluft wird eine Wärmepumpe eingesetzt. Diese bezieht ihre Kaltquelle aus der Fortluft der Lüftungsanlage. In dieser ist immer noch so viel sensible Energie enthalten um die Kühlflüssigkeit auf ein Temperaturniveau zu heben, mit dem über einen Wärmetauscher das Trinkwasser im Speicher erwärmt werden kann. Die Wärmepumpe kann das Speicherwasser auf maximal 65 °C erwärmen, es empfiehlt sich aber, eine Trinkwassertemperatur mit 45 - 50 °C zu wählen, da die Wärmepumpe für so hohe Temperaturen drastisch an Effizienz einbüßt und der Stromverbrauch immens anstiege. Im Prinzip funktioniert eine Wärmepumpe wie ein umgekehrter Kühlschrank: Einem Medium (Luft im Kühlschrank / Fortluft) wird Energie entzogen und durch den nachfolgend beschriebenen Prozess in nutzbare Wärme umgewandelt [10]:

Eine Wärmepumpe (WP) besteht im Wesentlichen aus vier Teilen, dem Verdampfer, dem Verdichter, dem Kondensator und dem Expansionsventil. Im Verdampfer wird das im Wärmepumpenkreislauf zirkulierende Arbeitsmittel bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur (funktioniert bis weit unter 0 °C) durch Wärmezufuhr verdampft. Diese Wär-

me wird durch die Fortluft der Lüftungsanlage über einen Wärmeträgerzwischenkreislauf bereitgestellt. Das nun gasförmige Arbeitsmittel wird vom Kompressor angesaugt und verdichtet. Durch die Druckerhöhung findet gleichzeitig eine Temperaturerhöhung des Arbeitsmitteldampfs statt, so dass die Temperatur über der Warmwassertemperatur liegt. Noch unter hohem Druck verflüssigt sich das Arbeitsmittel im Kondensator unter Wärmeabgabe an die Wärmenutzungsanlage und tritt anschließend durch das Expansionsventil in den Niederdruckteil über, wo der Kreislauf wieder von vorne beginnt [11].

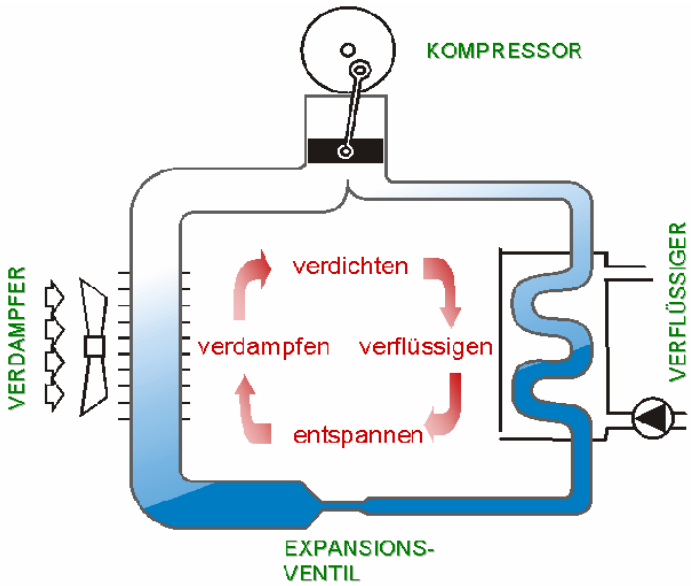


Abbildung 7: Vereinfachtes Funktionsprinzip einer Wärmepumpe

Zur Leistungsbestimmung gibt es verschiedene Wärmepumpen-Kennzahlen.

Zum einen die Leistungszahl (ε), sie ist definiert als das Verhältnis von Wärme am Ausgang einer Wärmepumpe zum benötigten Strom an deren Eingang. Diese Kennzahl gilt jedoch nur für einen bestimmten Betriebspunkt, sie ändert sich permanent je nach Quellen- und Abgabetemperatur.

Der COP-Wert dagegen gibt auch die Leistungen von Hilfsaggregaten, eventuelle Abtau-Energie und die anteilige Pumpenleistung für Umwälzpumpen wider. Damit ist der COP-Wert ein Gütekriterium für Wärmepumpen.

Leistungszahl und COP-Wert erlauben allerdings keine energetische Bewertung der Gesamtanlage. Für eine solche Bewertung ist die Jahresarbeitszahl entscheidend.

Somit ist die wichtigste Wärmepumpen-Kennzahl für die Wirkungsgradbestimmung die Jahresarbeitszahl (ß). Sie bezeichnet über ein Jahr hinweg das Verhältnis zwischen abgegebener Wärmemenge und zugeführter Energie. Wie der COP-Wert enthält auch die Jahresarbeitszahl anteilig die Leistungen von Umwälzpumpen und Hilfsstrom. Die Jahresar-

beitszahl kann somit auch als Anlagennutzungsgrad verstanden werden. Sie eignet sich damit zur energetischen Bewertung der Gesamtanlage.

Je höher die Jahresarbeitszahl, desto effizienter die Wärmepumpe. Um jedoch nennenswert Primärenergie einzusparen, ist eine Arbeitszahl von über drei erforderlich [11].

2.2.2.5 Solaranlage unterstützend zur Warmwasserbereitung

Optional kann eine Solaranlage unterstützend zur Trinkwassererwärmung eingesetzt werden. Bei einigen Klimakompaktgeräten ist bereits ein separater Wärmetauscher für den Solarkreislauf vorbereitet, so können auch später noch einfach Kollektoren in die Anlage eingebunden werden.

Zur Dimensionierung wird im PHPP-Fachinformationsbuch ein solarer Deckungsgrad zur Trinkwassererwärmung von ca. 50 % mit 1 m²/Pers an Kollektorfläche vorgeschlagen. Dafür empfiehlt sich ein eher flacher Neigungswinkel der Kollektoren von 35°, so werden vor allem im Sommer bei hohem Sonnenstand hohe solare Erträge erzielt. Dadurch kann erreicht werden, dass die Wärmepumpe in sommerlichen Schönwetterphasen größtenteils ausgeschaltet bleibt und somit elektrische Energie gespart werden kann, da die Solarkreispumpe einen wesentlich geringeren Stromverbrauch hat als die Wärmepumpe.

Eine solare Heizungsunterstützung macht in diesem Heizkonzept aus folgenden Gründen wenig Sinn:

- An sonnigen Tagen, insbesondere in der Übergangszeit, wird das Passivhaus allein durch die Fenster (zzgl. innere Wärmequellen) beheizt; mangels Speichervolumen konkurrieren also aktive und passive Sonnenenergienutzung. Im Grunde fällt die Übergangszeit völlig für die solare Heizungsunterstützung aus. Ein nennenswerter Effekt wäre nur an sehr kalten, sonnigen Wintertagen zu erzielen, um diesen zu nutzen, sollte der Kollektor besser in die Fassade integriert und entsprechend dimensioniert werden.
- Die Wärmeübertragung von der Solaranlage über den Speicher und das Nachheizregister auf den Wärmeträger Luft ist relativ uneffizient (mit hoher Temperaturdifferenz behaftet). Für die Nachheizung der Luft werden wasserseitige Heiztemperaturen von bis zu 50 °C benötigt, um die Zuluft entsprechend vorzuwärmen und bei dem niedrigen, vorliegenden Luftvolumenstrom den Heizwärmebedarf des Gebäudes abdecken zu können. Im Winter ist der Kollektor aber auf ein niedriges Nutztemperaturniveau angewiesen um noch nennenswert Leistung bringen zu können. Wesentlich besser als der Wärmeträger Luft eignet sich daher ein wasserführendes Flächenheizsystem mit niedrigen Rücklauftemperaturen.
- Kollektor und Wärmepumpe sind gleichermaßen auf kaltes Wasser im Speicher angewiesen, um effizient arbeiten zu können. Abgesehen davon, dass der im Kom-

paktgerät integrierte Speicher viel zu klein ist, lässt er auch kaum den Aufbau einer Temperaturschichtung und ein sinnvolles Zusammenspiel beider Wärmeerzeuger zu.

2.2.2.6 Arbeitsweise und Schema der Anlage

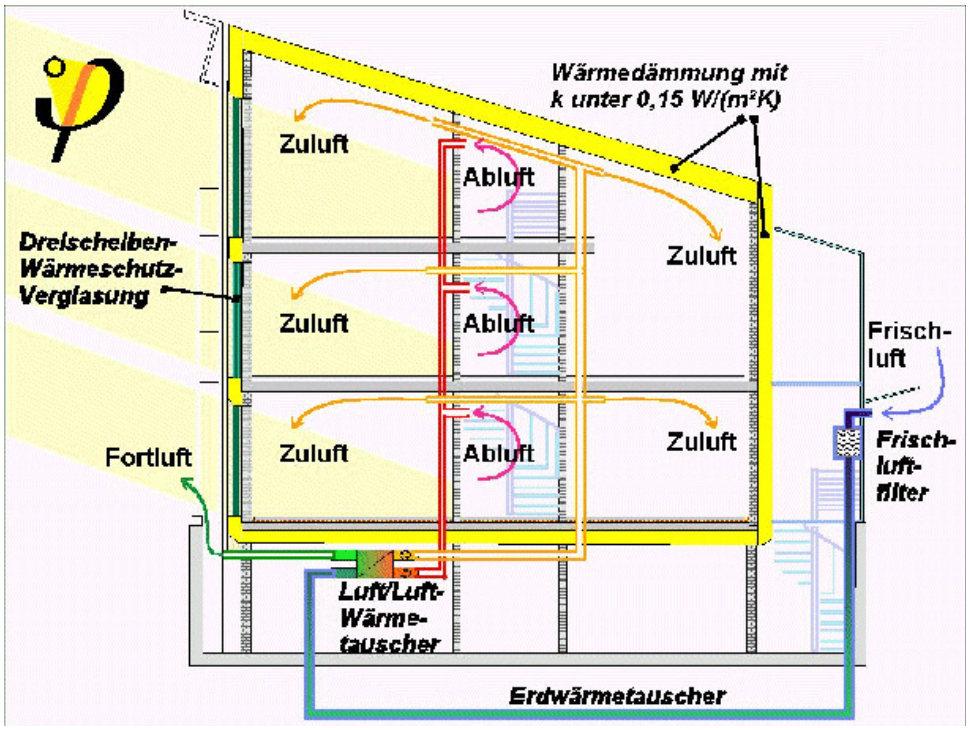


Abbildung 8: Anlagenschema Passivhaus [1]

Anhand Abbildung 8 kann man erkennen wie sich das Gesamtsystem zusammensetzt. Im Referenzgebäude ist das Klimakompaktgerät (mangels Kellergeschoss) innerhalb der beheizten Gebäudehülle aufgestellt. Die Luft wird über den Erdwärmeübertrager (Erdwärmetauscher) angesaugt und über die Wärmerückgewinnung weiter auf Raumtemperatur angehoben. Im Sommer oder bei hohen inneren Wärmequellen ist die aus den Räumen abgesaugte Luft so erwärmt, dass die Wärmerückgewinnung ausreicht und die Zuluft nicht nachgeheizt werden muss. Reicht aber bei kalten Außentemperaturen und geringer innerer Last die Ablufttemperatur nicht aus, wird die Zuluft über ein Nachheizregister (elektrisch oder warmwasserführend) nacherhitzt. Die Luft wird über Lüftungskanäle in die Wohnräume eingebracht und aus Abluträumen mittels Überströmung wieder abgesaugt, um im Wärmerückgewinner die neue Zuluft zu erwärmen. Danach wird die verbrauchte Luft (Fortluft) ins Freie transportiert. Aus der Fortluft bezieht die Wärmepumpe ihre Energie zur Trinkwassererwärmung. Das TWW wird in einem Speicher bis zur Entnahme gespeichert und stellt gleichzeitig Wärme bereit für den Fall, dass die Zuluft über einen wasserführenden Wärmetauscher nacherhitzt wird. Reicht die Wärmemenge der Fortluft nicht aus, um mit der Wärmepumpe die benötigte Speichertemperatur zu erreichen, kann über

den Erdwärmetauscher ein zusätzlicher Außenluftstrom angesaugt und genutzt werden. Die Temperatur im Speicher wird so auf ca. 50 °C gehoben. Sind höhere Temperaturen gewünscht oder erforderlich, muss mit einem Elektroheizstab nachgeheizt werden. Sobald die Wärmepumpe den Wärmebedarf im Speicher nicht mehr bedienen kann, z.B. bei erhöhtem Trinkwarmwasserverbrauch oder im Winter wenn zusätzliche warmwasserführende Heizflächen angeschlossen werden und das Nachheizregister im Zuluftkanal im Einsatz ist, schaltet automatisch ein Elektroheizstab zu, der die erforderliche Restwärme an den Speicher liefert.

Ist die Möglichkeit der Sonnenenergienutzung vorhanden, wird der Speicher über einen internen Wärmetauscher vorrangig durch den Solarkreislauf erwärmt.

Da das Gesamtsystem keine unterschiedlichen Raumtemperaturen bereitstellen kann, aber im Badezimmer (von der DIN EN 12831 Beiblatt 2) 24 °C Raumtemperatur gefordert werden, muss dort eine Zusatzheizung installiert werden. Dies kann durch eine elektrische oder wasserführende Fußbodenheizung oder einen elektrischen, bzw. wasserführenden Handtuchheizkörper geschehen.

2.2.3 Sonnenhaus

2.2.3.1 Festlegung und Begründung des gewählten Heizsystems

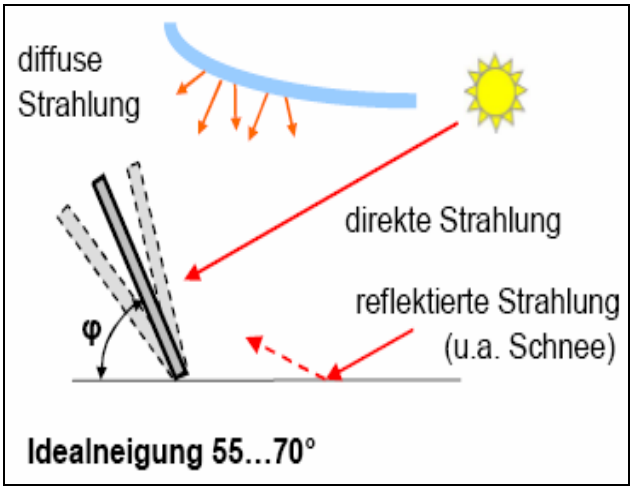
Das Heizprinzip des Sonnenhauskonzepts setzt einen solaren Deckungsgrad von mindestens 50 % voraus. Der Restbedarf sollte durch eine Nachheizung auf Biomassebasis wie zum Beispiel Stückholz oder Holzpellets erfolgen. Da das Referenzgebäude ohne Kellergeschoss ist, kommt ein wasserführender Kamin- oder Schwedenofen zur Heizungsunterstützung zum Einsatz. Um einen so hohen solaren Deckungsgrad zu erreichen, ist ein großer Kombispeicher zur Pufferung der gewonnenen Solarenergie für das Heizwasser und zur Bereitung von warmem Trinkwasser unerlässlich. Für eine ideale Speicherbewirtschaftung und Temperaturschichtung im Speicher muss die Raumheizung im Niedertemperatursystem betrieben werden, was wiederum über Flächen-, also Wand- oder Fußbodenheizung geschieht. Für die Berechnung des Sonnenhauses wird eine Nachtabschaltung der Heizung von sechs Stunden berücksichtigt.

2.2.3.2 Sonnenkollektoren

Um das gewünschte Minimum von 50 % solarem Deckungsgrad für Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung eines gut gedämmten Einfamilienhauses zu erreichen, ist eine Kollektorfläche von etwa 30 bis 40 m² (abhängig von Kollektorneigung, Ausrichtung, Gebäudegröße, Dämmstandard und Speichergröße) erforderlich.

Bei der Aufstellung des Kollektors gilt, dass ein eher flacher Neigungswinkel mehr diffuse Strahlung empfängt und ein steil geneigter Kollektor mehr reflektierte Strahlung. Die größte Wirkung erzielt die direkte Sonneneinstrahlung [12]. Angepasst an die niedrigen Son-

nenstände im Winter ist die ideale Kollektorneigung etwa 60°-70°, sie sollte jedoch mindestens 40° betragen. Ein weiteres Problem zu flach geneigter Kollektoren ist die Produktion von Überwärme im Sommer. Wenn der Speicher geladen ist und nicht weiter erwärmt werden kann, wird der Solarkreislauf abgeschaltet [13]. Die Kollektoren müssen zwar hohen Temperaturschwankungen standhalten können, trotzdem könnten Übertemperaturen zu vorschneller Materialalterung, insbesondere zur Zersetzung des Frostschutzmittels führen. Deshalb sieht das Sonnenhauskonzept bei Überwärme auch eine Nachtkühlung des Speichers über die Kollektoren vor. Dieser Fall tritt aber bei einer Kollektorneigung von 60°-70° äußerst selten auf. Bei einigen bereits realisierten Sonnenhäusern wird sogar ein Teil der Kollektoren bei sommerlichem Sonnenhöchststand verschattet, um die Überhitzung des Kreislaufes zu vermeiden.



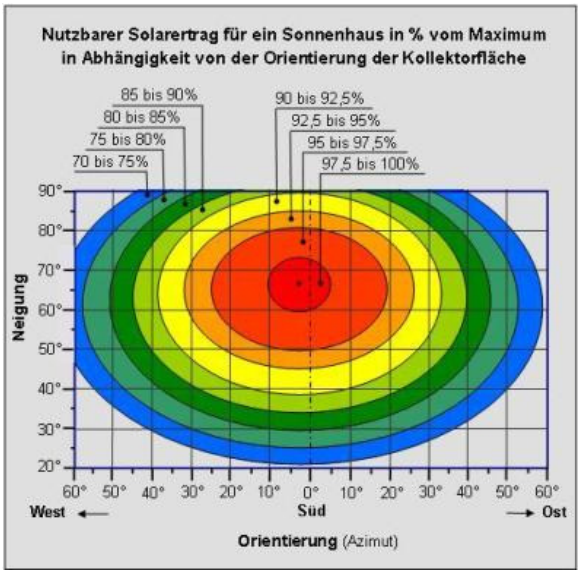


Abbildung 9: Ideale Neigung und Ausrichtung der Sonnenkollektoren

Im Diagramm für die nutzbare Solarstrahlung wird deutlich, dass eine Südabweichung der Kollektoren von +/- 30° trotzdem noch bis zu 90 % der Erträge liefern können und somit immer noch tauglich sind für ein Sonnenhauskonzept. Ist genügend Dachfläche vorhanden, kann dieses Defizit auch über einen zusätzlichen Kollektor kompensiert werden.

Beim Sonnenhaus werden üblicherweise Flachkollektoren - davon in überwiegender Zahl in der Bauart als dachintegrierte Großflächenkollektoren - eingesetzt. Der durch eine umlaufende Blecheinfassung geschützte Rahmen ist meist aus Holz.

Die Kollektoren sind in unterschiedlichen Standardgrößen erhältlich, können aber auch als beliebige Sonderanfertigung hergestellt werden (z.B. mit Aussparung für Dachfenster oder Schrägschnitte). Es werden jeweils 4 - 7 m² der Kollektoren bzw. Absorber in Reihe angeschlossen, damit ein angemessener Temperaturhub erfolgen kann, aber dabei kein zu großer Druckverlust erfolgt.

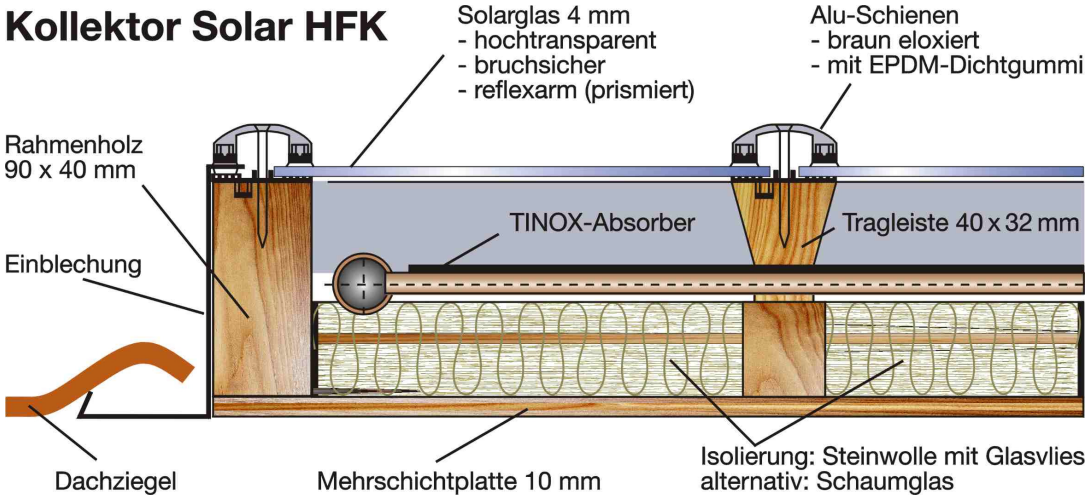


Abbildung 10: Schnitt durch den Sonnenkollektor HFK

Herzstück des Kollektors ist der Absorber, bestehend aus einem Kupferrohrregister mit aufgeschweißtem, hochselektiv beschichtetem Wärmeleitblech. Er ist in der Lage, etwa 95 % des auftreffenden Sonnenlichts in Wärme umzuwandeln, die an das ihn durchströmende Wärmeträgerfluid übertragen wird. Dabei werden nur etwa 5 % wieder als Wärmestrahlung zurückemittiert [14].

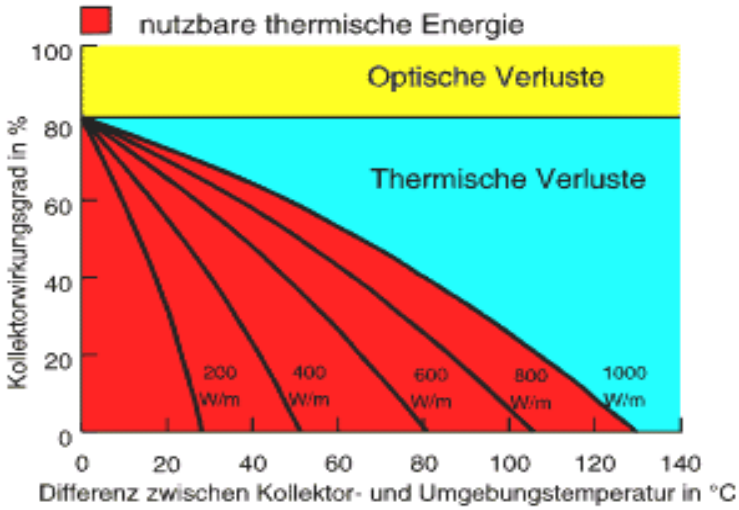


Abbildung 11: Kollektorwirkungsgrad

Unter idealen Bedingungen kann ein Wirkungsgrad bis zu 80 % erreicht werden, er ist jedoch stark von der Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung, sowie auch von der Stärke der Einstrahlung abhängig. Um auch im Winter bei kalten Außentemperaturen und schwächerer Einstrahlung noch gute Solarerträge erzielen zu können, muss für möglichst niedrige Betriebstemperaturen gesorgt werden. Um 5 K niedrigere Betriebstemperaturen im Winter erhöhen den Solarertrag um ca. 10 %.

Für die mittlere Arbeitstemperatur der Kollektoren gilt, je näher die Temperatur des Sonnenkollektors an der effektiv erzeugten, möglichst tiefen Nutztemperatur (der Niedertemperaturheizung) liegt, umso besser ist seine Auskühlung, umso tiefer ist seine durchschnittliche Temperatur und umso höher ist die erzielbare Leistung und der Kollektorwirkungsgrad. So kann auch bei verminderter solarer Einstrahlung noch ein Temperaturhub erreicht werden, der den kühlen Teil des Speichers vorwärmt, eventuell sogar Heizungsvorlauftemperatur oder mehr erreicht. Die im Wärmetauscher des Speichers abgekühlte Solarflüssigkeit kommt dann wieder kühl in den Kollektor und kann erneut erwärmt werden [13].

2.2.3.3 Solartank und Systemtechnik

Ein großer Speicher mit integriertem Boiler (auch Tank-in-Tank System, bzw. Kombispeicher genannt) stellt das Zentrum der Anlage und des Sonnenhauses dar. Grundsätzlich sind aber auch andere Speicherkonzepte möglich, bei denen die Solarbeladung und Brauchwasserbereitung über externe Wärmetauscher erfolgt. Auch Speicher mit Schichtladeeinrichtungen kommen in letzter Zeit vermehrt zum Einsatz.

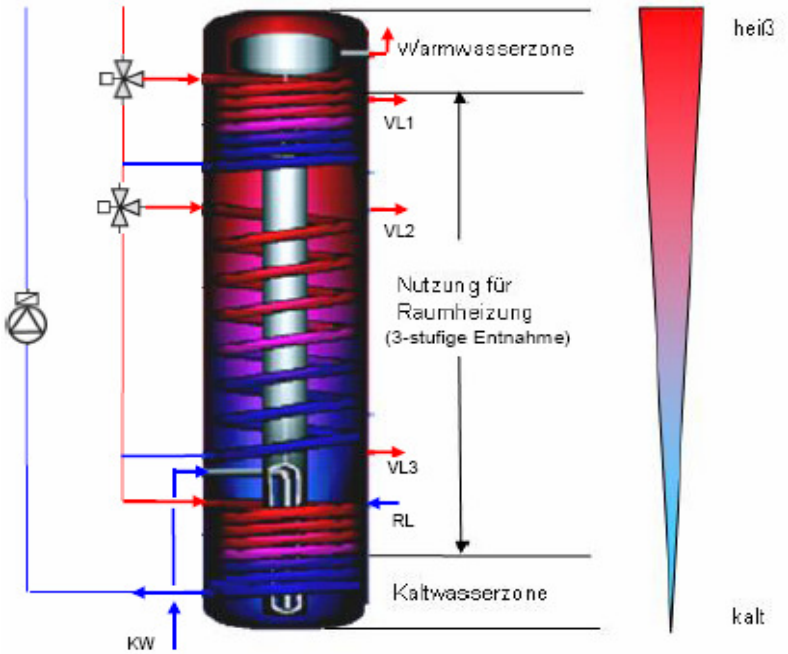


Abbildung 12: Solartank mit 3-stufiger Be-/Entladung zur Temperaturschichtung

Dimensionierung: Das Wasservolumen sollte etwa 150 - 250 l pro m² Kollektorfläche betragen, daher sind Speichergrößen zwischen 5 und 12 m³ typisch für Sonnenhäuser. Bei sehr hohen Deckungsgraden, im Extremfall 100 %, muss der Speicher noch wesentlich größer sein. Besonders nützlich ist ein großes Speichervolumen im Spätherbst, da die Heizung im Frühwinter noch lange Wärme aus dem geladenen Speicher beziehen kann [15].

Bei Neubauten besteht die Möglichkeit, den Speicher als Gestaltungselement über zwei Stockwerke reichend im Wohnbereich zu integrieren. Somit kommt die Speicherabwärme direkt der Raumheizung zugute, und die schlanke Form begünstigt eine gute Temperaturschichtung. Diese ist wichtig für ein gutes Gelingen jeder Sonnenheizung. Dennoch sollten große Speicher mit mindestens 250 mm Isolierstärke gedämmt werden, auch damit die Abwärme im Sommer nicht unangenehm wird.

Wichtigster Ansatzpunkt für eine optimierte Speicherbewirtschaftung bzw. Systemtechnik ist die Tatsache, dass ein Kollektor umso besser heizt, je besser er ausgekühlt wird. Die kalten Schichten sammeln sich im unteren Speicherbereich, daher wird bei mehrstufigen Wärmetauschern der untere grundsätzlich immer von der Solaranlage durchströmt. Ein zweiter oder auch dritter Wärmetauscher schaltet erst dazu, wenn die Vorlauftemperatur ausreicht, um die entsprechende Schicht im oberen Speicherbereich zu erwärmen. Durch die Reihenschaltung der Wärmetauscher wird der Massenstrom durch den erhöhten hydraulischen Widerstand etwas reduziert, was eine gewollte Erhöhung des Temperaturhubes und damit eine Stabilisierung der Schichtladung nach sich zieht (Varioflow-Prinzip). Das Ganze geschieht noch im Highflow-Bereich mit spezifischen Durchflüssen von etwa 25 - 35 l/(m²h). Die derzeit gängige Lowflow-Technik mit Topladefunktion zur Schnellaufheizung des Brauchwassers macht beim (trägen) Sonnenhauskonzept wenig Sinn, da hier über Tage und Wochen auf Vorrat geheizt wird und vorzugsweise über schnellen Durchlauf ein höherer Kollektorwirkungsgrad angestrebt wird. Ist die Kollektortemperatur höher als die Temperatur im oberen Teil des Speichers, werden ohnehin zuerst beide WT durchströmt, der Durchsatz ist dabei reduziert und die Speicherbeladung findet im oberen Bereich, dem Teil der Trinkwarmwasserbereitung statt.

Ziel bei den Entladevorgängen ist es, den Speicher unten für die Solaranlage möglichst intensiv auszukühlen und oben ein möglichst großes Reservoir an heißem Wasser zu erhalten. Dies geschieht durch eine mehrstufige, „exergiegerechte“ Heizkreisentahme über spezielle Mehrwegemischer, die dafür sorgen, dass der Heizungsvorlauf aus möglichst tiefen Regionen des Speichers – idealerweise aus Schichten gleicher Temperatur - gespeist wird. Somit muss dem Vorlauf weniger Rücklaufwasser beigemischt werden und der Heizungsrücklauf sorgt mit größtmöglicher Temperaturspreizung für eine gute Auskühlung des unteren Speicherbereiches, während die heißen Schichten so lange wie möglich unangetastet bleiben [16].

Das Trinkwasser wird zur Erhaltung der Temperaturschichtung über ein Vorwärmrohr in den Edelstahlboiler eingespeist. Der Warmwasserbereiter hat eine pilzartige Form und ragt bis in den tiefen Bereich des Speichers. So kann das Trinkwasser langsam mit den Temperaturschichten erwärmt werden und oben im Kopfteil seine endgültige Warmwassertemperatur erhalten. Gleichzeitig trägt das bei Entnahme nachströmende Kaltwasser zur Auskühlung der Kaltwasserzone bei. Die Anschlusshöhe des Heizungsvorlaufes bestimmt, wie

groß das darüberliegende Heißwasserreservoir für die Brauchwasserbereitung ist, es sollte wenigstens 500 bis 600 Liter betragen.

Die Nachheizung durch einen Biomasse-Wärmeerzeuger kann ebenfalls durch den Einsatz eines Umschaltventils oder Mehrwegemischers optimiert werden. Indem der Rücklauf zu Beginn der Aufheizphase aus einer höheren, wärmeren Schicht entnommen wird, wird weniger Beimischung aus dem Vorlauf für die Rücklaufanhebung notwendig, und der Puffer wird oben schneller heiß. Dann erst schaltet das Ventil auf den zweiten Rücklaufanschluss und es wird weiter auf Vorrat geheizt.

Um eine ungewollte Wärmezirkulation durch die abgehenden Rohre zu vermindern, werden die Anschlüsse siphoniert angebracht. Je schlanker und höher ein Speicher ist, desto besser kann er bewirtschaftet werden, er sollte mindestens 4 m hoch sein, eher noch höher.

2.2.3.4 Nachheizung

Durch den sehr niedrigen Endenergiebedarf beim Sonnenhaus werden manuell zu bedienende Stückholzöfen, die sonst nur als Zuheizung eingesetzt werden, als durchaus komfortabel empfunden. Sonnenhausbewohner wissen die wohlige Strahlungswärme und die Sicht auf ein knisterndes Feuer sehr zu schätzen.

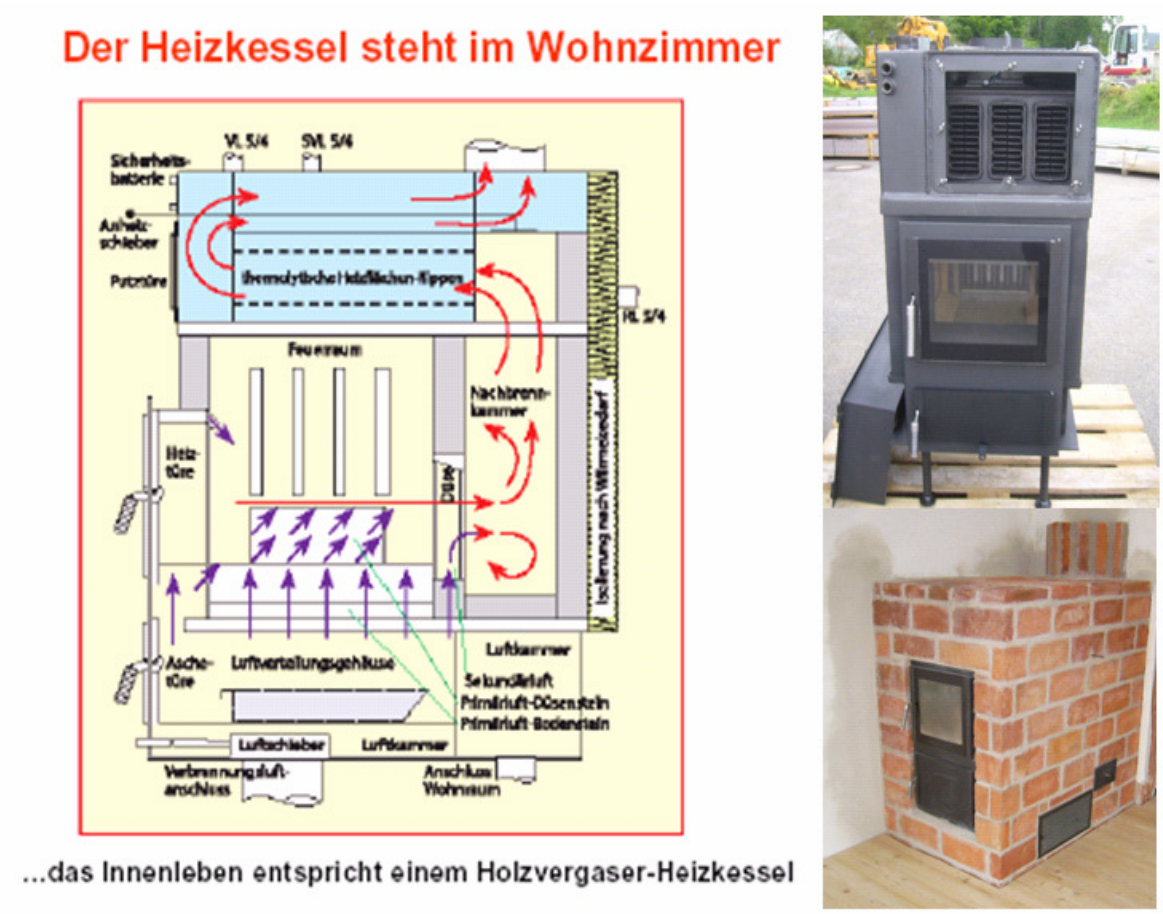


Abbildung 13: Funktionsprinzip Hochleistungs-Grundofeneinsatz Typ Powall Vario K

Ein Großteil der Kesselverluste kommt direkt dem Raum zu gute, was ein Vorteil gegenüber im Keller untergebrachten Zentralheizkesseln ist. Da der Ofen in der Regel erst bei Bedarf angeschürt wird, wenn also der Pufferspeicher entladen ist, wird auf diese Weise auch bewusster und damit sparsamer geheizt. Wichtig ist allerdings, dass ein möglichst hoher Prozentsatz der erzeugten Wärme über einen Wassereinsatz mit entsprechender Heizleistung in den Pufferspeicher geleitet wird, von wo sie dann in alle Räume verteilt wird. Ist dagegen die raumseitige Wärmeabgabe deutlich größer als der Wärmebedarf des Aufstellungsraumes, führt dies bei gut gedämmten Häusern zur Überhitzung der Raumluft, sofern es sich um keine offene Bauweise handelt.

Der Markt bietet heute hocheffiziente Hochleistungs-Kachelofeneinsätze und Kaminöfen mit bis zu 30 kW wasserseitiger Leistung bei nur 2 bis 4 kW direkter Wärmeabgabe an den Raum. Deren Dosierung und zeitliche Streckung wird im Wesentlichen durch die Speicherfähigkeit der Ummauerung bestimmt, wobei in jedem Fall etwa 1,5 bis 2 kW Wärmeleistung über die Glastüre abgegeben werden. Die hohe wasserseitige Leistung ermöglicht ein zügiges Aufheizen des großen Pufferspeichers und reduziert die dazu nötigen Volllastbetriebstunden.

Das Wasser wird in einem integrierten Wärmetauscher mit dem Rauchgas aus der Nachbrennkammer erhitzt. Als „Naturzugkessel“ benötigt der Ofen kein Gebläse; der Strombedarf für die Ladepumpe ist wegen der sehr eingeschränkten Betriebszeiten ebenfalls gering.

Alternativ käme als Nachheizung im Sonnenhaus grundsätzlich jede Art von Stückholz- oder Pelletheizung in Frage. Stückholzvergaserkessel haben vor allem den Vorteil eines größeren Brennstoff-Füllraumes, dadurch muss weniger oft manuell Holz nachgelegt werden. Pelletkessel arbeiten vollautomatisch und sichern bedarfsgerechten Wärmenachschub – auch bei längerer Abwesenheit der Bewohner.

Die Nachheizung durch den Ofen bzw. Kessel nach Auskühlung des Speichers erfolgt mit umgekehrter Priorität wie die Heizkreisentnahme: Damit schnellst möglich heißes Wasser für den Gebrauch zur Verfügung steht, wird zunächst mit voller Leistung in den oberen Teil geladen. Erst dann lenkt der Mischer den Rücklauf in tiefere Regionen um, so dass auf Vorrat weitergeheizt werden kann. Der unterste Speicherbereich muss für die Solaranlage immer kalt bleiben.

2.2.3.5 Flächenheizung

Da die Wohnbehaglichkeit entscheidend von der Temperatur der Umfassungsflächen abhängt, fördert eine großflächig auf Fußboden und Wände verteilte Wärmeabgabe die Behaglichkeit. Sie ist wegen der durch die großen Abstrahlungsflächen möglichen niedrigen Vorlauftemperaturen eine energetisch sinnvolle und für solares Heizen ideale Raumwärmetechnik. Die Auslegungs-Vorlauftemperatur sollte nicht mehr als 35 °C betragen.

Wandheizregister aus dünnen Kupfer- oder Verbundrohren werden in Wände oder auch Decken eingeputzt und liefern regulierbare, angenehme Strahlungswärme. Die Kombination mit einer Fußbodenheizung in einem gemeinsamen Heizkreis ist möglich und sinnvoll, insbesondere für Räume mit Steinböden. Es entsteht bei Flächenheizungen keine Umwälzung der Raumluft, die Aufwirbelung von Staub wird vermieden und ist dadurch auch gesundheitlich von Vorteil. Durch die als angenehm empfundene Abstrahlung kann die Raumluft um 1-2 °C kühler als bei Heizkörperheizung sein und wird trotzdem als ebenso behaglich empfunden.

2.2.3.6 Arbeitsweise und Schema der Anlage

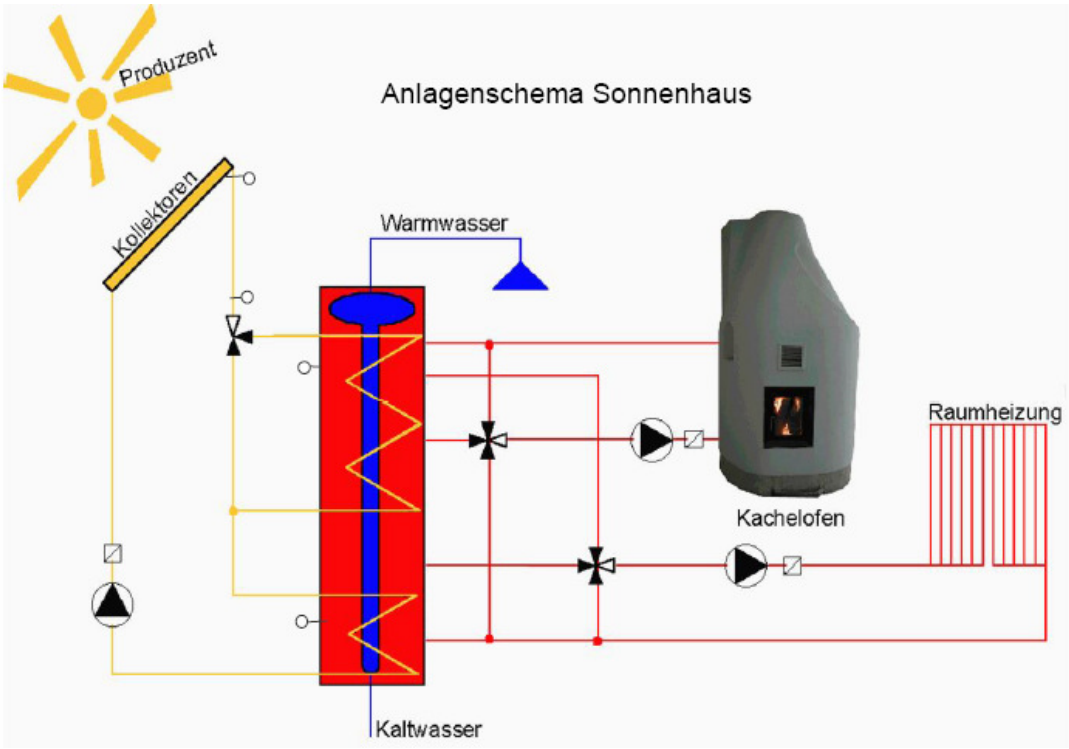


Abbildung 14: Anlagenschema Sonnenhaus [2]

Die Solarpumpe schaltet ein, sobald die Temperatur im Kollektor 5 Kelvin höher ist als die Temperatur im unteren Speicherbereich. Das Ventil im Solarkreislauf schaltet den oberen Wärmetauscher dazu, wenn die Temperatur des Wärmeträgers im Vorlauf wärmer ist als die entsprechende Temperatur im Speicher. Der Solarkreis durchläuft dann zuerst den oberen Speicherteil, danach wird über den unteren Wärmetauscher die noch verbleibende Energie entzogen und zur Vorerwärmung des unteren Speicherteils genutzt. Ist die Solarvorlauftemperatur nicht auf dem benötigten Temperaturniveau für den oberen Bereich, wird automatisch der höhere Wärmetauscher abgekoppelt und nur der tiefere Teil erwärmt. Um den Speicher im Sommer vor Überhitzung zu schützen, kann mittels Nachlauf der Solar-

pumpe die überschüssige Wärme abends über die Kollektoren rückgekühlt werden, die Solarpumpe läuft dann weiter bis eine einstellbare Puffertemperatur unterschritten wird.

Die Nachheizung des Speichers erfolgt, indem sobald der Holzkessel bzw. Kachelofeneinsatz eine Temperatur von etwa 60 °C erreicht hat, die Pumpe des Kesselkreislaufs einschaltet. Das Ventil im Kesselkreislauf dient zum einen als Rücklaufanhebung, damit sich im Holzkessel wegen zu niedriger Betriebstemperatur kein Kondenswasser sammeln kann und dadurch Korrosion verursacht. Zum anderen ermöglicht es eine Schnellaufheizung bei kaltem Pufferspeicher durch gestufte Rücklaufentnahme.

Die Heizungspumpe und das zugehörige Ventil arbeiten nach der Heizungsregelung. Das Ventil hat die Aufgabe, die Temperatur des Heizungsvorlaufs zu regulieren und dabei den Speicher zuerst im unteren Bereich zu entladen. Ist der Speicher selbst im Bereich des unteren Vorlaufanschlusses zu warm, erfolgt eine Beimischung aus dem Rücklauf.

Da das Trinkwasser auch die Temperatur der obersten Speicherschicht annimmt, muss die Warmwasserentnahme mit einem Verbrühungsschutz ausgerüstet werden. Dazu wird über einen Brauchwasser-Thermostatmischer kaltes Wasser beigemischt.

2.2.4 Standardhaus nach EnEV

2.2.4.1 Festlegung und Begründung des gewählten Heizsystems

Für den Vergleich mit den beiden Minimalenergiespargebäuden wird beim Standardhaus eine konventionelle Gas-Brennwertheizung festgelegt, betrieben mit Erdgas H. Dies ist im Neubaubereich derzeit eine gängige Lösung und bei vorhandenem Gasversorgungsnetz auch eine der wirtschaftlichsten.

2.2.4.2 Gas-Brennwertgerät

Der Unterschied zu konventionellen Gaskesseln besteht darin, dass Brennwertkessel auch die Kondensationswärme des Wasserdampfes im Abgas nutzen, der sonst ungenutzt über den Schornstein verloren geht.

2.2.4.3 Trinkwassererwärmung

Das Trinkwasser soll über die Gas-Brennwerttherme erwärmt werden und in einem indirekt beheizten Trinkwasserspeicher zur Entnahme bereitgehalten werden. Die Verteilung erfolgt gebäudezentral ohne Zirkulation.

2.2.4.4 Heizkörper

Die Raumbeheizung soll über wasserführende Heizkörper überwiegend im Bereich der Außenwände in den Auslegungstemperaturen 55 °C Vorlauf- und 45 °C Rücklauftemperatur erfolgen.

2.2.4.5 Arbeitsweise und Schema der Anlage

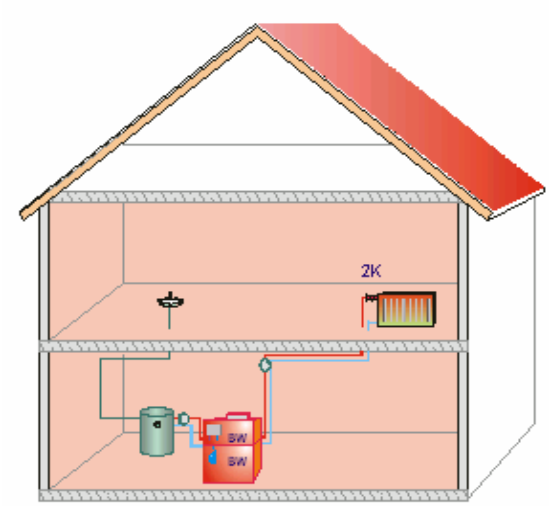


Abbildung 15: Anlagenschema Standardhaus nach EnEV

In der Gas-Brennwerttherme wird das Heizungswasser erwärmt und mithilfe einer Umwälzpumpe zu den Raumheizkörpern befördert, wo das Wasser die Wärme über die Radiatoren an den Raum abgibt. Das abgekühlte Wasser strömt zurück in den Kessel und wird erneut erwärmt. Das System wird Außentemperaturgeführt, ein Temperaturfühler gibt also ab einer bestimmten Außentemperatur das Einschaltsignal an den Gas-Brennwert-kessel.

In den Trinkwasserspeicher führt ein separater Heizkreis über einen Wärmetauscher, der das Trinkwasser erwärmt. Die Erwärmung erfolgt ebenfalls über einen Fühler im Speicher, der dem Gas-Brennwertgerät das Signal zur Nachladung gibt.

2.3 Wichtige, anzugleichende Parameter

Das PHPP weicht in einigen Berechnungsschritten von der EnEV 2007 bzw. von den gültigen DIN-Normen ab. Um aber für beide Gebäudevarianten dieselben Bedingungen zu schaffen, ist es unbedingt notwendig, diese Faktoren auf Plausibilität und Legitimität zu hinterfragen und gegebenenfalls anzugleichen.

2.3.1 Hygienischer Mindestluftwechsel

Im PHPP wird zwar erwähnt, dass der hygienische Mindestluftwechsel der DIN 1946-6 entsprechen muss, wird aber dann doch automatisch auf einen 0,3-fachen Luftwechsel ausgelegt. Laut Norm muss aber ein Luftwechsel von 0,4 h^{-1} zugrunde gelegt werden. Da im Passivhaus die Lüftung maschinell erfolgt, muss die Lüftungsanlage auch einen 0,4-fachen Luftwechsel gewährleisten. Der Luftwechsel kann im PHPP „überlistet“ werden, indem

man die hinterlegte Formel für den Auslegungsvolumenstrom löscht, die gewünschte Luftmenge manuell bestimmt und dort eingibt.

Das Sonnenhauskonzept sieht nicht zwingend eine Lüftungsanlage vor. Da auch hier von einer sehr dichten Gebäudehülle auszugehen ist, muss der Nutzer selbst konsequent durch Fensterlüftung für einen angemessenen Luftaustausch sorgen.

Für die Berechnung wird der **Mindestluftwechsel von 0,4 h^{-1}** (DIN 1946-6) übernommen.

2.3.2 Trinkwasser-Wärmebedarf

In die Berechnung der EnEV geht der Trinkwasserwärmebedarf mit 12,5 kWh/(m²a) ein, die Bezugsfläche ist hierbei die Nutzfläche von 225,6 m².

Das PHPP setzt einen Bedarf von 25 l/(Pers) zu 60°C pro Tag an. Rechnet man dies auf die Einheit kWh/a um ergeben sich:

$$Q = m \bullet c_p \bullet \Delta\vartheta$$

$$Q = 25\frac{kg}{Pers \bullet d} \bullet 4\,Pers \bullet 365\frac{d}{a} \bullet 1{,}163\frac{Wh}{kg \bullet K} \bullet (60\,K - 10\,K) = 2117\frac{kWh}{a}$$

Vergleicht man diesen Wert mit dem nach EnEv angesetzten Wert, ergibt sich eine Differenz, die für die Berechnungen angeglichen werden muss.

Warmwasserbedarf nach EnEV: $Q = 12{,}5\frac{kWh}{m^2 a} \bullet 225{,}6\,m^2 = 2820\frac{kWh}{a}$

und einem Wasserverbrauch von:

$$m = \frac{Q}{c_p \bullet \Delta\vartheta} = \frac{2820\frac{kWh}{a}}{1{,}163\frac{Wh}{kg \bullet K} \bullet (60 - 10)\,K \bullet 4\,Pers \bullet 365\frac{d}{a}} = 33{,}2\frac{kg}{Pers \bullet d}$$

Für die Berechnung wird der EnEV-Standard von **12,5 kWh/(m²a) für den Trinkwasser-Wärmebedarf** angesetzt, der Wert im PHPP dementsprechend der EnEV angeglichen.

Da davon auszugehen ist, dass Wasch- und Spülmaschine ans Warmwassernetz angeschlossen werden, ist der höhere Warmwasserverbrauch durchaus realistisch.

2.3.3 Wärmegewinne durch interne Wärmequellen

Die internen Wärmegewinne durch Abwärme von Haushaltsgeräten und Beleuchtung werden in der EnEV-Berechnung pauschal zu 5,0 W/m² angesetzt, im PHPP pauschal zu 2,1 W/m². Eine Überschlägige Berechnung im PHPP-Tabellenblatt „IWQ“ ergab, dass dies ein durchaus realistischer Wert ist.

Somit werden die **Wärmegewinne durch interne Wärmequellen mit 2,1 W/m²** jeweils für Passivhaus und Sonnenhaus angesetzt.

3 Berechnungsprogramme

Um möglichst korrekte Ergebnisse und eine seriöse Bewertung der Energieverbräuche zu erhalten, sind verschiedene Softwareprogramme notwendig. Dabei ist es wichtig zu verstehen, welche Berechnungsschritte (häufig im Hintergrund) ablaufen um durch die verschiedenen Verknüpfungen und Überträge der Ergebnisse in weiteren Berechnungen keine Doppelberechnungen vorzunehmen. Minimalenergiehäuser lassen sich nur unzureichend mit den von der EneV vorgegebenen Randbedingungen und Berechnungsmethoden abbilden. Weil das Bau- und Anlagenkonzept „Sonnenhaus“ zudem noch relativ jung ist, fehlt hier eine geeignete Software, wie sie vom Passivhaus-Institut speziell für das Passivhaus in Form des PHPP (Passivhaus-Projektierungspaket) bereits entwickelt wurde. Daher muss behelfsmäßig auf verschiedene, mit einander zu verknüpfende Berechnungsmethoden - soweit möglich unter Beachtung der geltenden Normen - zurückgegriffen werden. Ein gemeinsamer Berechnungsweg für Passiv- und Sonnenhaus wird dadurch erschwert, dass sowohl im PHPP als auch in dem für das Sonnenhaus verwendeten (in der Schweiz entwickelten) Solarsimulationsprogramm an verschiedenen Stellen von den derzeit in Deutschland geltenden Normen und Richtlinien abgewichen wurde. Trotz all dieser Schwierigkeiten wurde in dieser Arbeit versucht, Berechnungswege zu finden, die einen Vergleich beider Konzepte, hinsichtlich des Energiebedarfs, mit höchstmöglicher Genauigkeit durchführbar machen. Dabei sei darauf hingewiesen, dass die realen Verbräuche erheblich von den berechneten Werten abweichen können, da bei Häusern mit sehr niedrigem Heizwärmebedarf im Allgemeinen, beim Passivhaus im Besonderen das Nutzerverhalten eine erhebliche Rolle spielt.

3.1 Passivhaus-Projektierungspaket 2007 (PHPP)

3.1.1 Möglichkeiten und Funktion des Berechnungsprogramms

Das Passivhaus wird mit dem Passivhaus-Projektierungspaket 2007 dimensioniert. Das PHPP ist eine Excel-Arbeitsmappe, die in diverse Tabellen gegliedert ist. Der Aufbau ist übersichtlich und detailliert gestaltet und Ergebnisse können anhand der Verknüpfungen der einzelnen Tabellen, deren Werte und hinterlegten Formeln sofort wahrgenommen werden. Zur Erklärung und besseren Verständnis gibt es dazu ein Handbuch mit Tipps zur Vorgehensweise und Eingabebeispielen.

Die wichtigsten Eingabetabellen sind die Tabellen:

- Nachweis: Eingabe Gebäudevolumen und projektierte Bewohneranzahl
- Flächen: Eingabe der Gebäudeaußenmaße

- U-Werte: Definition der Außenbauteile
- Fenster: Eingabe der Fenstermaße und Einbausituation
- Lüftung: Eingabe der Gebäudelage, Bestimmung der Luftwechselrate
- Verschattung: Eingabe von Verschattungsobjekten (wird mit einer Sonnenstandsberechnung nach Sommer/Winter aufgeschlüsselt)
- SolarWW: Eingabe der Daten für eine thermische Solaranlage
- PE-Kennwert: Auswahl der Nachheizung
- Kompakt: Dateneingabe der Prüfwerte des Klimakompaktgeräts
- Klimadaten: Auswahl von Monatsverfahren und Gebäudestandort

Als Berechnungsgrundlage dienen die vom Passivhaus-Institut vorgeschlagenen, anzusetzenden Werte, die in Kapitel 2.1.2 aufgeführt wurden. Mithilfe dieser Daten wurde iterativ gearbeitet, bis die geforderten Werte des Heizwärmebedarfs von $\leq$ 15 kWh/(m²a), des Drucktest-Ergebnisses von $\leq$ 0,6 h^{-1} und von $\leq$ 120 kWh/(m²a) für den Primärenergie-Kennwert erreicht wurden.

3.1.2 Problematik und Grenzen des Berechnungsprogramms

Einige Berechnungen werden (aus unerklärten Gründen) anders oder mit anderen Grundwerten gerechnet als in der EnEV. Diese Werte sind zwar teilweise plausibel (siehe Kapitel 2.3), können aber bei Daten, für die Versorgungssicherheit gewährleistet sein muss, nicht übernommen werden, da sonst im Streitfall keine rechtliche Absicherung für dem Fachplaner oder Installateur besteht (z.B. Mindestluftwechsel).

Jedoch ist es möglich, den Blattschutz aufzuheben und die hinterlegten Formeln so zu modifizieren, dass die Berechnungen den Vorgaben der einzelnen anzuwendenden Normen entsprechen und dadurch auch ein Vergleich mit den anderen Anlagenvarianten des Referenzgebäudes möglich wird.

Ein weiteres Problem bestand darin, die erforderlichen Werte für das Klimakompaktgerät zu recherchieren. Diese Eingaben sind erst seit der Version PHPP 2007 notwendig und bestehen hauptsächlich aus Prüfwerten. Auf Anfrage bei verschiedenen Anbietern von Kompaktgeräten waren die Daten bei einigen noch nicht erhältlich, da sich das Gerät noch auf dem Prüfstand befindet und noch keine endgültigen Zahlen ermittelt werden konnten (Auch die nun verwendeten Daten sind erst vorläufige Ergebnisse und können sich eventuell noch geringfügig verändern).

Die Eingabe von zusätzlichen Nachheizflächen ist NICHT möglich. Dabei werden von einigen Herstellern sogar Geräte angeboten, an denen ein zusätzlicher Heizkreis für wasserführende Flächen angeschlossen werden kann. Andere Hersteller verweisen direkt dar-

auf, in Badezimmer und Wohnräumen mit höherer gewünschter Raumtemperatur zusätzliche elektrische Heizflächen zu installieren. Im Bad ist eine Nachheizung auf jeden Fall notwendig, der zusätzliche Stromverbrauch aber nicht im PHPP erfassbar, was das Gesamtergebnis verfälscht und den Primärenergiebedarf beschönigt.

In der Fachwelt umstritten ist auch die im PHPP „wohlwollende“ energetische Bewertung der Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung. Zumindest setzen die sehr niedrig angesetzten Lüftungswärmeverluste ein sehr diszipliniertes, in der Praxis kaum anzutreffendes Nutzerverhalten voraus. Hier liegt der Hauptgrund für den eklatanten Unterschied im Heizwärmebedarf zwischen Passivhaus und Sonnenhaus.

Positiv zu bewerten sind die im PHPP angelegten Berechnungsmodule zur exakten Berechnung des Transmissionswärmebarfs, insbesondere der Fenster und Wärmebrücken. Die vereinfachte Berechnungsmethode der EneV mit pauschalem Wärmebrückenzuschlag führt in diesem Fall zu einer Benachteiligung des Sonnenhauses. Die Auswirkungen auf die Ergebnisse hinsichtlich End- und Primärenergiebedarf sind aber insofern unbedeutend, als dass in dieser Arbeit auf den vom Sonnenhaus-Institut vorgegeben Mindestdämmstandard (HT’) hingerechnet wurde, hierbei also der Anteil der Wärmebrücken unerheblich ist.

3.2 Hottgenroth Software, Energieberater 6.02

3.2.1 Möglichkeiten und Funktion des Berechnungsprogramms

Mit dem Energieberater 6.02 von Hottgenroth Software wird der Heizwärmebedarf des Sonnenhauses und Standardhauses nach EnEV errechnet. In einem ersten Schritt wird ein Gebäudegrundkörper angelegt, von dem aus unterschiedliche Varianten definiert werden können. So wurde für das Sonnenhaus eine detaillierte Eingabe für die Bauteile vorgenommen, beim Standardhaus vereinfachend lediglich Pauschalwerte eingegeben. Die Auswahl einer freien Eingabe ermöglicht zum Beispiel die internen Wärmegewinne manuell zu beeinflussen und eigene ermittelte Werte zu bestimmen. Anzumerken ist, dass im Standard-Berechnungsverfahren nach EneV sowohl der Luftwechsel (0,6 h^{-1}) als auch die internen Wärmegewinne (5 W/m²) sehr hoch angesetzt sind, was sich aber im Ergebnis weitgehend ausgleicht. Zielsetzung für die vorliegende Untersuchung ist, diese Randbedingungen für Passivhaus und Sonnenhaus zur Schaffung einer gemeinsamen Berechnungsbasis sinnvoll anzugleichen.

Eine benutzerfreundliche Oberfläche des Programms ermöglicht ein schnelles Erfassen der einzugebenden Daten. Die Ergebnisse kann man jeweils als Bildschirmausdruck übersichtlich dargestellt anschauen. Für das Referenzgebäude wurde das Standardhaus als Grundlage und das Sonnenhaus als Variante angelegt, so werden die Ergebnisse immer gegenübergestellt und man kann direkt die Unterschiede und Verbesserungen erkennen. Dabei wer-

den Verluste, Bedarfe, Verbräuche, Schadstoffausstöße und auch Energiekostenaufwendungen bilanziert und aufgeführt.

3.2.2 Problematik und Grenzen des Berechnungsprogramms

Nachteilig am Programm ist, dass für den Nutzer nicht ersichtlich ist, wie die Berechnung abläuft, da die Berechnungsformeln nicht sichtbar sind und nur Ergebnisse angezeigt werden. Bei der Eingabe des Anlagenschemas für das Sonnenhaus stößt das Programm an seine Grenzen, die nur teilweise durch „Tricks“ umgangen werden könnten. Auch eine detaillierte Erfassung von Leistungsdaten für den Biomassewärmeerzeuger ist nicht möglich, mit der Begründung, dass der Primärenergiefaktor von Holz mit 0,2 so gering ist, dass eine detaillierte Bestimmung nicht nötig sei.

Insgesamt kann hier für das Sonnenhaus sinnvoller Weise nur der Wärmebedarf für die Gebäudeheizung und die Trinkwassererwärmung ermittelt werden. Sämtliche weitere Berechnungen sind zu sehr von nicht abänderbaren, hinterlegten Werten verfälscht, als dass sie zur Bewertung der Sonnenhaus-Anlagentechnik verwendbar wären.

3.3 Vela Solaris, Polysun 4.0 Designer

3.3.1 Möglichkeiten und Funktion des Berechnungsprogramms

Zur Simulation des solaren Deckungsgrades wird Polysun 4.0 Designer verwendet, das freundlicherweise kostengünstig von der Firma „Arriva Engeneering“ zur Verfügung gestellt wurde. In der Version Designer ist die Erstellung einer Anlage möglich, bei der die Parameter frei gewählt werden können.

Zuerst wird das Projekt angelegt mit Standortdaten, Auswahl von Trinkwassererwärmung Gebäudebeheizung und Bewohnerzahl. Anschließend wird das Gebäude mit Größe, Dämmstandard und Fensterflächen definiert, um die Verbraucherangaben zu ermitteln.

Um eine Anlagenvariante zu erstellen, wählt man die entsprechenden Symbole aus und sucht sich die gewünschten Angaben aus den hinterlegten Kollektor-, Speicher- und Nachheizungstypen aus. Ist das benötigte Modell nicht vorhanden, besteht die Möglichkeit dies nach eigenen Vorgaben zu definieren. Die einzelnen Anlagenkomponenten können dann individuell miteinander verbunden werden. Eingesetzte Dreiwegventile lassen sich mit einer Steuerung kombinieren und können auf unterschiedlichste Schaltpunkte ausgelegt werden.

Die Ergebnisse werden in Tabellenform mit den wichtigsten Daten wie solarer Deckungsgrad (input-orientiert), Solar- und Zusatzenergie an Speicher, Verluste und Energiebedarfe dargestellt. Des Weiteren können die Ergebnisse graphisch in Zeitwerten dargestellt und ein pdf-Report erstellt werden.

3.3.2 Problematik und Grenzen des Berechnungsprogramms

Das Polysun Simulationsprogramm folgt einer eigenen Nomenklatur, bei der häufig der Bezug schwer nachvollziehbar ist. Als Programmbeschreibung gibt es ein Tutorial, in dem einige grundlegende Dinge zur Solartechnik beschrieben werden, aber kaum auf das Programm selbst eingegangen wird.

Das Ablesen der Ergebnisse erfolgt in verschiedenen Masken und muss aus einer großen Menge von Werten herausgefunden werden. Hierbei ist vor allem die undurchsichtige Nomenklatur hinderlich, die es sehr mühsam macht, die korrekten Werte abzulesen.

Der pdf-Report, der zur Ergebnisausgabe dient, enthält kaum brauchbare Angaben, somit ist eine Dokumentation der getroffenen Annahmen und der eingegebenen Rahmenbedingungen im Nachhinein nicht mehr nachvollziehbar oder nur äußerst mühsam zu erreichen.

Der unverzichtbare Nutzen des Programms liegt – bei bekanntem Wärmebedarf – in der gemeinsamen Simulation von Gebäude und Solaranlage. Die Erfassung der Energieströme in den Speicher und aus dem Speicher inklusive dessen Abwärme, der solare Deckungsanteil am Energiezustrom und die daraus resultierende Höhe des Nachheizbedarfes lassen sich nur durch ein Solarsimulationsprogramm darstellen. Das Programm bietet allerdings keinerlei Möglichkeiten den Heizenergiebedarf und dessen Zusammensetzung (insbesondere die Aufwandszahlen der Anlagentechnik) exakt und nachvollziehbar zu ermitteln. Deshalb ist es für eine detaillierte Berechnung notwendig diese Rechenschritte außerhalb des Programms zu vollziehen. Die besondere Aufgabenstellung liegt nun darin, geeignete Schnittstellen zwischen Polysun und den außerhalb stattfindenden Rechengängen zu finden. Insbesondere gilt es, den mit Hottgenroth-Energieberater errechneten Wärmebedarf und die nach DIN 4701-10 detailliert errechneten Anlagenverluste in geeigneter Weise mit den in Polysun berechneten Werten abzugleichen.

4 Projektierung und Berechnungen Passivhaus

4.1 Passivhaus (Variante 1)

Zunächst soll ein Passivhaus ausgelegt werden, das den Anforderungen des Passivhaus-Institutes entspricht.

Für das Erreichen der vom PHI geforderten Werte werden die Außenbauteile in der folgenden Auflistung für U-Werte und Bauteildicken angesetzt [17]:

- Außenwand: 0,108 W/m²K (Dicke 0,51 m, davon 0,30 m Dämmstoff)
- Dach: 0,109 W/m²K (Dicke 0,47 m, davon 0,38 m Dämmstoff)
- Bodenplatte: 0,126 W/m²K (Dicke 0,54 m, davon 0,25 m Dämmstoff)

Fenster werden mit 3-facher Wärmeschutzverglasung, die einen U-Wert von 0,51 W/(m²K) und einen g-Wert von 0,52 haben, eingesetzt.

Die Fensterrahmen weisen einen U-Wert von 0,63 W/(m²K) auf, die vorgeschlagenen Wärmebrückenkoeffizienten ψ = 0,043 (W/mK) für den Glasrand und ψ = 0,04 (W/mK) für den Einbau werden übernommen.

Der kumulierte U-Wert für das Fenster mit Glas und Rahmenanteil wird in einer gesonderten Tabelle für jedes Fenster automatisch ermittelt und beträgt je nach Fenstergröße zwischen 0,63 W/m²K und 0,69 W/m²K.

Die Wärmebrücken gegen die Außenluft gehen zu -0,029 W/(mK), die gegen die Bodenplatte zu 0,010 W/(mK) in die Berechnung ein [18].

Ein weiteres wichtiges Eingabeblatt ist die Tabelle „Lüftung“. Die meisten Werte werden dort vom PHPP vorgeschlagen, sind aber in begründeten Fällen änderbar.

Der mittlere Luftwechsel wird vom PHPP 2007 aus dem summierten Abluftbedarf, ermittelt und standardmäßig auf 0,3 h^{-1} gesetzt. In diesem Tabellenblatt wird der Auslegungsvolumenstrom manuell auf 145 m³/h, also 1/3 des Gebäudebruttovolumens angehoben. Der mittlere Luftwechsel soll nun auch auf „Maximum“ betrieben werden, wodurch ein 0,4-facher Luftwechsel pro Stunde resultiert. Dies hat den Vorteil, dass von der Zuluft mehr Wärme transportiert werden kann, ist aber ohnehin erforderlich, um der Forderung aus DIN 1946-6 nach einem Luftaustausch von 0,4 h^{-1} gerecht zu werden. Der Nachteil ist allerdings, dass durch den höheren Luftwechsel auch mehr Antriebsstrom benötigt wird.

Auslegung Lüftungsanlage Standard-Betriebsart

Personenbelegung	m²/P	37			
Anzahl Personen	P	4,0			
Frischluft pro Person	m³/(P*h)	30			
Frischluftbedarf	m³/h	120			
Ablufträume		Küche	Bad	Dusche	WC
Anzahl		1	1	0	1
Abluftbedarf pro Raum	m³/h	60	40	20	20
Abluftbedarf gesamt	m³/h	120			
Auslegungsvolumenstrom (Maximum)	m³/h	145			

Berechnung des mittleren Luftwechsels

Betriebsarten	tägl. Betriebs-zeiten h/d	Faktoren bezügl. Maximum	Luftvolumenstrom m³/h	Luftwechsel 1/h
Maximum	24,0	1,00	145	0,40
Standard		0,77	112	0,31
Grundlüftung		0,54	78	0,21
Minimum		0,40	58	0,16
			mittlerer Luftaustausch (m³/h)	mittlerer Luftwechsel (1/h)
x Wohngebäude	Mittelwert	1,00	145	0,40

Abbildung 16: Auslegung des mittleren Luftwechsels im Passivhaus

Des Weiteren muss ein Wert für den Luftwechsel des Drucktests eingetragen werden, der $n_{50} \leq 0{,}6\ h^{-1}$ beträgt (dafür eingesetzter Wert: $0{,}6\ h^{-1}$).

Für den Erdreichwärmeübertrager ist ein effektiver Wärmebereitstellungsgrad erforderlich. Dieser wurde von dem Beispiel des PHPP-Handbuchs mit 80 % übernommen [19].

Weitere Eingaben, die die einzuhaltenden Grenzwerte stark beeinflussen, sind im Tabellenblatt „Strom“ - die dort bereits vorgeschlagenen Größen für den Haushaltsstrom wurden übernommen; Im Tabellenblatt „Hilfsstrom“ - dort muss nur angegeben werden, welche Hilfsströme für die Anlagentechnik nötig sind, die Leistungsdaten werden aus dem Tabellenblatt „Kompakt“ bezogen. Das Tabellenblatt „Kompakt“ erfordert die Eingabe diverser Leistungsdaten und Messwerte der Geräteprüfung des geplanten Klimakompaktgeräts und ist damit ausschlaggebend für die gesamte Berechnung.

Die Ergebnisse aus den Eingaben und Berechnungen können im Tabellenblatt „Nachweis“ abgefragt werden. Wie in folgender Abbildung ersichtlich werden die Forderungen „Energiekennwert Heizwärme“ und des „Drucktest-Ergebnis’“ des PHI genau erfüllt, allerdings kann mit dem hier ausgewählten Kompaktgerät Vitotres 343 von der Firma Viessmann (siehe Kapitel 4.3 Klimakompaktgerät in Variante 1) der erforderliche „Primärenergie-Kennwert“ nicht eingehalten werden.

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche				
Energiebezugsfläche:	146,0	m^2		
	Verwendet:	Monatsverfahren	PH-Zertifikat:	Erfüllt?
Energiekennwert Heizwärme:	15	kWh/(m^2a)	15 kWh/(m^2a)	ja
Drucktest-Ergebnis:	0,6	h^{-1}	0,6 h^{-1}	ja
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung, Kühlung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):	127	kWh/(m^2a)	120 kWh/(m^2a)	nein
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	76	kWh/(m^2a)		
Primärenergie-Kennwert Einsparung durch solar erzeugten Strom:		kWh/(m^2a)		
Heizlast:	13	W/m^2		
Übertemperaturhäufigkeit:	6	%	über 25 °C	
Energiekennwert Nutzkälte:		kWh/(m^2a)	15 kWh/(m^2a)	
Kühllast:	14	W/m^2		

Kennwert mit Bezug auf Nutzfläche nach EnEV				
Nutzfläche nach EnEV:	225,6	m^2		
			Anforderung:	Erfüllt?
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	49	kWh/(m^2a)	40 kWh/(m^2a)	nein

Abbildung 17: Tabellenausschnitt „Nachweis“ Variante 1

Im Tabellenblatt „Heizlast“ wird errechnet, ob die Beheizung des Gebäudes allein über die Zuluft erfolgen kann. Obwohl der Energiekennwert für die Heizwärme und das Drucktest-Ergebnis eingehalten werden und die Lüftungsanlage auf einen 0,4-fachen Luftwechsel eingestellt wurde und somit mehr Wärme transportieren kann liegt der Grenzwert für eine Beheizung über Zuluft bei 11,2 W/m². Das Objekt besitzt aber eine spezifische Heizlast von 13,5 W/m² (bezogen auf die Energiebezugsfläche des PHPP 2007, 146 m²) und kann deshalb nicht ausschließlich über die Lüftungsanlage beheizt werden.

Das bedeutet, dass zusätzliche Heizflächen im Gebäude integriert werden müssen, die den restlichen Wärmebedarf abdecken. Dies kann über direktelektrisch betriebene oder wasserführende Heizflächen geschehen. Da bei diesem Kompaktgerät ein Heizkreis angeschlossen werden kann, bietet sich ein zusätzliches hydraulisches Heiznetz an. Dabei müssen aber auch die entsprechenden Verluste und Verbräuche berücksichtigt werden, die ein solches Heiznetz mit sich bringen. Diese werden nach DIN 4701-10 berücksichtigt [20].

Diese Verluste betragen für die Übergabe 3,3kWh/(m²a) und für die Verteilung 0,41kWh/(m²a) (der detaillierte Rechengang findet sich in Anhang C).

Die Pumpenantriebsenergie beträgt 0,33 kWh/ (m²a), bei 185-tägiger Heizperiode, einer Betriebszeit von 16 Stunden pro Tag und der vorausgesetzten Leistungsaufnahme einer Hocheffizienzpumpe von 25W,.

Außerdem wird noch der Energiebedarf addiert, der benötigt wird um das Badezimmer von 20 °C auf 24 °C nachzuheizen. Dieser beträgt 0,34 kWh/(m²a) (detaillierte Berechnung siehe Kapitel 4.8).

Da diese Bedarfe durch die Wärmepumpe indirekt elektrisch erzeugt werden muss jeweils noch der Primärenergiefaktor $f_P = 2{,}7$ und die Erzeuger-Aufwandszahl $e_{L,g,WP} = 0{,}57$ (Wert aus PHPP 2007) multipliziert werden!

Der tatsächliche Primärenergie-Kennwert beträgt somit für diese Variante:

$$49\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}} + 2{,}7\bullet 0{,}57\bullet\left(3{,}3\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}} + 0{,}41\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}} + 0{,}33\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}} + 0{,}34\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}}\right) = 55{,}7\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}}$$

4.2 Passivhaus (Variante 1 mit Solaranlage)

Es soll nun untersucht werden, ob der Primärenergie-Kennwert eingehalten werden kann, wenn zusätzlich eine Solaranlage zur Trinkwassererwärmung projektiert wird.

Alle Eingabewerte bleiben unverändert, nur im Tabellenblatt „SolarWW“ wird eine Solaranlage definiert. Projektiert werden 4 m² Flachkollektorfläche in 35° Anstellwinkel mit konsequenter Südausrichtung der Kollektoren. Der Trinkwasserspeicher hat ein Inhaltsvolumen von 250 l. Somit liegt die Nutzung der Solarenergie bei der sommerlichen Trinkwarmwasserbereitung. Die folgende Auslegung macht deutlich, welche wichtige Rolle die Solarenergienutzung im Bereich der Energieeinsparung hat. Laut PHPP sollen mit dieser Maßnahme rund 45 % der Trinkwassererwärmung solar erzeugt werden können.

Der Vergleich im Tabellenblatt „Nachweis“ macht deutlich, dass durch die Solaranlage tatsächlich der vom PHI geforderte Primärenergie-Kennwert (inklusive Haushaltsstrom) von 120 kWh/(m²a) eingehalten werden kann.

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche				
Energiebezugsfläche:	146,0	m²		
	Verwendet:	Monatsverfahren	PH-Zertifikat:	Erfüllt?
Energiekennwert Heizwärme:	15	kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a)	ja
Drucktest-Ergebnis:	0,6	h^{-1}	0,6 h^{-1}	ja
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung, Kühlung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):	116	kWh/(m²a)	120 kWh/(m²a)	ja
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	64	kWh/(m²a)		
Primärenergie-Kennwert Einsparung durch solar erzeugten Strom:		kWh/(m²a)		
Heizlast:	13	W/m²		
Übertemperaturhäufigkeit:	6	%	über 25 °C	
Energiekennwert Nutzkälte:		kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a)	
Kühllast:	14	W/m²		

Kennwert mit Bezug auf Nutzfläche nach EnEV				
Nutzfläche nach EnEV:	225,6	m²		
			Anforderung:	Erfüllt?
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	42	kWh/(m²a)	40 kWh/(m²a)	nein

Abbildung 18: Tabellenausschnitt „Nachweis“ für Variante 1 mit Solaranlage

Auch für diese Variante müssen die Verluste und Verbräuche wie in der Variante ohne Solaranlage nach DIN 4701-10 berücksichtigt werden. Der Pumpenstrom für die Solaranlage wird bereits im PHPP 2007 berücksichtigt. Die Erzeuger-Aufwandszahl ist dem PHPP Tabellenblatt PE-Kennwert entnommen.

Der tatsächliche Primärenergie-Kennwert beträgt somit für diese Variante:

$$42\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}} + 2,7\bullet 0,63\bullet\left(3,3\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}} + 0,41\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}} + 0,33\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}} + 0,34\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}}\right) = 49,5\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}}$$

4.3 Klimakompaktgerät in Variante 1

Die Anforderung an das Klimakompaktgerät ist die Möglichkeit zum Integrieren einer Solaranlage und aufgrund des nicht abzudeckenden Heizwärmebedarfs über die Lüftungsanlage ein zusätzlicher Wärmetauscher zum Anschluss warmwasserführender Heizflächen. Damit fällt die Wahl auf das Gerät „Vitotres 343“ der Firma Viessmann Werke GmbH & Co. KG, welches ein klassisches Kompaktgerät mit Fortluftwärmepumpe und E-Nachheizstab ist, aber zusätzlich noch die Option auf eine Solaranlage und einen hydraulischen Heizkreis bietet. Zur Ermittlung der Leistungszahlen und des Stromverbrauchs durch das PHPP 2007 im Referenzgebäude sind Messwerte aus einer Laborprüfung notwendig. Diese sind beim Hersteller direkt zu erfragen und sind in Anhang A.2 nachzuschlagen.

Aus diesen Messwerten werden folgende Daten für die Variante 1 mit Solaranlage ermittelt. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Bezugsfläche nicht auf die EnEV von 225,6 m², sondern auf die Energiebezugsfläche von 146 m² nach PHPP bezieht:

- Strombedarf Hilfsstrom 6,1 kWh/(m²a)
- Strombedarf Wärmepumpe 17,8 kWh/(m²a)
- Arbeitszahl Wärmepumpe Heizung 1,6
- Arbeitszahl Wärmepumpe Warmwasser 2,3
- Aufwandszahl Wärmeerzeuger 0,63
- Wärmelieferung direktelektrisch 582 kWh/(a)
- Wärmelieferung WP Heizung 1.405 kWh/(a)
- Wärmelieferung WP Warmwasser Winter 884 kWh/(a)
- Wärmelieferung WP Bereitschaft Winter 158 kWh/(a)
- Wärmelieferung WP Warmwasser Sommer 1.087 kWh/(a)
- Wärmelieferung WP Bereitschaft Sommer 477 kWh/(a)
- Jahresarbeitszahl β_{WP} 1,5

- Endenergiebedarf der Wärmebereitstellung 2.594 kWh/(a)
- jährlicher Primärenergiebedarf 7.003 kWh/(a)

Diese sehr schlechten Ergebnisse, mitunter die Arbeitszahl der Wärmepumpe von 1,5 resultieren aus den ebenfalls eher schlechten Prüfwerten des Kompaktgeräts. Auf eine erneute telefonische Anfrage bei Viessmann Werke GmbH & Co. KG wurden diese Daten aber bestätigt und scheinen der Realität zu entsprechen.

Aufgrund dieser Ergebnisse ist auch der Primärenergie-Kennwert sowohl nach PHPP Ermittelung als auch nach EnEV so hoch und überschreitet tatsächlich sogar die EnEV-Anforderung von 40 kWh(m²a) (bezogen auf EnEV-Nutzfläche). Dies hat zur Folge, dass die finanzielle Förderung in Form von vergünstigter Kreditvergabe durch die KfW-Bank nicht genehmigt werden kann.

4.4 Passivhaus (Variante 2)

In Variante 2 soll untersucht werden, ob mit dem Kompaktgerät Aerex BW 175 von Aerex Haustechniksysteme der Primärenergie-Kennwert verbessert und ob dadurch die EnEV-Anforderung erfüllt werden kann.

Sämtliche Rahmenbedingungen bleiben identisch, es werden lediglich die Daten eines anderen Kompaktgerätes eingegeben.

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche

Energiebezugsfläche:	146,0	m²		
	Verwendet:	Monatsverfahren	PH-Zertifikat:	Erfüllt?
Energiekennwert Heizwärme:	15	kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a)	ja
Drucktest-Ergebnis:	0,6	h⁻¹	0,6 h⁻¹	ja
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung, Kühlung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):	106	kWh/(m²a)	120 kWh/(m²a)	ja
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	55	kWh/(m²a)		
Primärenergie-Kennwert Einsparung durch solar erzeugten Strom:		kWh/(m²a)		
Heizlast:	14	W/m²		
Übertemperaturhäufigkeit:	5	%	über 25 °C	
Energiekennwert Nutzkälte:		kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a)	
Kühllast:	14	W/m²		

Kennwert mit Bezug auf Nutzfläche nach EnEV

Nutzfläche nach EnEV:	225,6	m²		
			Anforderung:	Erfüllt?
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	36	kWh/(m²a)	40 kWh/(m²a)	ja

Abbildung 19: Tabellenausschnitt „Nachweis“ für Variante 2

Die Veränderung der Primärenergie-Kennwerte nach PHI und EnEV verändern sich durch das neue Kompaktgerät positiv, die EnEV-Anforderung wird nun auch eingehalten.

Dieses Kompaktgerät bietet keine Integration für einen hydraulischen Heizkreis, die Nachheizung muss deshalb über elektrische Heizflächen erfolgen. Für eine Elektroheizung mit überwiegender Anordnung im Außenwandbereich gilt nach DIN 4701-10 in Tabelle 5.3-1 (flächenbezogener Wärmebedarf $q_{H,ce}$ für die Übergabe der Wärme im Raum) ein Verlust von $q_{H,ce}$ = 0,7 kWh(m²a).

Dazu kommt lediglich der Nachheizbedarf für das Badezimmer von 0,34 kWh/(m²a). Auch hier muss mit dem Primärenergiefaktor f_P = 2,7 und die Erzeuger-Aufwandszahl $e_{L,g,WP}$ = 0,40 (aus PHPP 2007) multipliziert werden!

Der tatsächliche Primärenergie-Kennwert beträgt somit für diese Variante:

$$36\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}} + 2{,}7\bullet 0{,}40\bullet\left(0{,}7\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}} + 0{,}34\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}}\right) = 37{,}1\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\bullet\text{a}}$$

4.5 Passivhaus (Variante 2 mit Solaranlage)

Mit denselben Rahmenbedingungen und identischem Klimakompaktgerät soll auch für Var. 2 untersucht werden, wie viel Energie eine Solaranlage einsparen würde. Es werden ebenfalls 4 m² Kollektorfläche in 35° Neigung mit Ausrichtung nach Süden eingesetzt [4]. Der Trinkwasserspeicher hat bei diesem Kompaktgerät ein Fassungsvermögen von 320 l.

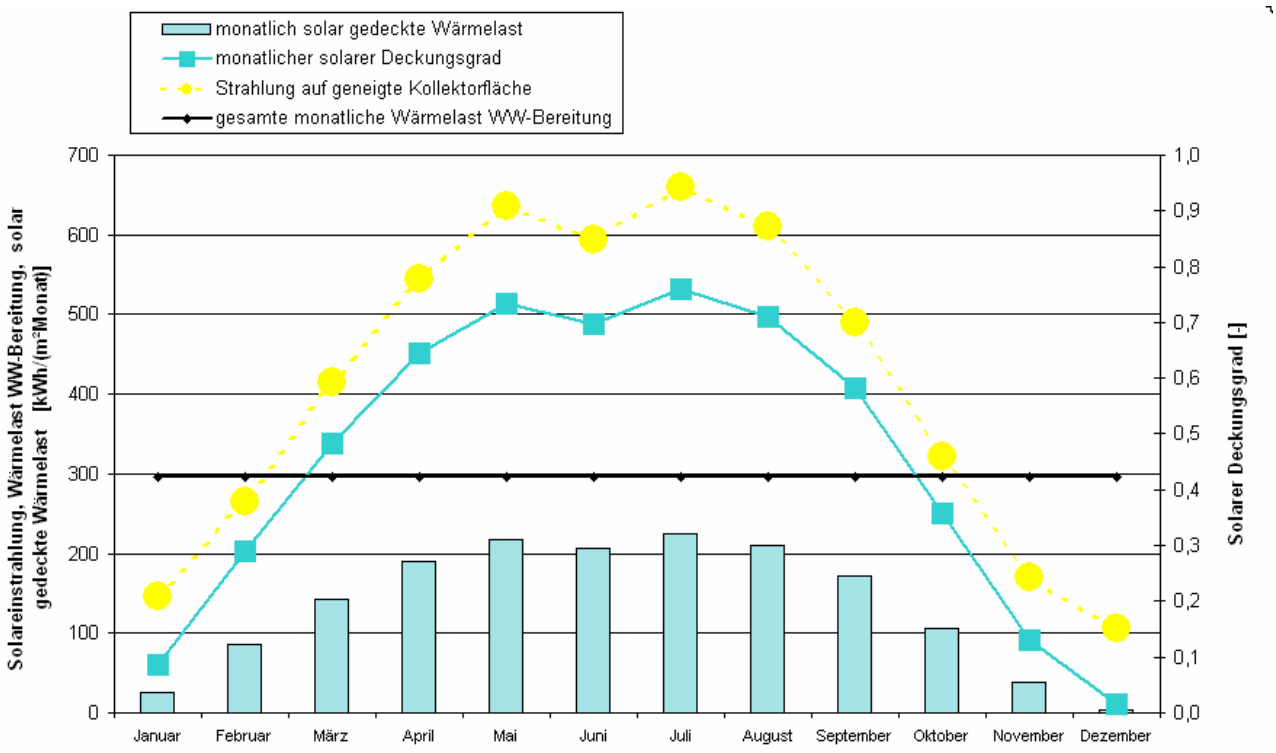


Abbildung 20: Vom PHPP berechnete solare Gewinne

Laut PHPP sollen mit dieser Maßnahme rund 46 % der Trinkwassererwärmung solar erzeugt werden können. Der Primärenergie-Kennwert nach der EnEV verbessert sich durch diese Maßnahme um 6 kWh/m²a.

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche				
Energiebezugsfläche:	146,0	m^2		
	Verwendet:	Monatsverfahren	PH-Zertifikat:	Erfüllt?
Energiekennwert Heizwärme:	15	$kWh/(m^2a)$	15 $kWh/(m^2a)$	ja
Drucktest-Ergebnis:	0,6	h^{-1}	0,6 h^{-1}	ja
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung, Kühlung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):	98	$kWh/(m^2a)$	120 $kWh/(m^2a)$	ja
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	47	$kWh/(m^2a)$		
Primärenergie-Kennwert Einsparung durch solar erzeugten Strom:		$kWh/(m^2a)$		
Heizlast:	14	W/m^2		
Übertemperaturhäufigkeit:	5	%	über 25 °C	
Energiekennwert Nutzkälte:		$kWh/(m^2a)$	15 $kWh/(m^2a)$	
Kühllast:	14	W/m^2		

Kennwert mit Bezug auf Nutzfläche nach EnEV				
Nutzfläche nach EnEV:	225,6	m^2		
			Anforderung:	Erfüllt?
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	30	$kWh/(m^2a)$	40 $kWh/(m^2a)$	ja

Abbildung 21: Tabellenausschnitt „Nachweis“ für Variante 2 mit Solaranlage

Wie in Variante 2 ohne Solaranlage wird hier lediglich der Übergabeverlust für Elektrobeheizung von $q_{H,ce}$ = 0,7 kWh(m²a) und der Nachheizbedarf für das Badezimmer von 0,34 kWh/(m²a) addiert und mit dem Primärenergie-Kennwert 2,7 für Strom und der Aufwandszahl von 0,44 nach PHPP multipliziert:

Der tatsächliche Primärenergie-Kennwert beträgt somit für diese Variante:

$$29\frac{kWh}{m^2 \bullet a} + 2,7 \bullet 0,44 \bullet \left(0,7\frac{kWh}{m^2 \bullet a} + 0,34\frac{kWh}{m^2 \bullet a}\right) = 30,2\frac{kWh}{m^2 \bullet a}$$

Mit diesem Kompaktgerät können für die Passivhaus Variante 2 mit Solaranlage alle Anforderungen erfüllt werden.

4.6 Klimakompaktgerät in Variante 2

Das hier eingesetzte Klimakompaktgerät Aerex BW 175 ist von der Firma Aerex Haustechnik Systeme, dieses ist laut Fraunhofer Institut ISE auch das in Passivhäusern am Häufigsten eingesetzte Gerät. Das Gerät beinhaltet die kontrollierte Wohnungslüftung einschließlich Wärmerückgewinnung mit 78%. Eine Fortluft-Wärmepumpe mit 1,4 kW Nenn-

Wärmeleistung zur Trinkwassererwärmung und Heizung. Der Speicher-Wassererwärmer hat einen Inhalt von 320 Liter mit integriertem Solarwärmetauscher.

Da diese Messwerte aus der Laborprüfung erst für das PHPP 2007 nötig wurden - in älteren PHPP Versionen waren keine unterschiedlichen Prüfpunkte notwendig – mussten die erforderlichen Daten der Kompaktgeräte erst auf dem Prüfstand ermittelt werden. Im Zuge der Recherchen, welches Kompaktgerät für das Referenzgebäude geeignet ist, wurde klar, dass nur wenige Hersteller die Messwerte bereits in endgültiger Fassung vorliegen haben. Auch die Daten des gewählten Gerätes Aerex BW 175 sind noch keine endgültigen Daten, da sich das Gerät noch in der Laborprüfung befindet! Das bedeutet, dass sich die Messwerte noch um wenige Prozentpunkte verändern können. Dies ist aber insofern von untergeordneter Bedeutung, da die Messwerte aus den idealisierten Laborbedingungen ohnehin in einem gewissen Rahmen von dem Betrieb in realen Gebäuden abweichen. Auch diese Prüfdaten finden sich in Anhang A.2.

Aus diesen Messwerten werden folgende Daten für die Variante 2 mit Solaranlage ermittelt. Dabei ist wiederum darauf zu achten, dass sich die Bezugsfläche nicht auf die EnEV von 225,6 m², sondern auf die Energiebezugsfläche von 146 m² nach PHPP bezieht:

- Strombedarf Hilfsstrom 4,9 kWh/(m²a)
- Strombedarf Wärmepumpe 12,4 kWh/(m²a)
- Arbeitszahl Wärmepumpe Heizung 3,3
- Arbeitszahl Wärmepumpe Warmwasser 3,2
- Aufwandszahl Wärmeerzeuger 0,44
- Wärmelieferung direktelektrisch 618kWh/(a)
- Wärmelieferung WP Heizung 1.483 kWh/(a)
- Wärmelieferung WP Warmwasser Winter 900 kWh/(a)
- Wärmelieferung WP Bereitschaft Winter 114 kWh/(a)
- Wärmelieferung WP Warmwasser Sommer 1.028 kWh/(a)
- Wärmelieferung WP Bereitschaft Sommer 336 kWh/(a)
- Jahresarbeitszahl β_{WP} 2,2
- Endenergiebedarf der Wärmebereitstellung 1.810 kWh/(a)
- jährlicher Primärenergiebedarf 4.888 kWh/(a)

4.7 Passivhaus (Variante 3)

Als letzte Variante soll noch untersucht werden, welche Anforderungen an das Gebäude gestellt werden, um eine Beheizung rein über die Zuluft zu ermöglichen.

Zunächst sollen die U-Werte der Außenbauteile verbessert werden. Aufgrund der schon sehr dicken Bauteile wird nur der Dämmstandard von λ = 0,035 W/mK auf λ = 0,030 W/mK angehoben. Dadurch werden folgende U-Werte erzielt:

- Außenwand: 0,093 W/(m²K) – 51 cm (davon 30 cm Dämmung)
- Dach: 0,099 W/(m²K) – 46,8 cm (davon 40 cm Dämmung)
- Bodenplatte: 0,110 W/(m²K) – 58,5 cm (davon 25 cm Dämmung)

In Varianten 1 und 2 wurde für die Einbausituation der Fenster der hinterlegte Wert übernommen. Laut PHPP-Handbuch besteht aber die Möglichkeit die Fensteranschlüsse selbst zu bestimmen und einzutragen. Für ein Wärmedämmverbundsystem, wie im vorliegenden Fall, können die ψ-Werte für die Brüstung zu ψ = 0,05 (W/mK) und für die Laibung zu ψ = 0,00 (W/mK) angesetzt werden. Für jedes Fenster wird separat die Größe, Einbausituation (ein-/zweiflügeliges Fenster), Rahmenmaße, Himmelsrichtung und Verschattung erfasst. Daraus errechnet sich ein mittlerer U-Wert der Fenster von 0,64 (W/m²K).

Der Luftwechsel n_{50} nach Drucktest wird auf 0,29 h^{-1}herabgesetzt.

Der Anlagen-Luftwechsel soll wie in den vorhergehenden Varianten auch 0,4 h^{-1} betragen.

Mithilfe dieser Verbesserungen wäre es nun möglich die Gebäudeheizlast rein über Zuluft abzudecken.

Heizwärmelast P_H			=			**1607**	**W**
wohnflächenspezifische Heizwärmelast P_H / A_{EB}			=			**11,0**	**W/m²**
Eingabe max. Zulufttemperatur	52	°C			°C	°C	
Max. Zulufttemperatur $\vartheta_{ZU,Max}$	52	°C	Zulufttemperatur ohne Nachheizung	$\vartheta_{ZU,Min}$	17,8	17,9	
Vergleich: Wärmelast, die von der Zuluft transportierbar ist			$P_{ZuluftMax}$ =	1630	W spezifisch	11,2	W/m²
			Über die Zuluft beheizbar?			(ja/nein) ja	

Abbildung 22: Tabellenausschnitt „Heizlast“, überarbeitete Berechnung

Da aber als Vergleichsbasis für diese Berechnung jeweils nur die spezifischen Vorgaben erfüllt werden sollen, wird diese Variante nicht weiter verfolgt.

4.8 Nachheizung Bad

Laut DIN EN 12831 wird eine Auslegungstemperatur von 24 °C für das Badezimmer gefordert. Im PHPP 2007 ist keine Möglichkeit vorhanden, eine Nachheizung im Badezimmer einzusetzen. Deshalb wird im Folgenden dargestellt, wie viel höher die bereitzustellende Leistung sein muss, um das Badezimmer nachzuheizen. Die Berechnung erfolgt anhand der mh-Software. Als Grundlage für das dimensionierte Badezimmer gelten die festgesetzten Werte aus vorhergegangenen Berechnungen für das Passivhaus (Varianten 1 und 2) und der Grundriss des Badezimmers aus der Vorlage für das Referenzgebäude, welches sich im an der Innenseite zur Nord- und Westwand im 1.OG befindet.

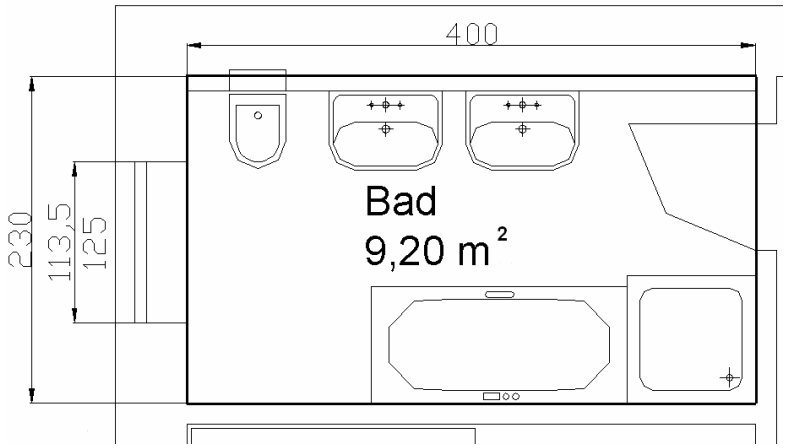


Abbildung 23: Grundriss Bad

Der Raum hat eine Nutzfläche von 9,2 m² und ein Volumen von 23 m³. Der Abluftbedarf für das Badezimmer wird aus dem PHPP übernommen und beträgt 40 m³/h, die Zuluft kommt aus der Überströmung angrenzender Räume und hat eine Temperatur von 20 °C.

In der mh-Software errechnet sich hieraus ein maßgebender Volumenstrom von ca. 15 m³/h. Gefordert wird nach DIN EN 12831 ein Mindestluftwechsel in Bädern von 1,5 h^{-1}. Dieser kann nur durch zusätzliche Fensterlüftung erreicht werden, unterliegt dem Nutzerverhalten und ist somit nicht rechnerisch bestimmbar. Somit bleibt der Luftwechsel nach Norm unberücksichtigt.

Als Ergebnis der Norm-Raumheizlast ergibt sich bei einer Innentemperatur von 20 °C ein Bedarf von 212 W, bei einer Innentemperatur von 24 °C ein Bedarf von 315 W (Berechnung siehe Anhang A.2). Diese Differenz von 103 W muss nachgeheizt werden. Bei einem so geringen aber erforderlichen Nachheizbedarf ist die Integration eines zusätzlichen wasserführenden Heizsystems unwirtschaftlich, da Rohre verlegt, ein separater Raumregler installiert und eine Pumpe eingebaut werden müssten. Als wirtschaftlichere Variante in der Investition stellt sich beispielsweise ein elektrischer Handtuchheizkörper, bzw. eine elektrische Fußbodenheizung dar.

Dieser energetische Mehraufwand kann überschlägig über die Vollbenutzungsstunden des Bades in der Heizperiode (185 Tage nach DIN 4801-6) ermittelt werden. Dafür soll angenommen werden, dass das Badezimmer morgens eine Stunde und abends drei Stunden auf 24 °C beheizt sein soll. Ein Mehraufwand für Wiederaufheizung soll unberücksichtigt bleiben. Beachtet man hierbei, dass nur in Ausnahmefällen die Auslegungstemperatur von -12 °C herrscht, ergeben sich andere Heizlasten für den betrachteten Raum. Mithilfe der mh-Software können unterschiedliche Außentemperaturen eingesetzt werden um zu prüfen, wie sich die Heizlast und der Energiebedarf bei der Differenz von 20 °C zu 24 °C verändern. Bei dieser Untersuchung zeigte sich, dass sich die Heizlast bei wärmeren Außentemperaturen logischerweise verringert, die Differenz für die Beheizung auf 24 °C aber näherungsweise gleich bleibt. Somit wird für den Betrachtungszeitraum die Heizperiode nach DIN 4801-6 und die 4-Stündige Beheizung veranschlagt. Der Energiebedarf wird auf die Gebäudenutzfläche von 225,6m² nach EnEV umgelegt, da das Ergebnis zu dem errechneten Primärenergie-Kennwert der EnEV addiert werden muss.

$$\frac{185\frac{d}{a}\bullet 4\frac{h}{d}\bullet 103W}{1000} = 76,2\frac{kWh}{a}$$

Der zusätzliche Energiebedarf für die Nachheizung des Badezimmers ergibt sich somit zu:

$$\frac{Q_{Bad,zus}}{A_{Nutz}} = \frac{76,2\frac{kWh}{a}}{225,6m^2} = 0,34\frac{kWh}{m^2\bullet a}$$

5 Projektierung und Berechnungen Sonnenhaus

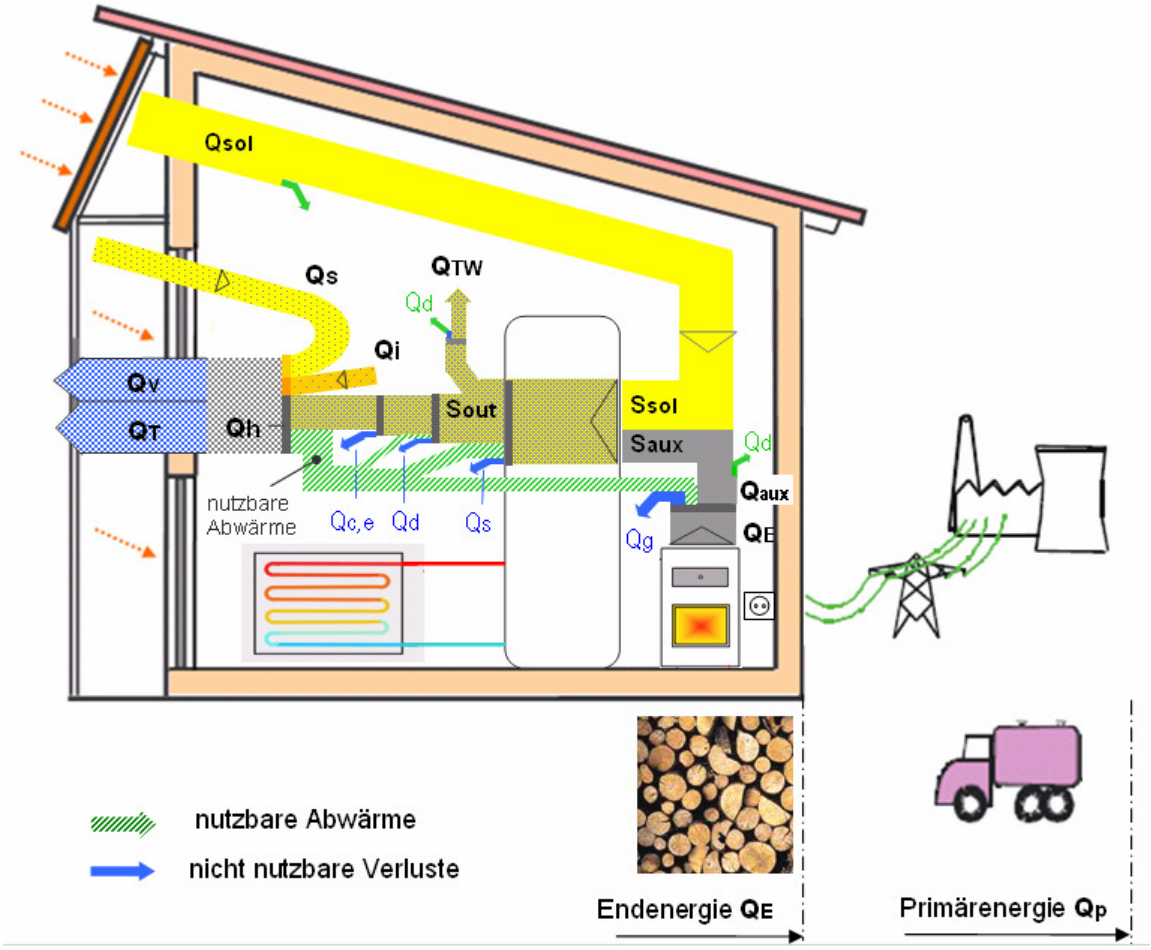


Abbildung 24: Energieflussdiagramm Sonnenhaus

Um den Energieverbrauch im Sonnenhaus bestimmen zu können, müssen zunächst die Transmissions- und Lüftungsverluste Q_T und Q_V bestimmt werden. Davon werden die passiven solaren und internen Wärmegewinne Q_S und Q_i abgezogen und als Summe daraus der Heizwärmebedarf Q_h ermittelt. Dieser Berechnungsschritt kann mit dem EnEV-Softwareprogramm von Hottgenroth erfolgen. Die Bestimmung des Energiebedarfs für die Trinkwarmwasserbereitung Q_{TW} erfolgt ebenfalls mit dieser Software.

Die wichtigste Überlegung bei der Berechnung besteht darin, den Nachheizwärmebedarf möglichst exakt zu ermitteln. Der erste Gedankenansatz dazu war, die Berechnungsschritte nach DIN 4701-10 heranzuziehen, allerdings sind hierbei die Speicherverluste ohne entsprechende Prüfwerte vom Hersteller nicht zu bestimmen. Somit wird die Bestimmung der Speicherverluste der Simulation im Polysun überlassen.

Im Polysun werden die solaren Deckungsgrade (input-orientiert) nach Systemgrenzen ermittelt. Der im Ergebnis ausgegebene solare Deckungsgrad bezieht sich auf alle Bauteile die innerhalb des roten Kreises in Abbildung 25 zu sehen sind. Das Heizungsrohrnetz wurde mit dem Gebäude simuliert, welches außerhalb der Systemgrenze steht. Die im Schema sichtbaren Leitungen des Heizkreises sind nur kurze Verbindungsleitungen bis zur Verteilung und sind somit für die Verlustbestimmung von untergeordneter Bedeutung. Der Wärmebedarf für die Gebäudebeheizung und das Trinkwarmwasser werden ab der Solarsimulation als Summe geführt, da sich der ausgegebene solare Deckungsgrad für die definierte Systemgrenze ebenfalls auf die Gesamtsumme bezieht.

Dies hat zur Folge, dass die Verteil- und Übergabeverluste vom Heizkreis und Trinkwarmwassernetz separat nach DIN 4701-10 bestimmt und zu dem Wärmebedarf nach EnEV addiert werden müssen.

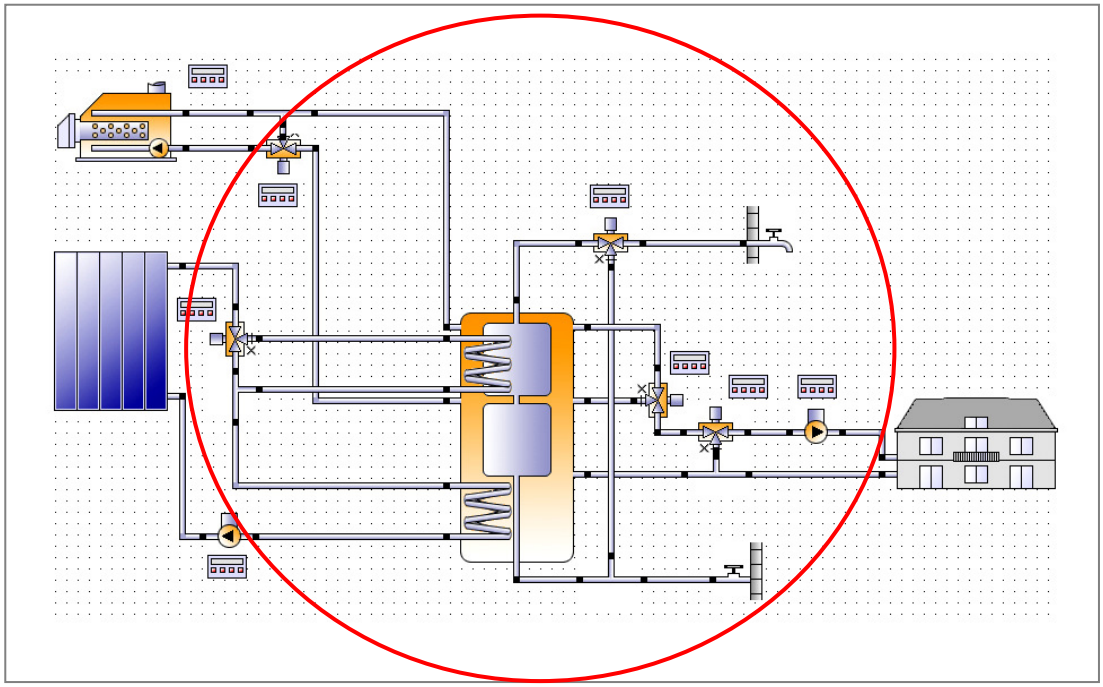


Abbildung 25: Definierte Systemgrenze

Die Summe aus Wärmebedarf für Heizung und Trinkwarmwasser plus Verluste wird nun ins Polysun übertragen, woraus der solare Deckungsgrad simuliert wird.

Mit diesem Deckungsgrad kann nun der Anteil bestimmt werden, der über Biomasse nachzuheizen ist, indem noch die Erzeuger-Aufwandszahl nach DIN 4701-10 multipliziert wird. Daraus erhält man den Endenergiebedarf an Biomasse, der noch mit dem entsprechenden Primärenergiefaktor multipliziert wird und anschließend mit dem Primärenergiebedarf für Hilfsenergien addiert wird.

Der Rechengang wird in folgender Abbildung übersichtlich dargestellt:

Berechnungsschema Endenergie- und Primärenergiebedarf:

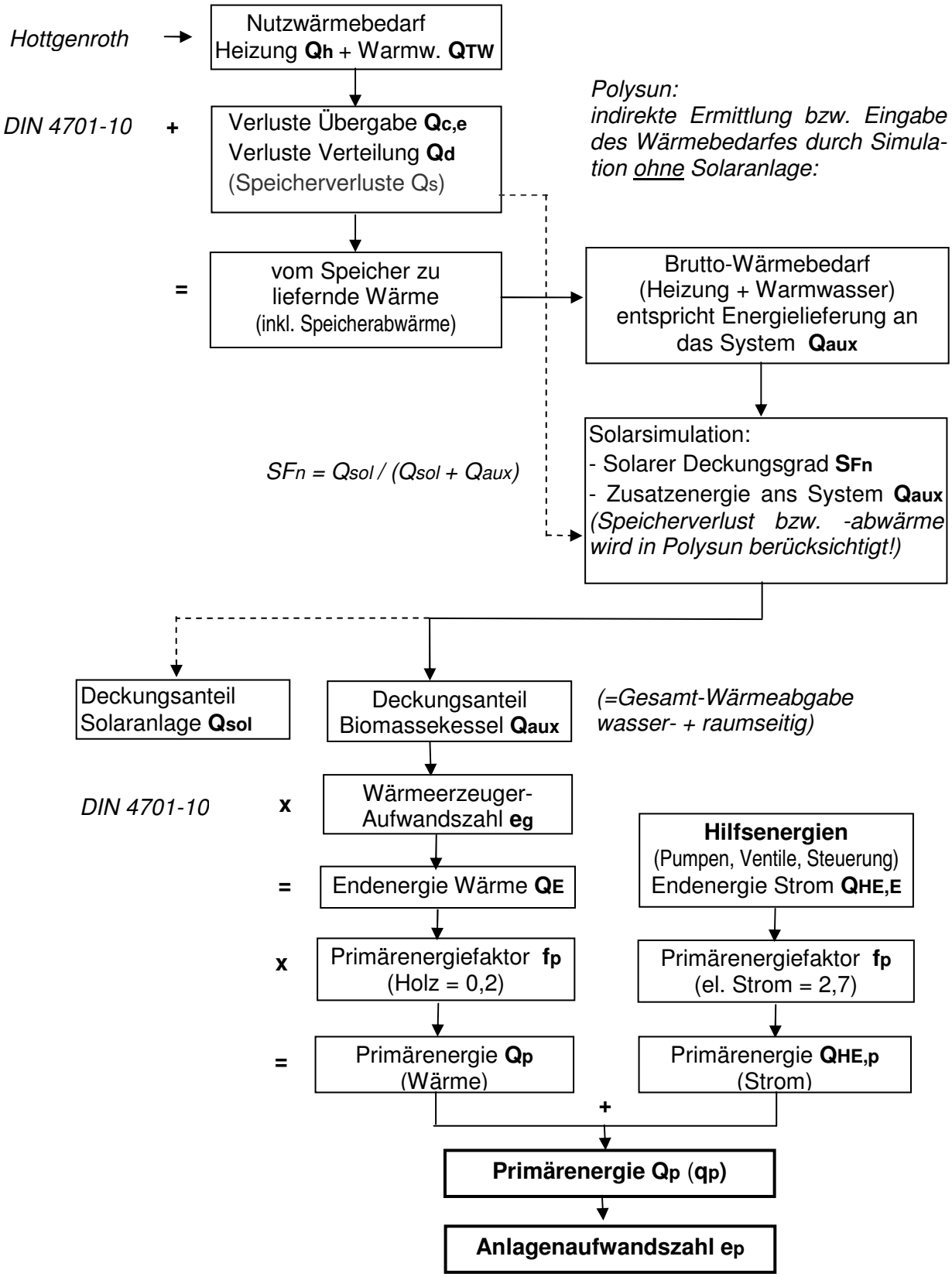


Abbildung 26: Vorgehensweise bei den Berechnungen für das Sonnenhaus

5.1 Bestimmung des Heizwärmebedarfs mit Hottgenroth Energieberater-Software

Der Heizwärmebedarf des Sonnenhauses wird mit einer Energieberatersoftware der Firma Hottgenroth nach Vorgaben der DIN 4801-6, der EnEV und den Regeln der Technik berechnet. Zum Anlegen eines neuen Projektes lässt sich zwischen der Eingabe nach EnEV 2007 oder freier Eingabe wählen. Um möglichst realistische Eingaben (wie unter 2.3 „Wichtige, anzugleichende Parameter“ und Festlegungen in Kapitel 2 „Grundlagen und Definitionen des Referenzgebäudes“ erläutert) machen zu können, wird die freie Eingabe gewählt. Für die Gebäude- und Anlagenerfassung wird jeweils die detaillierte Erfassung eingestellt. Anschließend werden die Gebäudedaten erfasst.

Als nächste Eingabe erfolgen die Zusammenstellung der Außenbauteile und die Berechnung der U-Werte. Als Grundlage für die U-Werte dienen die Vorgaben des SHI. Die detaillierte Darstellung der U-Werte befindet sich im Anhang B, die Ergebnisse werden nachfolgend aufgelistet. Die U-Werte liegen meist eher an der oberen Grenze der SHI-Vorgaben, trotzdem wird der Sonnenhaus-Mindestdämmstandard gemäß den Anforderungen nach KFW-40 erfüllt:

- Außenwand: 0,18 W/(m²K), (Dicke 0,46 m) Poroton-Ziegel T8 mit integrierter Perlit-Dämmung
- Dach: 0,15 W/(m²K), (Dicke 0,39 m, davon 0,30 m Dämmstoff)
- Bodenplatte: 0,24 W/(m²K), (Dicke 0,50 m, davon 0,12 m Dämmstoff)
- Fensterflächen: 0,8 W/(m²K), (g-Wert 0,5)

Nun werden allgemeine Gebäudedaten, Wärmegewinne und Wärmeverluste manuell eingegeben. Unter anderem werden hier die Gebäudebauart als „schwere Bauart“, die Raumtemperatur mit 19 °C, die Wärmebrückenverluste mit 0,05 W/m²K, Lüftungsverluste mit 0,4 h^{-1} und interne Wärmegewinne mit 2,1 W/m² (analog zu den Eingaben beim Passivhaus) berücksichtigt.

In Abbildung 29 wird der Heizwärmebedarf, untergliedert in Verluste und Gewinne nach Monaten gezeigt. Zu den 8.493 kWh/a Heizwärmebedarf werden noch 2.820 kWh/a für die Erwärmung des Trinkwassers addiert. Als kumulierten Nutz-Wärmebedarf erhält man so 11.313 kWh/a.

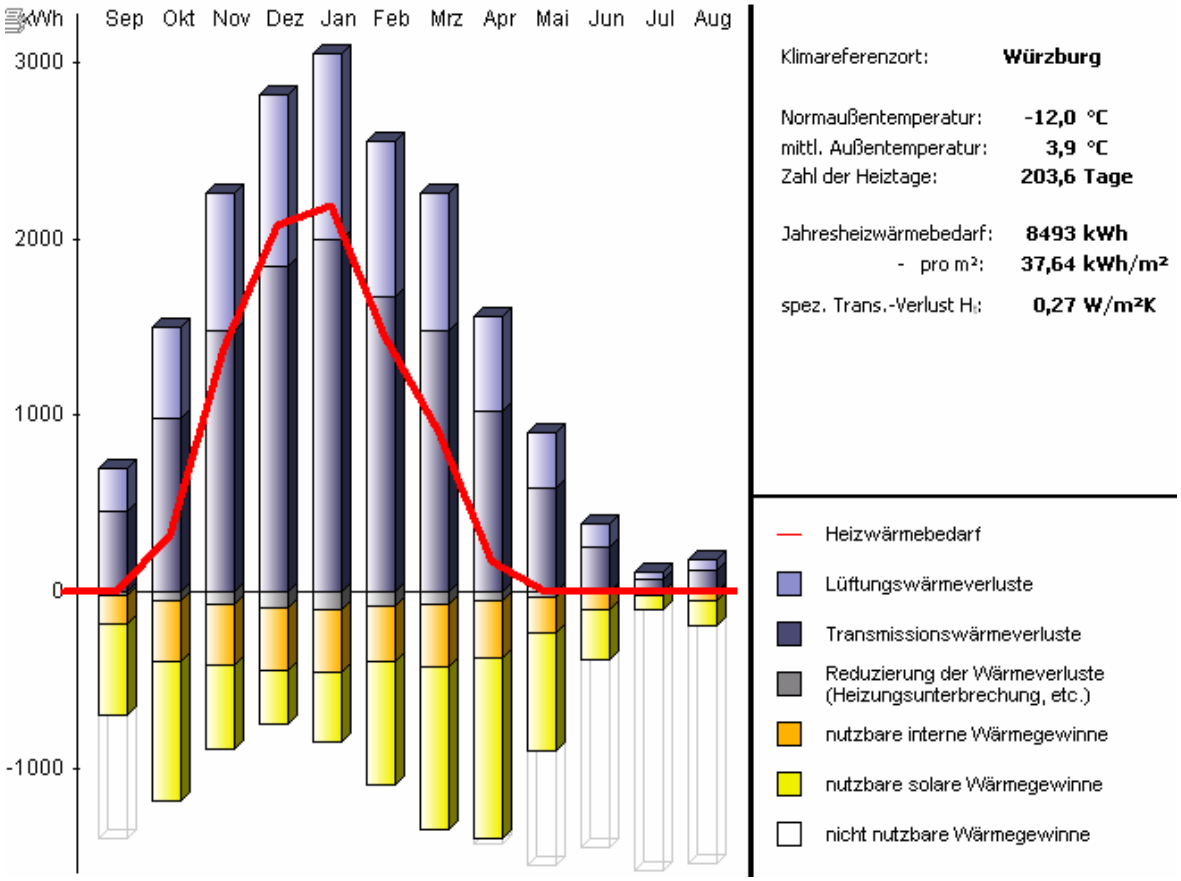


Abbildung 27: Darstellung des Heizenergiebedarfs im Sonnenhaus

In der Ergebnisberechnung werden die Transmissionsverluste aufsummiert. Wie bereits im Kapitel 2.1.3.4 Wärmebrücken erwähnt, werden Wärmebrückenverluste mit 0,05 W/(m²K) berücksichtigt, daraus ergibt sich ein H'_T von

$$H'_T = \frac{112,88\frac{W}{K}}{502,44m^2} + 0,05\frac{W}{m^2K} = 0,275\frac{W}{m^2K}$$

welcher dem geforderten Wert nach KfW40 von 45% besser als 0,508 W/(m²K) entspricht.

Ebenfalls wurde in Kapitel 2.1.3.4 darauf eingegangen, dass die Wärmebrücken in der Regel zu hoch eingesetzt werden. Würde man diese nun, so wie es beim Passivhaus der Fall ist, gleich Null setzen, erhielte man ein $H'_T = \frac{112,88\frac{W}{K}}{502,44m^2} = 0,22\frac{W}{m^2K}$,

was also nicht nur 45 % besser als der EnEV-Standard sondern eine Verbesserung von 55 % bedeuten würde. Dies wäre zwar realistischer, letztendlich kommt es aber darauf an, insgesamt den für die Gebäudedämmung vorgegebenen Standard gemäß „KWF-40“ zu erreichen.

5.2 Manuelle Berechnungen der Aufwandszahlen (DIN 4701-10)

Zum Wärmebedarf nach EnEV für Gebäudebeheizung und Trinkwarmwasser müssen nun die Verluste der Anlagentechnik, nach DIN 4701-10 [20] für das Referenzgebäude bestimmt werden, um den Brutto-Wärmebedarf für die Nachheizung zu erhalten, mit dem später im Polysun der solare Deckungsgrad simuliert werden kann. Es werden hier nur die Ergebnisse aufgelistet, die detaillierte Berechnung befindet sich im Anhang.

5.2.1 Trinkwarmwasser

5.2.1.1 Verluste Speicherung

Die Speicherverluste bleiben in der Berechnung unberücksichtigt, da diese an das umliegende Heizungswasser im Tank abgegeben und die Verluste des gesamten Speichers in der Solarsimulation berücksichtigt werden.

5.2.1.2 Verluste Verteilung

Wärmeabgabe eines Trinkwarmwasser-Rohrnetzes ohne Zirkulationsleitung:

Der Verlust für die Verteilung des Trinkwarmwassers beträgt:

$$q_{TW,d} = 239\frac{kWh}{a} = 1,06\frac{kWh}{m^2 \bullet a}$$

Der nach DIN 4701-10 anrechenbare Wärmegewinn während der Heizperiode beträgt:

Die gesamte anrechenbare Heizwärmegutschrift besteht aus den Verlusten der Verteilung.

$$q_{H,TW,d} = 108\frac{kWh}{a} = 0,48\frac{kWh}{m^2 \bullet a}$$

5.2.2 Heizung

5.2.2.1 Verluste Übergabe

Der flächenbezogene Wärmebedarf $q_{H,ce}$ für die Übergabe der Wärme im Raum (mit integrierten Heizflächen, Einzelraumregelung mit Zweipunktregler, Schaltdifferenz 2K) beträgt:

$$q_{H,ce} = 744\frac{kWh}{a} = 3,3\frac{kWh}{m^2 \bullet a}$$

5.2.2.2 Verluste Verteilung

Die Wärmeabgabe des Warmwasserheizungs-Rohrnetzes im Referenzgebäude:

Die Verluste für die Verteilung im Heizungsnetz betragen:

$$q_{H,d} = 92\frac{kWh}{a} = 0,41\frac{kWh}{m^2 \bullet a}$$

5.2.2.3 Verluste Speicher

Die Speicherverluste werden von Polysun ermittelt und sind bereits in den solaren Deckungsgrad eingerechnet.

5.2.3 Summe der Verluste

Die Summe setzt sich aus den Trinkwarmwasser- und den Heizungsverlusten zusammen:

$$q_{TW,d} + q_{H,ce} + q_{H,d} = 0,48\frac{kWh}{m^2 \bullet a} + 3,3\frac{kWh}{m^2 \bullet a} + 0,41\frac{kWh}{m^2 \bullet a} = 4,19\frac{kWh}{m^2 \bullet a} \bullet 225,6m^2 = 945\frac{kWh}{a}$$

(zuzüglich Speicherverluste)

5.3 Solarsimulation mit Polysun 4.0 Designer

Um den solaren Deckungsgrad des Gebäudes zu bestimmen, wird mit dem errechneten Wärmebedarf von 11.313 kWh/a, plus die Summe der Verluste von 945 kWh/a, mit Polysun 4.0 Designer eine Solarsimulation durchgeführt. Daraus ergibt sich die vom System zu liefernde Energie zu 12.258 kWh/a.

Über die Grundeingabemasken werden zur Ermittlung der solaren Einstrahlung zunächst die Randbedingungen des Gebäudes und des Standortes ausgewählt. Da im Hintergrund des Simulationsprogramms ein weiteres Programm zur Bestimmung des Wärmebedarfs abläuft, muss erneut das Gebäude mit Bauteilen und U-Werten definiert werden.

Grundlagen für die Verbraucherseite sind dabei die zuvor errechneten Werte von 2.820 kWh/a (190 l/d zu 45 °C, 10 °C Kaltwassertemperatur) für TWW und 8.493 kWh/a (VL/RL: 35/28 °C) für die Gebäudebeheizung. Die Heizungsrohrlängen werden nach den Standardlängen der DIN 4701-10 mit 174 m eingegeben.

Zur Erstellung des Anlagenschemas müssen die einzelnen Bauteile definiert werden:

Als Kernstück der Anlage wird der Speicher mit allen Details selbst definiert und Stutzenabgänge in entsprechenden Höhen mit Thermosiphon, Wärmetauscher in gewünschter Anordnung/Größe und Ausführung, integrierter und definierter Warmwasserboiler und Speicherisolierung eingegeben.

Die Kollektoren können ebenfalls selbst definiert werden, sind aber für diese Anlage aus der Datenbank entnommen und nur auf die tatsächliche Absorberfläche angepasst.

Für die Nachheizung stehen diverse Kessel in der Datenbank zur Auswahl. Hierfür wurde ein Stückholzkessel mit 30 kW fixer Leistung und mit 88 % Volllastwirkungsgrad gewählt. Was den Herstellerangaben für den Ofeneinsatz entspricht. Die Ein-/Ausschalthysterese

wird zu 47 °C / 60 °C zwischen der obersten und mittleren Speicherschicht bestimmt, was eine typische Nachheizung durch den Nutzer repräsentieren soll.

Die einzelnen Bauteile werden mit Rohren, Dreiwegemischern und Pumpen miteinander verbunden, wobei Mischer und Pumpen jeweils ein Steuerungssymbol erhalten, bei denen genau zu definieren ist, wann das zugehörige Bauteil ein-/aus- oder umzuschalten hat. Fühler und Messpunkte können nahezu an jeder Stelle der Anlage angenommen werden.

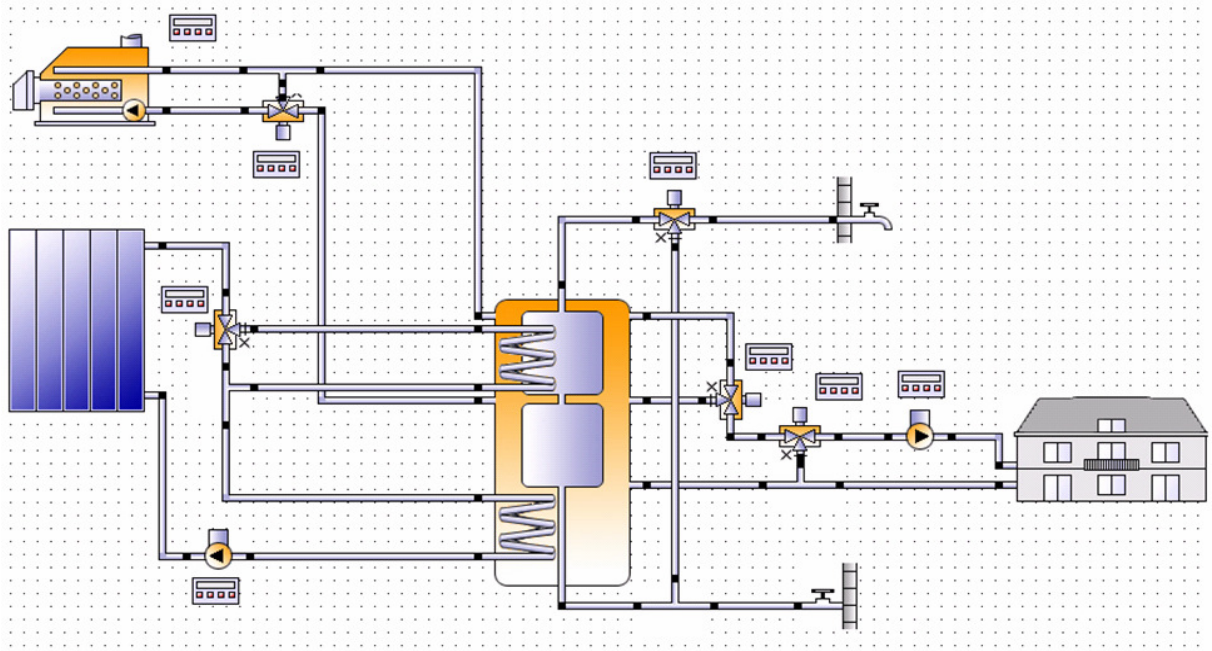


Abbildung 28: Anlagenschema Sonnenhaus für die Solarsimulation

Die Vorgehensweise bei der Simulation erfolgt zunächst so, dass die Solarkreispumpe gesperrt wird, sodass die gesamte Energiebereitstellung über die Nachheizung erfolgen muss. Die Anlage lässt sich nun simulieren und gibt ein Ergebnis für den Wärmebedarf aus, der über ein weiteres Eingabefeld so zu skalieren ist, bis er mit dem Ergebnis der Wärmebedarfsberechnung plus Verluste von 12.258 kWh/a übereinstimmt. Wird im Anschluss daran die Solarkreispumpe zugeschaltet, erhält man den solaren Deckungsgrad. Die Speicherverluste werden von Polysun berechnet und direkt in das Ergebnis übertragen.

Anhand der Simulation erhält man einen solaren Deckungsgrad des Systems von **66,5%.**

Dieser Wert ist definiert als das Verhältnis der dem System (s. roter Kreis, Abbildung 25) zugeführten Solarenergie (Qsol) zu der insgesamt zugeführten Energie (Qsol + Qaux).Für die weitere Berechnung bedeutsamer ist der Anteil Qaux, der vom Heizkessel (raum- und wasserseitig) an das System zu liefern ist. Dieser beträgt 4106 kWh.

5.4 Weitere Berechnungen nach DIN 4701-10

Für die weitere Bestimmung des Endenergie- und des Primärenergiebedarfs müssen die Erzeuger-Aufwandszahl und die Hilfsenergien berechnet werden [20]. Die detaillierten Rechengänge befinden sich im Anhang C.

5.4.1 Heizung

5.4.1.1 Erzeuger-Aufwandszahl

Die Aufwandszahl zur Erzeugung für den Trinkwarmwasserbetrieb ist beim Sonnenhaus gleich der Erzeuger-Aufwandszahl für die Heizperiode, da das Trinkwasser während der Sommermonate und in Übergangsjahreszeiten vollständig von der Solaranlage erwärmt wird. Gleichzeitig ist die Erzeuger-Aufwandszahl für die Trinkwasser-Erwärmung während der Heizperiode gleich der Erzeuger-Aufwandszahl für den Heizbetrieb, da nur Warmwasser nachgeheizt werden kann, wenn auch der Speicher für den Heizbetrieb nachgeladen wird. Da im Sonnenhaus kein gewöhnlicher Kessel zu Einsatz kommt, muss die Aufwandszahl explizit für den eingesetzten Wärmeerzeuger ermittelt werden, um ein realistisches Ergebnis zu erhalten:

Die Erzeuger-Aufwandszahl des Biomasse-WE für den Heizbetrieb beträgt:

$$e_{H,g,Bio} = 1,25$$

5.4.2 Hilfsenergie

5.4.2.1 Pumpe Solarkreis

Für das Referenzhaus wird eine Hocheffizienzpumpe (mit DC-Motorentechnik) eingesetzt; eine überschlägige hydraulische Berechnung ergab, dass die Pumpe Grundfos ALPHA Pro 25-60 mit Leistungsaufnahme 50 W für den Solarkreis geeignet ist. Die Solarpumpe läuft laut der Polysun Stundenauswertung 1.672 Stunden pro Jahr.

Der Hilfsenergiebedarf für den Solarkreislauf beträgt:

$$q_{g,HE,sol} = 126 \frac{kWh}{a} = 0,57 \frac{kWh}{m^2 a}$$

5.4.2.2 Pumpe Heizkreis

Für den Heizkreis wird die Hocheffizienzpumpe Grundfos Typ ALPHA Pro 25-40 eingesetzt; die Leistungsaufnahme beträgt je nach Betriebspunkt der Druckdifferenzregelung 5-25 W. Die Laufzeit der Pumpe beträgt bei 185-tägiger Heizperiode mit 16 Stunden Laufzeit pro Tag maximal 2.960 Stunden.

Der Hilfsenergiebedarf für den Heizkreislauf beträgt:

$$q_{H,d,HE} = 74\frac{kWh}{a} = 0,33\frac{kWh}{m^2a}$$

5.4.2.3 Pumpe Nachheizung

Da der Kessel ein Naturzugkessel ist, wird nur die Hilfsenergie der Pumpe erfasst. Wegen der geringen Betriebsdauer wird hier eine „normale“, ungeregelte Heizungspumpe (Grundfos UPS25-40) eingesetzt.

Der Hilfsenergiebedarf für die Nachheizung beträgt:

$$q_{H,s,HE} = 9,0\frac{kWh}{a} = 0,04\frac{kWh}{m^2 \bullet a}$$

5.4.2.4 Sonstiger Hilfsstrombedarf

Für den Hilfsstrombedarf von Stellantrieben und Steuerungen gibt es in der DIN 4701-10 keinen vorgegebenen Berechnungsgang, da in der Regel der Bedarf sehr gering ist und nicht separat erfasst werden muss. Setzt man allerdings diesen Hilfsstrombedarf in Relation zu dem anderen sehr niedrigen Stromverbrauch im Sonnenhaus, macht er doch einen nicht zu vernachlässigen Anteil aus.

Der Hilfsstrombedarf für die Stellantriebe beträgt:

$$q_{HE,Stellantriebe} = 44,4\frac{kWh}{a} = 0,20\frac{kWh}{m^2a}$$

Strombedarf für den Standby-Strom der Steuerung (überschlägig):

Der Hilfsstrombedarf für die Steuerung beträgt:

$$q_{HE,Steuerung} = 43,8\frac{kWh}{a} = 0,19\frac{kWh}{m^2a}$$

Der Strombedarf für den Heizungsmischer und das Solar-Umschaltventil (5 Watt während der Stellzeit) ist so gering, dass er vernachlässigt werden kann.

5.4.3 Ergebnisse

Die Summe der Hilfsenergie ergibt somit:

$q_{H,gesamt} =$ 1,33 $\frac{kWh}{m^2 \bullet a}$ Hilfsenergiebedarf gesamt (• Nutzfläche 225,6 m² = 300 $\frac{kWh}{a}$)

Multipliziert mit dem Primärenergiefaktor 2,7 für Strom ergibt sich ein Primärenergiebedarf für die Hilfsenergie von **810** $\frac{kWh}{a}$, als spezifischer Primärenergiebedarf **3,6** $\frac{kWh}{m^2 \bullet a}$.

5.5 Rechenergebnisse im Überblick, Endenergie, Primärenergie

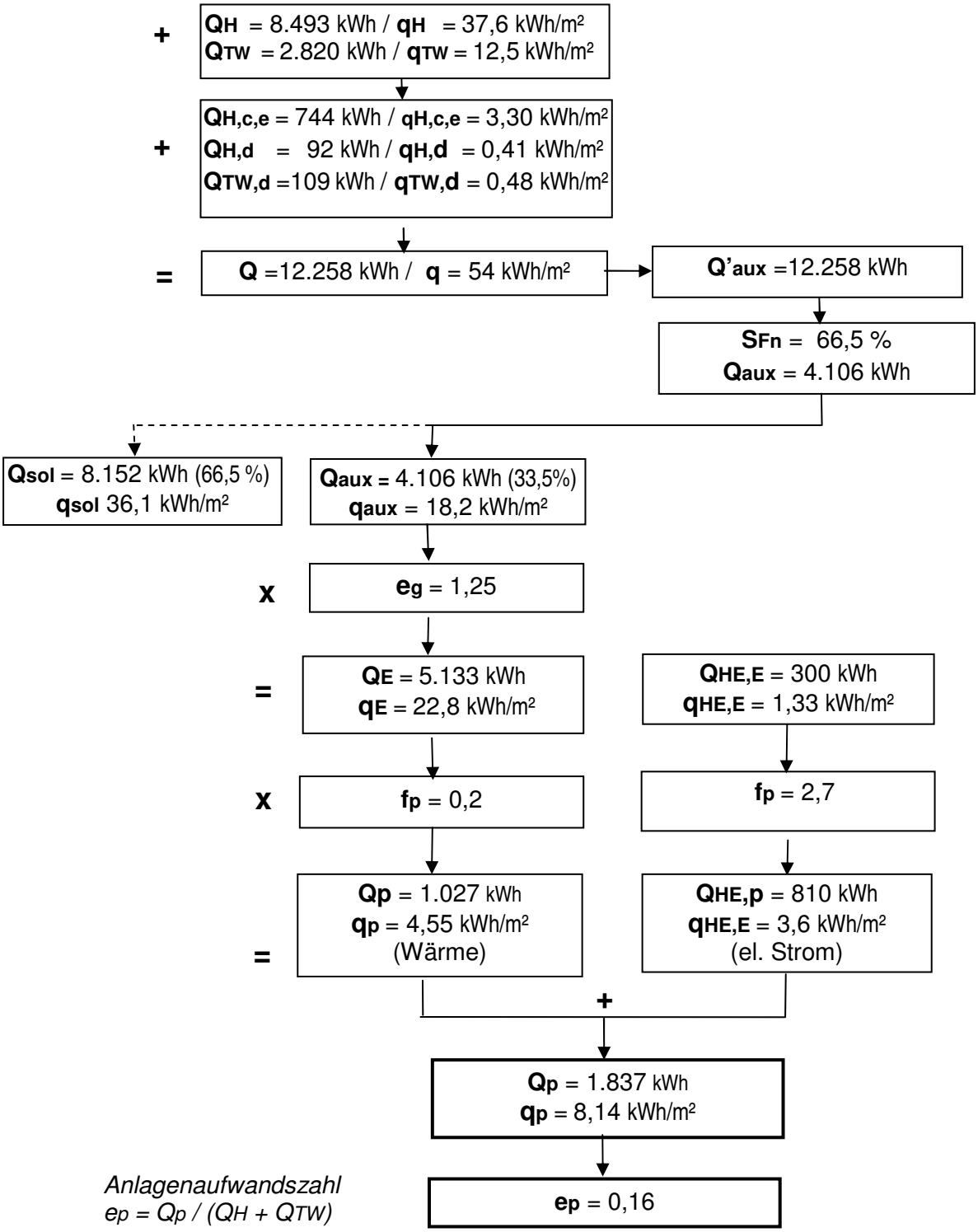


Abbildung 29: Endenergie- und Primärenergiebedarf im Sonnenhaus

Der spezifische Primärenergiebedarf im Referenzgebäude Sonnenhaus beträgt $8{,}14 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \bullet \text{a}}$

5.6 Auswahl der Anlagentechnik

5.6.1 Kollektoren

Zur Gewinnung der Sonnenenergie werden die Hochleistungs-Flachkollektoren (HFK-S) der SunPro GmbH, einer Mitgliedsfirma des Sonnenhaus-Instituts eingesetzt. Zum Erreichen des Deckungsgrades werden 40 m² Kollektorfläche, das entspricht 37,70 m² Absorberfläche in einem Anstellwinkel von 65° benötigt. Als Ausgangssituation für die Kollektoren soll die Dachlänge des Gebäudes - mit 16 m, multipliziert mit einer Kollektorhöhe von 2,5 m - zum Erreichen der Fläche von 40 m² gelten. Die Gesamtfläche setzt sich aus vier Kollektoren zu 4 m Länge und 2,5 m Höhe zusammen; je zwei Kollektoren werden in Reihe angeschlossen, die zwei Felder parallel vom Solarkreislauf durchströmt. Die Rohrleitungen des Solarkreislaufs werden in Kupferrohr 28 x 1,5 ausgeführt.

In Polysun sind nur die Kollektorstandardmaße und -daten der geprüften Kollektoren hinterlegt, die Anzahl wurde hierbei auf die effektive Absorberfläche angeglichen.

5.6.2 Speicher

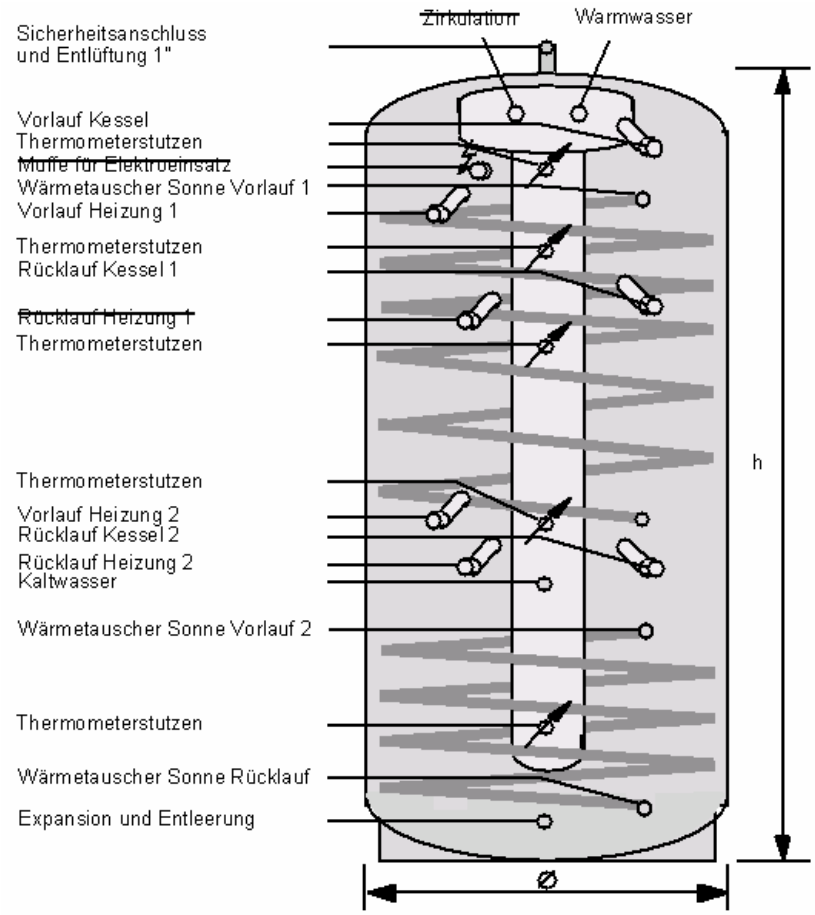


Abbildung 30: Aufbau und Anschlüsse Solarspeicher

Von der Firma Jenni wird ein Speicher mit einem Inhalt von 8,35 m³ und einer Standardhöhe von 4,82 m eingesetzt. Für den Speicher gilt ein Volumen von 150 - 200 m³ pro m² Kollektorfläche, dies wird somit erreicht. Der Durchmesser beträgt hierbei 1,5 m, dazu kommt eine Speicherdämmung von 0,25 m. Als Warmwasserboiler wurde für die Solarsimulation der Typ „Rossnagel“ eingesetzt, er hat einen Wasserinhalt von 285 l. Die Gesamthöhe des Boilers beträgt 4,28 m und ragt somit bis in den unteren Teil des Speichers, wo das kalte, nachströmende Wasser bereits vorerwärmt wird, bis es in den oberen Boilerschichten dann auf mindestens 45° erwärmt und dort zur Entnahme bereitgehalten wird. Ebenfalls integriert sind zwei Solarwärmetauscher aus nahtlosem Glattrohr mit 1“ Durchmesser. Der obere WT hat eine Länge von 48 m und eine Oberfläche von 5,1 m², der untere WT wird mit zwei parallelen Wendeln zu je 36 m und einer Gesamtoberfläche von 7,7 m² eingebaut, um eine große Oberfläche zu erhalten und das Einbringen der Solarenergie auf einer möglichst tiefen Ebene zu erreichen. So kann wiederum der Kollektor auf tiefem Temperaturniveau arbeiten, was seinen Wirkungsgrad deutlich erhöht. Die Stutzenabgänge werden in einem nach unten geneigten Winkel von 40° als so genannte Thermosiphonbremse angebracht um eine interne Rohrzirkulation und dadurch Wärmeverluste zu verhindern.

Für die Berechnungen wird eine Speicherdämmung von 0,25 m mit einem U-Wert von 0,04 W/m²K angenommen, was in der Praxis durch eine Holzkonstruktion, die mit Zellulose ausgeflockt wird erreicht wird.

5.6.3 Nachheizung

Die Nachheizung soll durch den in Kapitel 2.2.3.4 bereits beschriebenen Grundofeneinsatz „Vario-K“ der Firma Powall erfolgen. Der Stückholzofen besitzt laut Datenblatt eine Leistung von 30 kW, davon werden ca. 85 - 90 % von einem wasserseitigen Heizregister aufgenommen, welches über einen Pumpenkreislauf den Speicher nacherhitzt. Die restlichen 3 - 4,5 kW Leistung werden hauptsächlich über das Sichtfenster des Brennraums, aber auch über die restliche Oberfläche des Ofens an den Raum abgestrahlt. Für die Berechnungen wird mit einer wasserseitigen Leistung von 85 % ausgegangen. Der Volllastwirkungsgrad beträgt laut Hersteller 88 %.

Für die Ummauerung wird wärmespeicherndes Material (Schamotte oder Vollziegel) eingesetzt, so dass diese Strahlungswärme dosiert und zeitlich gestreckt an den Raum abgegeben wird. Dies wirkt einer Überheizung der Raumluft entgegen und die Nachwärme kann noch bis 10 Stunden nach Ausbrennen des Ofens genutzt werden. Da die Berechnungsmethode nach DIN 4701-10 diesen „Grundofeneffekt“, moderate Wärmeabgabe, nicht berücksichtigt, wird bei der Berechnung der Aufwandszahl von offener Bauweise bzw. von einem größeren Aufstellungsraum mit 80 m² ausgegangen.

6 Standardhaus nach EnEV

6.1.1 Berechnung nach EnEV

Für das Standardhaus wurden lediglich Pauschalwerte für die Hüllflächen eingegeben, damit die Anforderungen der EnEV erfüllt werden. Die EnEV setzt einige Werte fest, die nicht überschritten werden dürfen. Diese U-Werte werden für das Standardhaus übernommen und sind nachfolgend aufgelistet:

- Außenwand: 0,35 W/(m²K)
- Dach: 0,3 W/(m²K)
- Bodenplatte: 0,4 W/(m²K)
- Fensterflächen: 1,3 W/(m²K)

Somit wird der Transmissionswärmeverlust H'_T von 0,51 W/(m²K) erreicht, was genau dem zulässigen Wert nach EnEV 2007 entspricht und dem Anspruch dieser Arbeit, gerade die zulässigen Höchstwerte einzuhalten, gerecht wird.

Die Daten der Wärmegewinne und –verluste betragen pauschal nach EnEV für interne Wärmegewinne 5 W/m², für Wärmebrücken 0,1 W/m²K und für Lüftungsverluste $0{,}6h^{-1}$.

Auf eine Trinkwarmwasserzirkulation wird aufgrund der Vergleichbarkeit mit den beiden anderen Anlagenkonzepten ebenfalls verzichtet.

Energieträger für die Wärmeerzeugung mit einer Gas-Brennwerttherme ist Erdgas mit einem Primärenergiefaktor f_P von 1,1. Die Wärmeverteilung erfolgt über Radiatorenheizkörper mit VL- / RL-Temperaturen von 55 / 45°C. Leitungslängen wurden standardmäßig nach DIN 4701-10 eingegeben, Leitungsdämmung nach EnEV und der hydraulische Abgleich wird ebenfalls optimiert nach DIN 4701-10 festgelegt. Eine separate, leistungsgeregelte Umwälzpumpe soll 16 Stunden pro Tag, gemäß 8 Stunden Nachtabsenkung, den Heizkreis versorgen.

Im Anhang der Arbeit befindet sich ein detaillierter Report über weitere Eingaben für die Anlagentechnik des Gebäudes.

Alle weiteren relevanten Daten zum späteren Vergleich mit dem Passivhaus und dem Sonnenhaus sind in Abbildung 31 dargestellt.

Eingaben: A_N = 225,6 m² | t_{HP} = 185 Tage

	TRINKWASSER-ERWÄRMUNG			HEIZUNG		
absoluter Bedarf	Q_{tw} =	2820	kWh/a	Q_h =	15834	kWh/a
bezogener Bedarf	q_{tw} =	12,50	kWh/m²a	q_h =	70,18	kWh/m²a

Ergebnisse:

Deckung von q_h	$q_{h,TW}$ =	2,29	kWh/m²a	$q_{h,H}$ =	67,89	kWh/m²a
Σ WÄRME	$Q_{TW,E}$ =	4255	kWh/a	$Q_{H,E}$ =	15165	kWh/a
Σ HILFS-ENERGIE		57	kWh/a		383	kWh/a
Σ PRIMÄR-ENERGIE	$Q_{TW,P}$ =	4835	kWh/a	$Q_{H,P}$ =	17715	kWh/a

ENDENERGIE	Q_E =	19419	kWh/a	Σ WÄRME
		440	kWh/a	Σ HILFSENERGIE
PRIMÄRENERGIE	Q_P =	22550	kWh/a	Σ PRIMÄRENERGIE
	q_P =	99,95	kWh/m²a	
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	e_P =	1,21	[-]	

Abbildung 31: Darstellung des Energieverbrauchs im Standardhaus

Der Primärenergiebedarf im Standardhaus beträgt: $99{,}95 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \bullet \text{a}}$

Durch die Auswahl einer effizienten Anlagentechnik unterschreitet der Primärenergiebedarf sogar den geforderten Wert der EnEV von 116,14 kWh/m²a deutlich.

6.1.2 Auswahl des Gas-Brennwertgeräts

Zur Gebäudebeheizung wird aus dem Software-Katalog der Gas-Brennwertkessel WTC15-Kompakt-Power 13,7 kW der Firma Weisshaupt mit folgenden Kennwerten ausgewählt:

- Kessel-Nennwärmeleistung: 13,7 kW
- 100% Volllast-Wirkungsgrad: 97,7 % (108 % Wirkungsgrad bei 30 % Teillast)
- Bereitschafts-Wärmeverlust bei 70 °C Kesseltemperatur: 1,14 %
- Elektrische Leistungsaufnahme des Kessels: 198 W (60 W bei 30 %)
- Integr. Speicher für Warmwasser: 115 l Inhalt

7 Überschlägige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Zum vollständigen Vergleich soll auch der ökonomische Gesichtspunkt der beiden Varianten Passivhaus und Sonnenhaus untersucht werden.

In der Investition sind Passivhaus und Sonnenhaus aufgrund des höheren Dämmstandards und der aufwändigeren Anlagentechnik teurer als ein Standardhaus nach EneV. Aber aufgrund der Energieeinsparung sind die beiden Minimalenergiebausweisen auf längere Sicht möglicherweise doch wirtschaftlicher als das Standardhaus. Dies soll in diesem Kapitel beleuchtet werden.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung müssen zunächst einige Grundlagen festgelegt werden. Die Berechnung findet nach VDI 2067 Blatt 1 statt.

Der **Betrachtungszeitraum T** kann sehr flexibel gewählt werden, je nachdem auf was man die Betrachtung beziehen möchte. Da im Allgemeinen ein Gebäude innerhalb von **20 Jahren** abbezahlt werden kann, wird der Betrachtungszeitraum darauf bezogen.

Der **effektive Zinssatz q**, der für diesen Betrachtungszeitraum im Augenblick von der KfW-Förderbank für KfW40-Häuser und Passivhäuser gilt beträgt **3,24 %** bei einer Zinsbindung von 10 Jahren. Für normale marktübliche Kredite sind derzeit **4,5 %** effektiver Zins üblich, dieser gilt für das Standardhaus, das nicht nach KfW förderbar ist. Die derzeitige durchschnittliche **Preissteigerungsrate r** liegt bei ungefähr **2 %**.

Die VDI 2067 schlägt für die Wartungskosten 0,2 % und für die Instandhaltung 1 % der Investitionskosten vor. Da aber die Investitionskosten beim Passiv- und beim Sonnenhaus um einiges höher liegen als beim Standardhaus, sich aber diese Kosten alle im gleichen Rahmen bewegen, werden bei allen drei Gebäuden für Wartung und Instandhaltung der Wert des Standardhauses angesetzt.

Die Mehrkosten für das Passiv- und das Sonnenhaus wurden über das zusätzlich benötigte Dämmmaterial ermittelt. Für die Fensterflächen wurde ein Angebot eines Fensterbauers über die Fenstertypen und –flächen eingeholt Der Vergleich ergab, dass die Fenster des PH durchschnittlich 100 % und die des SH 20 % teurer sind als die des Standardgebäudes.

Unter „Sonstige Kosten“ werden Kaminfegerkosten aufgeführt. Dieser Betrag bezieht sich auf die derzeit gültigen Preise in Baden-Württemberg. Der SH Ofeneinsatz muss einmal jährlich gereinigt werden, eine Abgasmessung ist laut BImSCH-Verordnung nicht notwendig. Das Gas-Brennwertgerät wird jedes zweite Jahr vom Kaminfeger überprüft.

Preise der Brennstoffe:

- Strom, Normaltarif (NT), EnBW: 14,27 C t/ kWh + 2,05 Ct / kWh (Stromsteuer)
- Strom, Sondertarif (ST) Wärmepumpe (EnBW): 10,46 Ct / kWh + 2,05 Ct / kWh
- Holz: 2,55 Ct / kWh, (Buchenholz, 15 % Wasseranteil, 56 € / rm, 2200 kWh / rm)
- Gas (SWE): 5,05 Ct / kWh

Alle Preisangaben sind ohne Mehrwertsteuer.

7.1 Standardhaus

Tabelle 3: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Standardhaus

Investitionen	Gebäude (Mehrpreis)		- €
	Gasbrennwert-Gerät 14 kW + integr. TW-Speicher		3.500,00 €
	Abgasrohr		600,00 €
	Radiatorenheizung + Zubehör		9.000,00 €
Summe Ao			**13.100,00 €**
Barwerte	Gasbrennwert-Gerät 14 kW	$T_N = 15$	2.919,78 €
	Pumpe Heizung	$T_N = 10$	164,84 €
Restwerte	Radiatorenheizung+Abgasrohr	$T_N = 40$	- 1.990,00 €
	Gasbrennwert-Gerät 14 kW	$T_N = 15$	- 1.302,00 €
Summe	Kapitalgebundene Kosten		**12.892,62 €**
	Annuität	a = 0,07688	991,18 €
Instandhaltung	1 % der Anlagenkosten		131,00 €
	Kapitalgebundene Kosten		**1.122,18 €**
	Kosten Brennstoff: Gas	19.419 kWh/a	980,66 €
	Grundpreis Gasanschluss	15 €/Monat	180,00 €
	Kosten: Hilfsstrom	440 kWh/a	71,81 €
	Verbrauchsgebundene Kosten		**1.232,47 €**
Wartungskosten	0,2 % der Anlagenkosten		26,20 €
	Betriebsgebundene Kosten		**26,20 €**
Sonstige Kosten	Kaminkehrer		21,00 €
			21,00 €
	Jährliche Gesamtkosten		**2.401,85 €**

Die jährlichen Kosten für das Betreiben der Anlagentechnik kosten beim Standardhaus:

- Instandhaltung: 131,00 €
- Verbrauchsg. Kosten: 1232,47 €
- Betriebsgeb. Kosten: 26,20 €
- Sonstige Kosten: 21,00 €
- Wartungsvertrag (opt.) (130,00 €)

Summe	**1410,67 €**	**(1540,67€ mit Wartungsvertrag)**

7.2 Passivhaus

Tabelle 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Passivhaus

Investitionen	Gebäude (Mehrpreis für Fenster, Dämmung, EWÜ)		36.370,00 €
	Kollektoren + Zubehör		3.000,00 €
	Kompaktgerät		11.342,00 €
	Komponenten		2.200,00 €
	Lüftungsrohrnetz		2.300,00 €
	Nachheizung (elektr. Heizflächen)		800,00 €
	Installation Lüftung		2.300,00 €
	Förderungen Solaranlage		- 410,00 €
Summe Ao			**57.902,00 €**
Barwerte	Kompaktgerät	$T_N = 15$	7.887,65 €
	Pumpe Solar	$T_N = 10$	186,10 €
Restwerte	Kompaktgerät	$T_N = 15$	- 5.378,25 €
	Kollektoren	$T_N = 25$	- 317,10 €
	Lüftungsrohrnetz	$T_N = 40$	- 607,77 €
Summe	Kapitalgebundene Kosten (Standardhaus)		**59.672,63 €**
	Annuität	a = 0,06872	4.100,70 €
Instandhaltung	1 % der Anlagenkosten		131,00 €
	Kapitalgebundene Kosten		**4.231,70 €**
	Kosten Hilfsstrom (NT)	715,4 kWh/a	116,75 €
	Kosten Strom (Nachheizung direktelektr.)	618 kWh/a	100,86 €
	Kosten Wärmepumpenstrom (ST)	1.192 kWh/a	149,12 €
	Verbrauchsgebundene Kosten		**366,73 €**
Wartungskosten	0,2 % der Anlagenkosten (Standardhaus)		26,20 €
	Betriebsgebundene Kosten		**26,20 €**
	Jährliche Gesamtkosten		**4.624,63 €**

Die Differenz aus der Summe der Kapitalgebundenen Kosten von Standardhaus und Passivhaus beträgt 46.780 €. Die Summe der laufenden Kosten ergeben sich zu:

- Instandhaltung: 131,00 €
- Verbrauchsg. Kosten: 366,73 €
- Betriebsgeb. Kosten: 26,20 €

Summe 523,93 €

7.3 Sonnenhaus

Tabelle 5: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Sonnenhaus

Investitionen	Gebäude (Mehrpreis für Fenster, Dämmung, Kamin)		15.030,00 €
	Kamin		2.000,00 €
	Kollektoren + Verrohrung		10.000,00 €
	Speicher + Dämmung + Zubehör + Regelung		11.000,00 €
	Nachheizung + Ummauerung		8.800,00 €
	Flächenheizung		6.700,00 €
	Förderungen Solaranlage		- 8.400,00 €
Summe Ao			**45.130,00 €**
Barwerte	Pumpe Heizung	$T_N = 10$	186,10 €
	Pumpe Solar	$T_N = 10$	188,39 €
Restwerte	Kollektoren	$T_N = 25$	- 1.056,99 €
	Speicher	$T_N = 40$	- 2.906,72 €
	Nachheizung	$T_N = 40$	- 2.325,37 €
	Flächenheizung	$T_N = 40$	- 1.770,45 €
Summe	Kapitalgebundene Kosten		**37.444,96 €**
	Annuität	a = 0,06872	2.573,22 €
Instandhaltung	1 % der Anlagenkosten (Standardhaus)		131,00 €
	Kapitalgebundene Kosten		**2.704,22 €**
	Kosten Brennstoff	5.133 kWh/a	138,59 €
	Kosten Hilfsstrom	300kWh/a	48,96 €
	Verbrauchsgebundene Kosten		**187,55 €**
Sonstige Kosten	Kaminkehrer		15,86 €
			15,86 €
Wartungskosten	0,2 % der Anlagenkosten (Standardhaus)		26,20 €
	Betriebsgebundene Kosten		**26,20 €**
	Jährliche Gesamtkosten		**2.933,83 €**

Die Differenz aus der Summe der Kapitalgebundenen Kosten von Standardhaus und Sonnenhaus beträgt 24.552,34 €. Die Summe der laufenden Kosten ergeben sich zu:

- Instandhaltung: 131,00 €
- Verbrauchsg. Kosten: 187,55 €
- Betriebsgeb. Kosten: 26,20 €
- Sonstige Kosten: 15,86 €

Summe	**360,61 €**

8 Vergleich und Auswertung der Ergebnisse

8.1 Ökologie

Der Schwerpunkt der vorangegangenen Ausarbeitungen liegt auf der Bestimmung des Energiebedarfes in den Erscheinungsformen als Nutzenergie, Endenergie und Primärenergie. Die Ergebnisse werden in diesem Kapitel gesammelt, verglichen und bewertet.

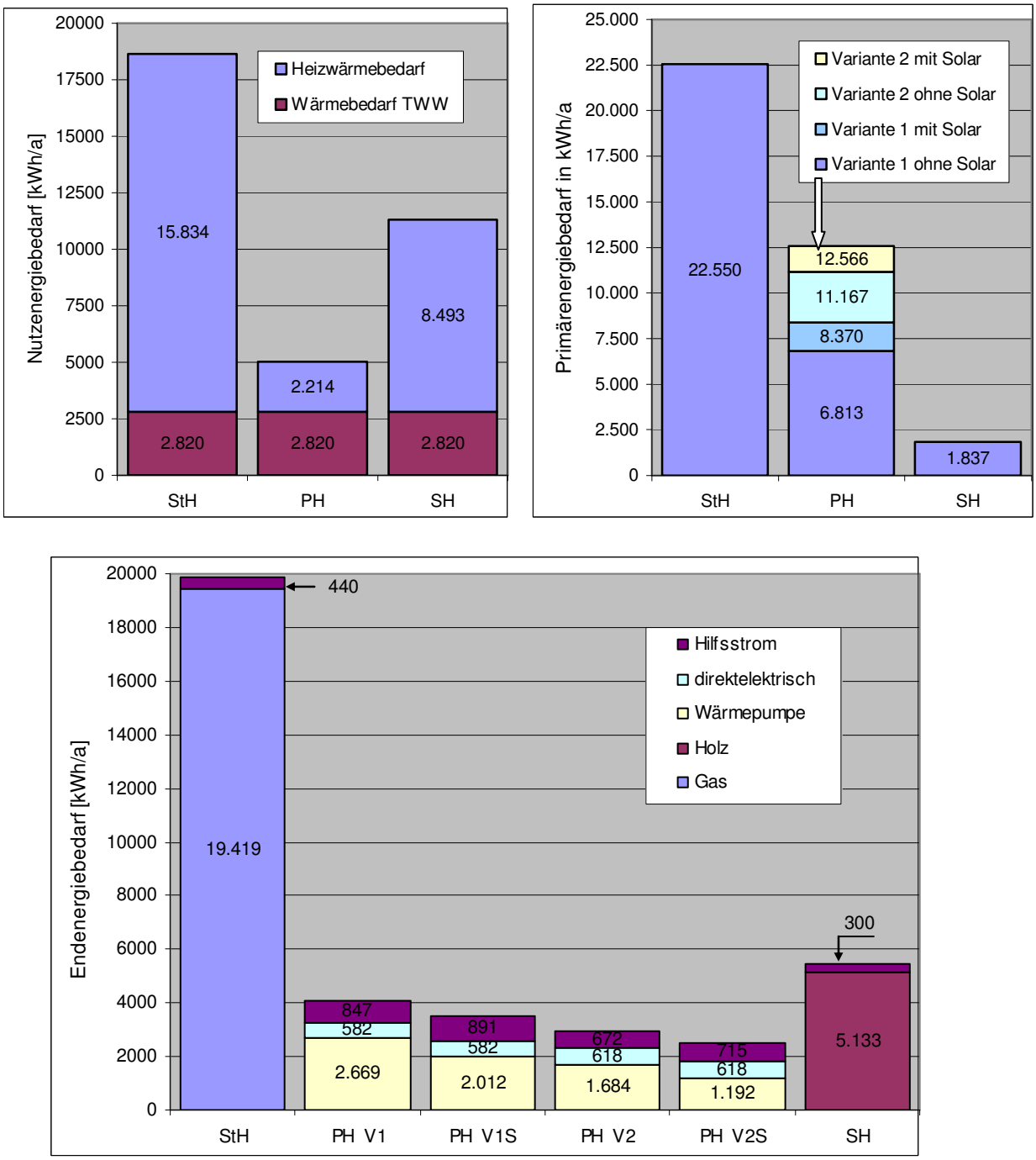


Abbildung 32: Nutz-, End- und Primärenergiebedarf im Vergleich

In Abbildung 32 sind die Ergebnisse des Nutzenergiebedarfs, des Endenergiebedarfs und des Primärenergiebedarfs graphisch gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass bei dem Passiv- und dem Sonnenhaus gegenüber einem Standardhaus deutlich weniger Energie benötigt wird. Sehr auffällig ist dabei, dass der Nutzenergiebedarf des Sonnenhauses (mit Mindestdämmstandard) mehr als doppelt so hoch als der des Passivhauses ist, der Primärenergiebedarf des Sonnenhauses aber sogar im Vergleich zur besten Variante des Passivhauses (mit Brauchwasser-Solaranlage) nur etwa ein Viertel beträgt. Der Ansatz des Passivhaus-Konzepts, den Heizwärmebedarf eines Gebäudes zu minimieren hat demnach (beim Einsatz eines Klimakompaktgeräts) nur in erster Instanz, beim Nutzenergiebedarf, ein ausgezeichnetes Ergebnis.

Der spezifische Primärenergiebedarf stellt sich folgendermaßen dar, dabei wird beim Passivhaus das Einsparpotential an Primärenergie durch die Solarenergienutzung deutlich:

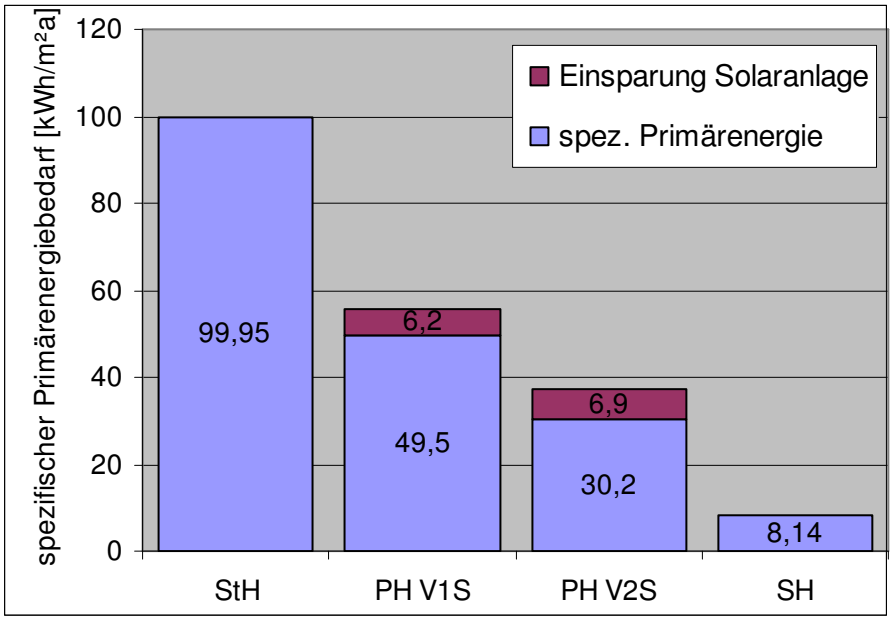


Abbildung 33: Flächenspezifischer Primärenergiebedarf

Der aber mindestens so wichtige Aspekt - auf der Suche nach der umweltverträglichsten und zukunftsträchtigsten Lösung - bei der Energieeinsparung und –bereitstellung in der Gebäudetechnik, ist die Auswahl der Energieträger. Zwar wurde im Zuge der Überarbeitung der Energieeinsparverordnung für Strom der Primärenergiefaktor um 10 % von 3,0 auf 2,7 verbessert, trotzdem ist die Bereitstellung von Strom nach wie vor der Energieträger, der mit dem größten Aufwand erzeugt werden muss und mit den höchsten Verlusten behaftet ist. Das bedeutet, dass aus primärenergetischer Sicht im Umgang mit Strom am sparsamsten umzugehen ist. An dieser Stelle soll aber noch einmal angemerkt werden, dass auch Passivhäuser grundsätzlich regenerativ beheizt werden können, die Variante mit Kompaktgerät also nur eine von mehreren Möglichkeiten darstellt.

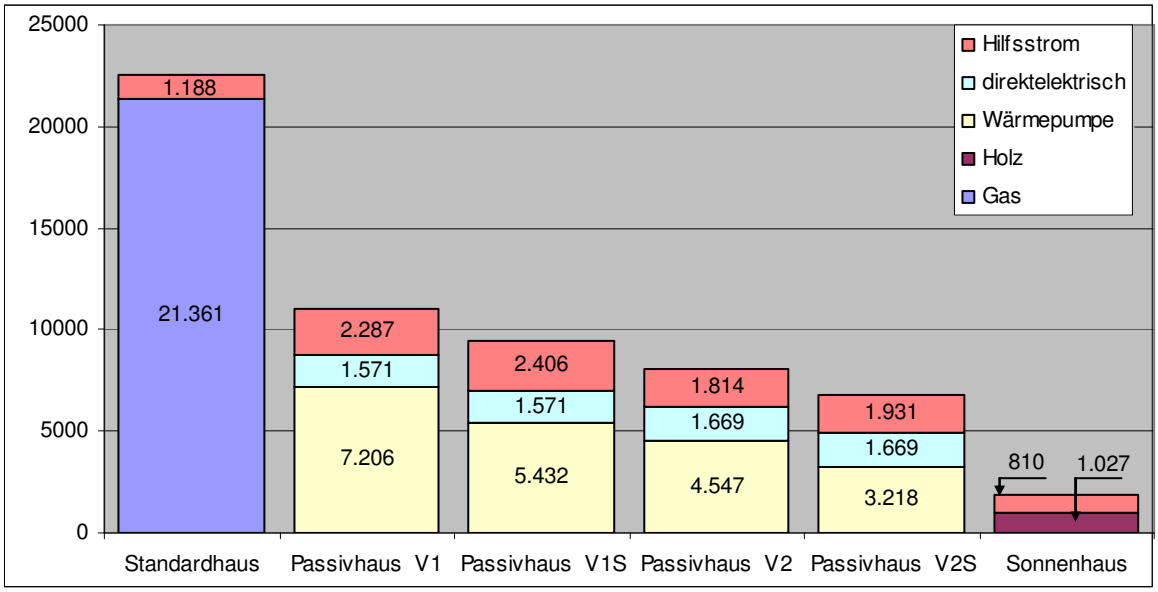


Abbildung 34: Primärenergiebedarf nach eingesetzten Energieträgern in kWh/a

Beim Sonnenhaus ist der Stromverbrauch minimiert und aufgrund der hohen solaren Deckung und Nachheizung auf Biomassebasis der ökologische Aspekt trotz höherem Nutz- und – je nach Passivhausvariante – auch höherem Endenergiebedarf optimiert.

8.1.1 Passivhaus

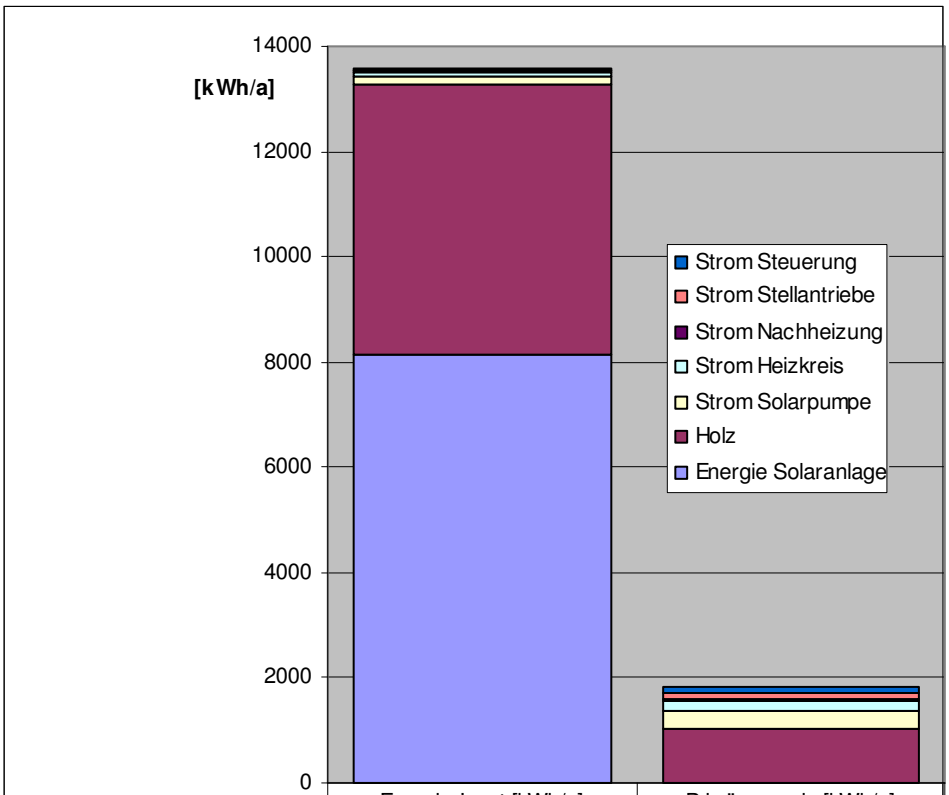
In Abbildung 34 ist zu erkennen, wie sich die Primärenergiebilanzen zusammensetzen. Trotz des minimalen Heizenergiebedarfs ist der Stromverbrauch relativ hoch. Genau dies ist der Nachteil beim Passivhaus. Es wird zwar wenig Nutzenergie benötigt, diese Menge wird aber direkt und indirekt (Antriebsstrom der Wärmepumpe) elektrisch bezogen. Zwar wird derzeit in der Presse die Wärmepumpe als Produzent erneuerbarer Energie proklamiert, was aber dann, und auch nur eingeschränkt richtig ist, wenn die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe größer als 2,7 ist. Beim Einsatz für die Trinkwassererwärmung arbeitet das System aber aufgrund des hohen Temperaturhubes auf einem schlechten Wirkungsgradniveau und wird sogar taktend von einem Elektroheizstab ergänzt. Ebenfalls negativ wirkt sich der im Passivhaus benötigte Heizwärmebedarf auf die Effizienz der Wärmebereitstellung aus. Das bedeutet, dass das Stromverbrauchsprofil sehr schwankt. Im Sommer wird hauptsächlich der Hilfsstrom für die Lüftungsanlage nötig und die Solarpumpe betrieben. Im Winter, wenn im gesamten Stromnetz die höchste Last auftritt und auch die ältesten Kraftwerke mit dem höchsten Schadstoffausstoß und den schlechtesten Wirkungsgraden ans Netz gehen, muss die Wärmepumpe aufgrund niedriger Außentemperaturen mit relativ schlechten Leistungszahlen arbeiten und wird hierbei durch den E-Heizstab ergänzt. In der Referenzanlage wurden zusätzlich elektrische Heizflächen notwendig, was das Stromverbrauchsprofil weiter verschlechtert. Aber auch wasserführende Systeme, die di-

rekt ans Kompaktgerät gekoppelt sind beziehen ihre Wärmebereitstellung von der Wärmepumpe und dem E-Heiz und sind dadurch ökologisch nicht sinnvoller.

Insgesamt ist die Lösung des Passivhauskonzepts mit Klimakompaktgerät kritisch zu sehen. Der Heizwärmebedarf ist zwar sehr gering, bei der Wärmeerzeugung wird aber auf den falschen Energieträger gesetzt, was bei einem flächendeckendem Einsatz von Wärmepumpen zu einer Aufstockung des Kraftwerkparks im Winter, aber zu geringer Auslastung der Kraftwerke im Sommer führen würde, was damit auch den Strom langfristig verteuert.

8.1.2 Sonnenhaus

Durch den konsequenten Einsatz von regenerativen Energiequellen, wie Solarenergie und Biomasse gelingt es dem Sonnenhauskonzept trotz höherem Energiebereitstellungsbedarf eine ausgezeichnete Primärenergiebilanz aufzuweisen. Folgende Abbildung zeigt, wie sich beim Sonnenhaus End- und Primärenergiebedarf zusammensetzen:



	Energie-Input [kWh/a]	Primärenergie [kWh/a]
Strom Steuerung	43,8	118
Strom Stellantriebe	44,4	120
Strom Nachheizung	9	24
Strom Heizkreis	74	200
Strom Solarpumpe	129	348
Holz	5133	1027
Energie Solaranlage	8156	0

Abbildung 35: Aufteilung des Energie-Inputs und des Primärenergiebedarfes im SH

Holz als Brennstoff für die Nachheizung ist aber genauso begrenzt wie andere Energieträger und muss also ebenso effizient und sparsam eingesetzt werden wie andere Energien. Die erzeugte Energie muss punktuell dann eingesetzt werden, wenn wirklich ein Bedarf besteht. Dies wird beim Sonnenhaus umgesetzt, das Referenzgebäude wird über das Jahr mit ca. 2,3 Raummeter Holz (Buche, 2200 kWh/rm) beheizt.

Der Strombedarf ist ebenfalls effektiv minimiert, insbesondere durch den Einsatz von Hocheffizienzpumpen. Interessant in diesem Zusammenhang ist der Vergleich einer thermischen Solaranlage mit einer Wärmepumpe: Mit einer Kilowattstunde (Pumpen-)Strom kann die Solaranlage etwa 150 kWh Wärme erzeugen, die Wärmepumpe nur 2 bis maximal 4 Kilowattstunden. Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass der – sehr geringe - Stromverbrauch relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt bezogen wird und somit keine Spitzenlasten provoziert.

8.2 Ökonomie

8.2.1 Passivhaus

Der finanzielle Mehraufwand für die Gebäudekosten beim Referenzgebäude Passivhaus, gegenüber dem Standardhaus, sind mit 46.780 € beträchtlich. Jedoch kann bei den Kosten für die Wärmeerzeugung einiges eingespart werden. Beim Standardhaus fallen als laufende Kosten zum Betreiben der Anlage, also Brennstoff-, Reinigungs- Wartungskosten in Höhe von 1.410,67 € an (exkl. Wartungsvertrag, da optional). Beim Passivhaus belaufen sich diese Kosten auf 523,93 €, was eine jährliche Einsparung von 886,84 € ausmacht.

Der Hauptfaktor für die laufenden Kosten beim Passivhaus sind die Stromkosten zum Betrieb der Anlage. Da in letzter Zeit eine stetige Erhöhung der Strompreise zu verzeichnen war und in Anbetracht der nationalen und internationalen CO_2-Diskussion (Sanierung alte Kraftwerke, Bau neuer Kraftwerke), mit dem Ausstieg aus der („günstigen“) Atom-Stromerzeugung, dem Anstieg der Stromabnahme und der Notwendigkeit die Nachfrage mit ausreichend Angebot zu decken, ist eine weitere kontinuierliche Verteuerung wahrscheinlich. Geht man von einem weiteren Anstieg der Stromkosten von 7-10 % jährlich aus, wie es in jüngster Vergangenheit der Fall war, so steigen auch die laufenden Kosten stetig an.

Die Aussage des Passivhaus-Institutes, dass sich ein Passivhaus innerhalb von wenigen Jahren durch die Energiekosten-Einsparung amortisieren würde, stimmt offensichtlich nicht. Teilt man die Mehrkosten für das Gebäude und die Anlagentechnik durch die Einsparung, erhält man eine Amortisationszeit von ungefähr 53 Jahren. Dabei ist die Preissteigerung für den Stromverbrauch nicht berücksichtigt.

Die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, insbesondere von Strom ist kritisch zu betrachten, da die Preispolitik in Deutschland hauptsächlich von vier großen Stromanbietern betrieben wird und nahezu willkürlich erhöht werden kann.

8.2.2 Sonnenhaus

Bei einem Mehrpreis von 24.552 € für das Referenzgebäude Sonnenhaus und jährlich laufenden Kosten von 360,61 € scheint die Rechnung einer finanziellen Amortisation eher gegeben. Die Einsparung der laufenden Kosten gegenüber dem Standardhaus belaufen sich auf 1.050,60 € und ergibt so eine statische Amortisationszeit von gut 23 Jahren. Berücksichtigt man nun eine sehr optimistische Preissteigerung für Erdgas von 5 % jährlich, bei Strom 7 % und bei Holz 3 %, verbessert sich die diese Amortisationszeit auf 18 Jahre. Bei pessimistischerer Betrachtung der Preissteigerung von 10% für Erdgas und Strom und 5 % für Holz kann die Amortisation um weitere 2 Jahre verkürzt werden. Eine zuverlässige Prognose für die Entwicklung der Rohstoffkosten ist nicht zu treffen, die hier angenommenen Preissteigerungen können sich durchaus noch wesentlich drastischer entwickeln.

Bei einem sehr sparsamen Einsatz von Energie in Form von Holz und Strom wie dies beim Sonnenhaus der Fall ist, ist eine langfristige Versorgungssicherheit mit den nötigen Rohstoffen gewährleistet. Zwar werden auch die Preise für Brennholz steigen, aber eine große Auswirkung auf die laufenden Kosten ist hierbei nur bedingt zu spüren. So würden die derzeitigen Kosten für das Holz, binnen 20 Jahre von ca. 139 €/a (r_{Holz} = 5 %) auf ca. 350 €/a steigen. Die Darstellung der Stromkosten ist hierbei weitaus dramatischer mit ca. 49 € heute (r_{Strom} = 10 %) auf 298 € in 20 Jahren.

Ein weiterer Faktor, den es zu berücksichtigen gilt, ist der in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zugrunde gelegte Fördersatz für Kollektoren und die vergünstigte Kreditvergabe für KFW40-Bauweise. Erst vor kurzem wurde der Fördersatz für Kollektoren von 105 € auf 210 € verdoppelt. Dies zeigt, dass die Investitionskosten stark von äußeren Fördermitteln abhängig sind und diese können sich kurzfristig positiv oder negativ ändern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass wer die anfänglichen Mehrkosten nicht scheut, sich mit dem Sonnenhaus für eine sehr gute Alternative entscheidet und dies mit der geringsten Wahrscheinlichkeit auf stark steigende Nebenkosten und höchster Versorgungssicherheit.

8.2.3 Allgemein

Ein weiterer Vorteil, den Passivhaus und Sonnenhaus gemeinsam haben, stellt der Mehrwert des Gebäudes dar. In Zukunft werden die Anforderungen an Neubauten stetig wachsen und wer heute schon in innovative Konzepte investiert, hat später nicht das nachsehen, wenn die sich ständig verbessernden Standards nachgerüstet werden müssen.

Das Standardhaus hat insofern einen Vorteil, da durch die geringere Dämmung und kompakte Anlagentechnik weniger Flächenverlust anfällt und somit mehr Wohnfläche (ca. 15 m²) zur Verfügung steht. Dies wirkt sich bei den spezifischen Kosten (Gesamtgebäudekosten / Wohnfläche) pro Quadratmeter Wohnfläche positiv für das Standardgebäude aus.

8.3 Komfort

8.3.1 Passivhaus

Der Vorteil im Passivhaus mit überwiegender oder vollständiger Beheizung über die Zuluft ist die schnelle Reaktionsmöglichkeit auf äußere Lastwechsel. So kann zum Beispiel im Winter oder in Übergangsjahreszeiten wenn die Sonne durchbricht schnell kühlere Luft in die Räume eingebracht und somit die Überheizung verhindert werden [21]. Das Selbe gilt für elektrische Heizflächen, da die Speicherfähigkeit sehr gering ist, wird nur noch eine geringe Menge Abwärme abgestrahlt.

Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass die Frischluftzufuhr konstant gedeckt ist, so dass ein Fensterlüften eigentlich nicht mehr notwendig ist. Die in die Räume eingebrachte Zuluft wird über Filter gereinigt, so wird die Luft auch frei von Pollen gehalten. Problematisch sind dabei aber teilweise die Hygiene und die Schadstoffbelastung durch den Erdwärmeübertrager. So können sich im EWÜ-Rohr Schimmelpilze bilden, wenn das Rohr nicht ideal verlegt ist (z.B. bei Setzung des Erdreichs), oder bei radonbelastetem Erdreich dieser Schadstoff in die Zuluft gelangen.

Negativ ist beim Passivhaus, dass wenn vom Nutzer über die Fenster gelüftet wird der Heizwärmebedarf stark ansteigt und nicht mehr von der Wärmepumpe abgedeckt werden kann. Dieser zusätzliche Lüftungswärmeverlust wird dann direktelektrisch über die Zuluft oder elektrische Heizflächen kompensiert, was unter anderem die ökologische Bilanz verschlechtert. Dies bedeutet auch ein starker Eingriff in die Nutzerfreundlichkeit, bzw. macht sich bei Nichtbeachten finanziell über die Stromrechnung bemerkbar. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Raumtemperaturen nicht unabhängig voneinander regelbar sind. Dies kann nur geschehen, wenn die Zulufttemperatur niedriger als 20 °C in den Raum eingebracht wird und die gewünschte Raumtemperatur über zusätzliche Heizflächen erreicht werden kann. Werden Raumtemperaturen über 20 °C gewünscht, zum Beispiel im Badezimmer hat dies direkt beträchtliche Auswirkungen auf den Primärenergiebedarf.

8.3.2 Sonnenhaus

Vorteilhaft ist die für jeden Raum separate Temperaturregelung, die eine Teilbeheizung von Schlafräumen und wahlweise auch höhere Temperaturen als 20°C in Aufenthaltsräumen zulässt, ohne einen einflussreichen Anstieg der Brennstoffkosten.

Die Strahlungswärme über die Flächenheizung bewirkt eine hohe Behaglichkeit. Die Raumluft wird nicht wie bei Radiatorenheizung umgewälzt, sondern verteilt sich gleichmäßig und ohne Staubaufwirbelung.

Beim Sonnenhaus besteht die Gefahr der Raumtemperaturüberhitzung beim Nachheizen des Speichers über den Kachelofeneinsatz. Dieser Überhitzung kann aber durch eine offene Bauweise und über Fensterlüftung entgegengewirkt werden. Im Allgemeinen wird aber aufgrund der Ummauerung des Ofeneinsatzes die Abwärme sehr dosiert über mehrere Stunden abstrahlt und vom Nutzer eher als angenehm empfunden.

Da das Sonnenhaus ebenfalls einen hohen Dämmstandard aufweist, ist eine konsequente Lüftung zur Frischluftzufuhr erforderlich. Für das Schlafzimmer eignen sich einstellbare Spaltluftbeschläge, ansonsten sollte regelmäßig stoßgelüftet werden. Durch Anbringen von Hygrometern lässt sich die Luftfeuchte, die bei etwa 40 – 60 % liegen sollte, verfolgen und dementsprechend manuell lüften.

Prinzipiell kann auch eine Lüftungsanlage eingesetzt werden. In nachfolgender Abbildung wird ersichtlich, dass sich der Primärenergiebedarf dadurch nur geringfügig ändert.

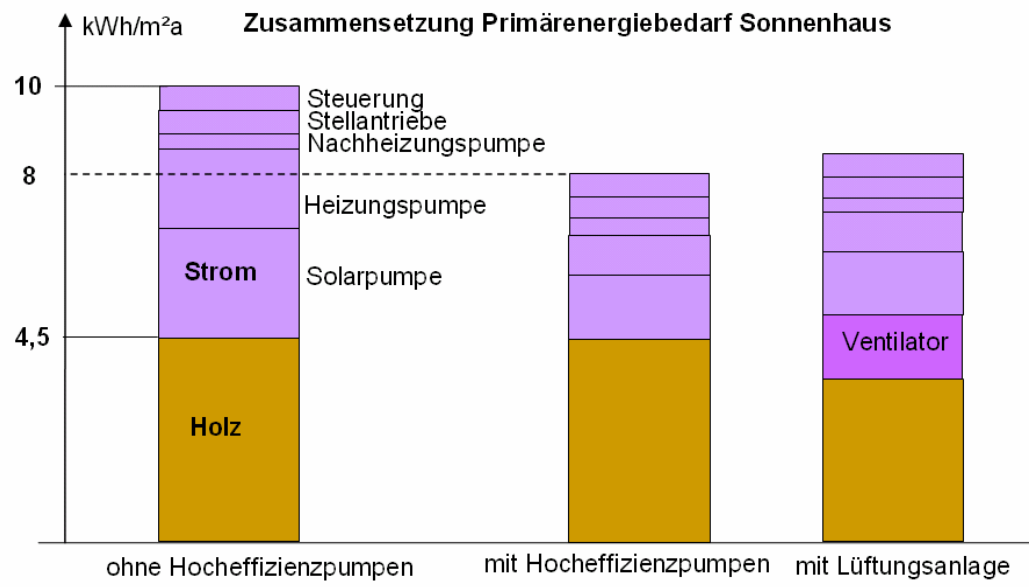


Abbildung 36: Primärenergiebedarf im SH bei Einsatz einer Lüftungsanlage

Insgesamt ist im Referenzgebäude Sonnenhaus ein aktiveres Nutzerverhalten erforderlich, da sowohl die Lüftung, als auch die Nachheizung manuell erfolgen müssen. Durch diese aktive Nachheizung wird aber auch ein sparsamerer Umgang mit der Energie gelernt und so teilweise sogar noch weniger Brennstoff benötigt als berechnet.

8.4 Weitere Aspekte

8.4.1 CO_2-Bilanz

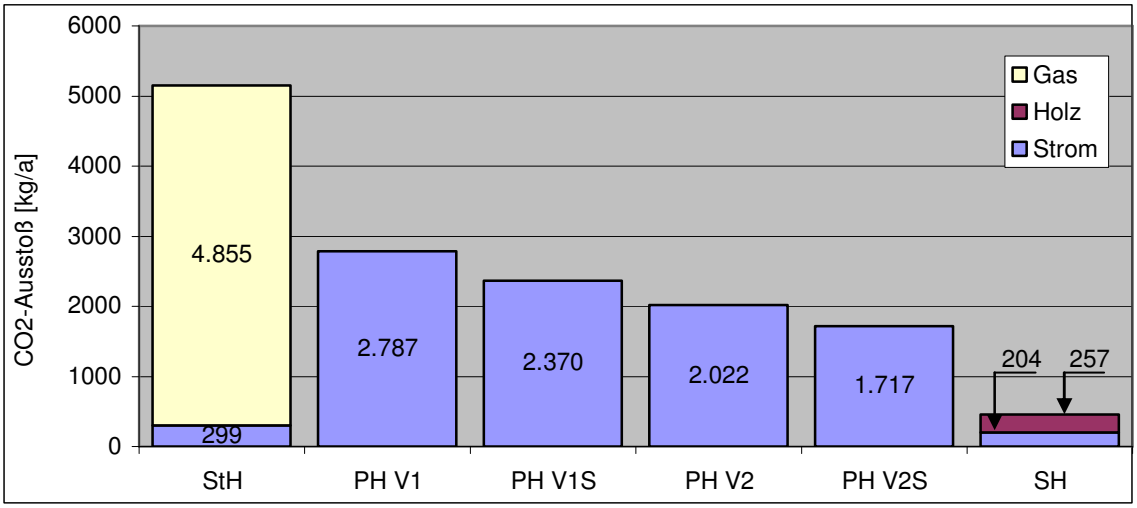


Abbildung 37: CO_2-Bilanz bezogen auf den Endenergieverbrauch

In obiger Abbildung sind die jährlichen CO_2-Ausstöße der einzelnen Varianten dargestellt. Die Werte für den CO_2-Ausstoß der einzelnen Energieträger stammen vom Öko-Institut Freiburg (GEMIS Datenbank) mit 0,68 kg_{CO_2}/kWh_{End} für Strom-Mix, 0,25 kg_{CO_2}/kWh_{End} für Erdgas und 0,05 $kg_{CO_2}/kWh_{Endenergie}$ für Holz.

Auch hier ist zu erkennen, dass beim Passivhaus und beim Sonnenhaus wesentlich weniger CO_2 freigesetzt wird als beim Standardhaus und auch hier hat das Sonnenhaus wieder eine weitaus bessere Bilanz als das Passivhaus.

8.4.2 Graue Energie

Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Faktor spielt die „Graue Energie“, die bei der Herstellung der Gebäudebaustoffe und der Anlagentechnik anfällt. Auch die Ersatzbeschaffungen für Anlagenkomponenten und die Recyclebarkeit der Anlagentechnik, sowie der Baumaterialen spielen bei einer vollständigen, ökologischen Betrachtung eine wichtige Rolle. Ein Vorurteil, das zumindest für Solarenergienutzung nicht zutrifft, ist deren energetische Amortisation. Die eingesetzte Energie zur Herstellung dieser Anlage wird innerhalb weniger Jahre durch die Einsparung fossiler Energie wieder erwirtschaftet. Die energetische Amortisationszeit beim Passivhaus dauert aufgrund des höheren elektrischen Stromverbrauchs zumindest länger. Eine Untersuchung hinsichtlich dieser Primär-Energetischen-Amortisationszeit (PEA) für Passivhaus und Sonnenhaus, unter Einbeziehung der Ökobilanz der Baustoffe inklusive Materialaufwand für die Anlagentechnik, wäre ein weiterer interessanter Aspekt für diesen Vergleich, übersteigt aber den Rahmen dieser Arbeit. Beim

Passivhaus wäre hier der Mehraufwand an Dämmstoffmaterial (Primärenergieinhalt je nach verwendetem Dämmstoff) zu erwähnen, beim Sonnenhaus der Primärenergieaufwand zur Herstellung von Kollektor und Speicher.

8.4.3 Primärenergiefaktor Strom

Um die Ökobilanz für die verschiedenen Varianten des Referenzgebäudes weiter zu verbessern, besteht die Möglichkeit Strom aus erneuerbaren Energiequellen zu nutzen. Der Primärenergiefaktor für Öko-Strom liegt bei 0,7. Damit würde sich der Primärenergiekennwert folgendermaßen darstellen:

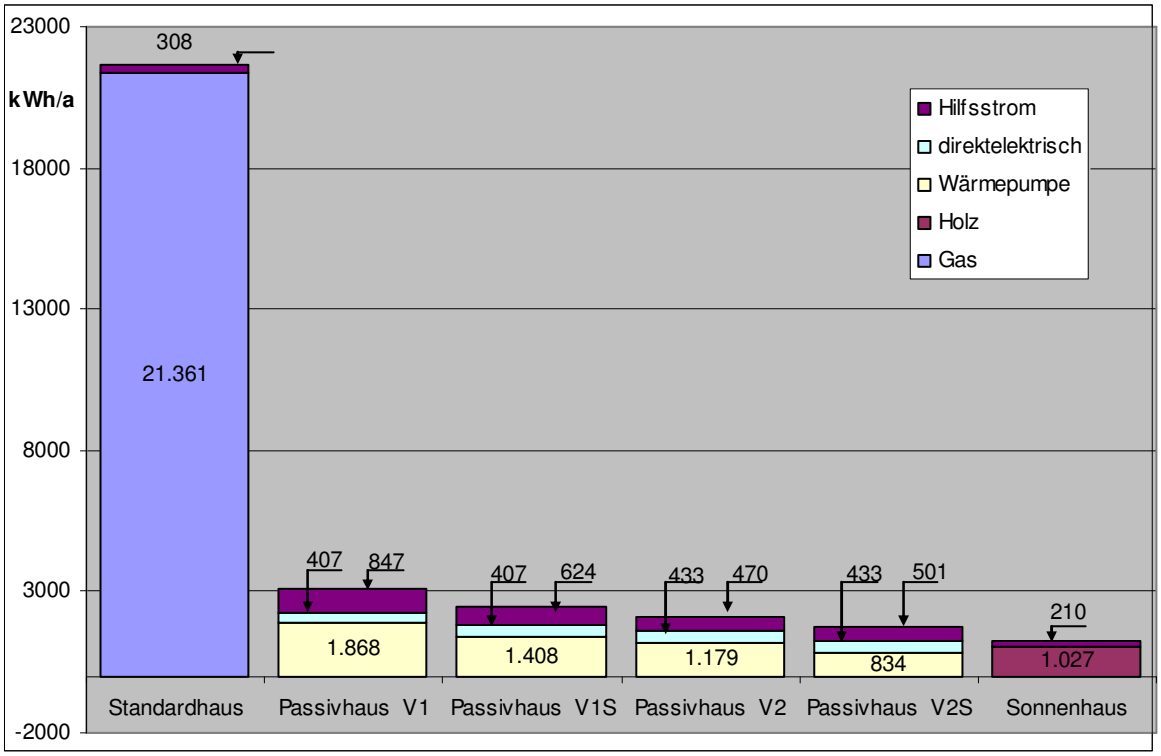


Abbildung 38: PE-Bedarf bei der Nutzung von Strom aus erneuerbarer Energie

Allerdings ist „Öko-Strom“ wesentlich teurer als der Stromtarif für Strom-Mix. Auch ein gesonderter Tarif für Wärmepumpen wird hierbei nicht angeboten. Der derzeitige Tarif für „Öko-Strom“, der von der EnBW angeboten wird, liegt bei 17,45 Ct/kWh + 2,05 Ct/kWh Stromsteuer.

Die Stromkosten würden somit beim Passivhaus Variante 2 mit Solaranlage bei dem Endenergiebedarf von 2.525 kWh/a auf 492,38 € steigen, also Mehrkosten von 125,72 € verursachen. Beim Sonnenhaus belaufen sich die Mehrkosten lediglich auf 9,54 €.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der derzeitigen Lage auf dem globalen Energiemarkt wird ein Umdenken in Richtung Energieeinsparung immer wichtiger. Die Ressourcen der fossilen Energieträger sind begrenzt und müssen so sparsam wie möglich eingesetzt werden. Da, wo es bereits heute möglich ist auf regenerative Energien umzusteigen, sollte dies konsequent umgesetzt werden. Im Sektor Wohnungsbau ist hierfür ein immenses Potential gegeben. Aber auch hierbei ist zu prüfen, welche Konzepte wirklich hilfreich sind und wo nur ein mäßiger Beitrag zum Umweltschutz geleistet wird. Aktuell werden vom Passivhaus-Institut und vom Sonnenhaus-Institut umsetzbare Konzepte der Minimalenergiebauweise für Wohngebäude angeboten. Der Ansatz dieser Arbeit ist, diese beiden Bauweisen zu analysieren und zu vergleichen. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse dient ein gewöhnliches Gebäude, welches die aktuellen Standards und Vorschriften an Wohngebäude erfüllt.

Das Ergebnis ist beeindruckend: Beide Varianten bieten eine deutliche Verbesserung gegenüber der Standardbauweise. Jedoch geht als klarer „Testsieger“ das Sonnenhaus heraus, welches sowohl mit der Energiebilanz, als auch aus wirtschaftlicher Sicht das Passivhaus - im wahrsten Sinne des Wortes - in den Schatten stellt.

Erstaunlich ist aber, dass sich das Passivhaus auf dem Markt bereits gut etabliert hat, das Sonnenhaus hingegen noch relativ unbekannt ist. Grund dafür könnte sein, dass sich Industrie und Energieversorger stärker für das Passivhau-Konzept interessieren und einsetzen. Die Anlagentechnik ist bereits standardisiert und kann in Masse produziert werden, Energieversorger können unter dem Deckmantel des „umweltfreundlichen“ Einsatzes der Energie (Wärmepumpe nutzt min. 1/3 Strom und 2/3 Umweltenergie) trotzdem auf wachsende Kundschaft setzen. Die Komponenten des Sonnenhauses hingegen werden derzeit noch nicht von den Marktführern der Heizungstechnik produziert und sind somit noch eher als Nischenprodukte zu sehen. Auch auf die Unterstützung der Energieversorger für ein weitgehend auf Autarkie ausgerichtetes Heizkonzept kann ohnehin nicht gesetzt werden, da der Bedarf an elektrischem Strom absolut minimiert ist.

Im Grunde wäre ein konstruktiver Dialog von Fachleuten gefragt, der bei den unterschiedlichen Herangehensweisen an die Entwicklung eines Minimalenergie-Baukkonzepts Gemeinsamkeiten auslotet und abseits irreführender und oft falsch verwendeter Begriffe eine gemeinsame Strategie entwickelt. Viele Projekt-Beispiele aus der jüngeren Zeit beweisen, dass der Ansatz für einen niedrigst möglichen Heizwärmebedarf beim Passivhaus und der durch Einsatz regenerativer Energiequellen minimale Primärenergiebdarf beim Sonnenhaus zwei Seiten der gleichen Medaille sind, also nicht im Widerspruch zueinander stehen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein guter Dämmstandard und der Einsatz von Solarenergie und Biomasse eine gute Basis für die effiziente Einsparung an End- und Primärenergie darstellen. Eine Annäherung der beiden Konzepte von Passivhaus und Sonnenhaus in Bezug auf Dämmstandard (Passivhaus) und Anlagentechnik (Sonnenhaus) ist dabei durchaus sinnvoll und kann zu einer weiteren Verbesserung der Gesamtenergiebilanz führen. Bei weiterem Anstieg der Preise fossiler Brennstoffe wird sich auch die Wirtschaftlichkeit verbessern und die Kombination beider Konzepte wahrscheinlich machen.

Diese Ausarbeitung soll auch als Entscheidungshilfe für Endkunden dienen, die sich auf dem Weg zum Eigenheim für einen effektiven Beitrag zum Umweltschutz einsetzen und dabei auf eine langlebige und finanziell wirtschaftliche Gebäudetechnik verlassen wollen.

Anhang A: Berechnungen Passivhaus

A.1 Berechnungen U-Werte

1	Außenwand

Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] innen R_{si}: 0,13
außen R_{sa}: 0,04

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	Innenputz	0,250			15
2.	Hochlochziegel	0,400			175
3.	EPS	0,035			300
4.	Außenputz	0,700			20

Flächenanteil Teilfläche 2:
Summe: 51,0 cm

U-Wert: 0,108 W/(m²K)

2	Dach

Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] innen R_{si}: 0,10
außen R_{sa}: 0,04

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	GK-Platte	0,250			15
2.	Sparschalung	0,180			20
3.	Dämmung	0,035	Kantholz	0,180	80
4.	OSB-Beplankung	0,130			18
5.	Dämmung	0,035	Leimbinder	0,130	300
6.	Holzweichfaserplatte	0,180			35

Flächenanteil Teilfläche 2: 10,0%
Summe: 46,8 cm

U-Wert: 0,109 W/(m²K)

3	Bodenplatte
Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] innen R_{si}: 0,17

außen R_{sa}:

	Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite Dicke [mm]
1.	Estrich	1,400			35
2.	Polyethylenfolie	0,020			0
3.	Beton nach EN 12524	2,000			150
4.	Dämmstoff	0,035			250
5.	Kiesschicht	0,190			100

Flächenanteil Teilfläche 2 | Summe 53,5 cm

U-Wert: 0,126 W/(m²K)

Klima:	Würzburg								
Ausrichtung der Fensterfläche	Global-strahlung (Haupt-richtungen)	Verschat-tung	Vergla-sungs-anteil	g-Wert	Abminderungs-faktor solare Einstrahlung	Fenster-Fläche	Fenster-U-Wert	Vergla-sungs-Fläche	mittlere Global-strahlung
maximal:	kWh/(m²a)	0,75				m²	W/(m²K)	m²	kWh/(m²a)
Nord	137	0,87	0,662	0,52	0,46	2,00	0,73	1,3	137
Ost	214	0,86	0,725	0,52	0,50	6,86	0,69	5,0	214
Süd	366	0,81	0,772	0,52	0,50	33,66	0,66	26,0	366
West	224	0,86	0,731	0,52	0,51	5,44	0,69	4,0	224
Horizontal	331	0,75	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	331
Summe bzw. Mittelwert über alle Fenster				0,52	0,50	47,96	0,67	36,3	

A.2 Prüfwerte der Kompaktgeräte

Messwerte aus der Laborprüfung, Vitotres 343:

Messwerte aus der Laborprüfung

Lüftung

Effektiver Wärmebereitstellungsgrad	η_{eff} *(Prüfstandsmessung)*	85%	
Stromeffizienz	*(Prüfstandsmessung)*	0,57	Wh/m³

Prüfpunkte eingeben; nach T_{aus} aufsteigend sortiert)

Heizung

		Prüfpunkt 1	Prüfpunkt 2	
Außenlufttemperatur	T_{aus}	1,5	10,3	°C
Messwerte Thermische Leistung Wärmepumpe Heizung	$P_{WP,Heiz}$	0,98	1,21	kW
Messwerte Arbeitszahl Heizung	COP_{Heiz}	1,61	1,58	-

Prüfpunkte eingeben; nach T_{aus} aufsteigend sortiert;

Warmwasser

		Prüfpunkt 1	Prüfpunkt 2	
Außenlufttemperatur	T_{aus}	1,6	10,2	°C
Messwerte thermische Leistung Warmwasser Speicheraufheizung	$P_{WW,Aufheiz}$	1,31	1,97	kW
Messwerte thermische Leistung Warmwasser Spiechernachladung	$P_{WW,Nachlad.}$	1,20	1,81	kW
Messwerte Arbeitszahl Warmwasser Speicheraufheizung	$COP_{WW,Aufheiz}$	1,85	2,66	-
Messwerte Arbeitszahl Warmwasser Speichernachladung	$COP_{WW,Nachlad.}$	1,55	2,28	-

Bereitschaft (Eintrag nur notwendig, wenn von Speichernachladung verschieden)

		Prüfpunkt 1	Prüfpunkt 2	
Außenlufttemperatur	T_{aus}	1,6	10,2	°C
Messwerte thermische Leistung Wärmepumpe Bereitschaft	$P_{wp,Bereit}$	1,20	1,81	kW
Messwert Arbeitszahl Bereitschaft	COP_{Bereit}	1,55	2,28	-

Spezifische Wärmeverluste Speicher inkl. Anschlüsse	$U * A_{Speicher}$ *(Prüfstandsmessung)*	2,90	W/K
Mittlere Speichertemperatur im Bereitschaftsbetrieb	$T_{WW,Bereit}$ *(Prüfstandsmessung)*	45,0	°C

Vorrangschaltung der Wärmepumpe (zutreffendes bitte ankreuzen) Warmwasservorrang: x Heizungsvorrang:

Volumenstrom der Fortluftbeimischung (falls vorh.)	V_{ZUL} *(Prüfstandsmessung)*	100	m³/h

Messwerte aus der Laborprüfung, Aerex BW 175

Messwerte aus der Laborprüfung

Lüftung

Effektiver Wärmebereitstellungsgrad	η_{eff}	*(Prüfstandsmessung)*	81%	
Stromeffizienz		*(Prüfstandsmessung)*	0,50	Wh/m³

(Mindestens 2 maximal 4 Prüfpunkte eingeben; nach T_{aus} aufsteigend sortiert)

Heizung

		Prüfpunkt 1	*Prüfpunkt 2*	*Prüfpunkt 3*	
Außenlufttemperatur	T_{aus}	-3,1	4,0	10,1	°C
Messwerte Thermische Leistung Wärmepumpe Heizung	$P_{WP,Heiz}$	1,19	1,35	1,46	kW
Messwerte Arbeitszahl Heizung	COP_{Heiz}	3,13	3,29	3,36	-

(Mindestens 2 maximal 4 Prüfpunkte eingeben; nach T_{aus} aufsteigend sortiert;

Warmwasser

		Prüfpunkt 1	*Prüfpunkt 2*	*Prüfpunkt 3*	
Außenlufttemperatur	T_{aus}	7,0	20,0		°C
Messwerte thermische Leistung Warmwasser Speicheraufheizung	$P_{WW,Aufheiz}$	1,15	1,23		kW
Messwerte thermische Leistung Warmwasser Spiechernachladung	$P_{WW,Nachlad.}$	1,14	1,30		kW
Messwerte Arbeitszahl Warmwasser Speicheraufheizung	$COP_{WW,Aufheiz}$	3,00	3,11		-
Messwerte Arbeitszahl Warmwasser Speichernachladung	$COP_{WW,Nachlad.}$	3,08	3,42		-

Bereitschaft (Eintrag nur notwendig, wenn von Speichernachladung verschieden)

		Prüfpunkt 1	*Prüfpunkt 2*	*Prüfpunkt 3*	
Außenlufttemperatur	T_{aus}	7,0	20,0		°C
Messwerte thermische Leistung Wärmepumpe Bereitschaft	$P_{wp,Bereit}$	1,14	1,30		kW
Messwert Arbeitszahl Bereitschaft	COP_{Bereit}	3,08	3,42		-

Spezifische Wärmeverluste Speicher inkl. Anschlüsse	$U * A_{Speicher}$	*(Prüfstandsmessung)*	1,90	W/K
Mittlere Speichertemperatur im Bereitschaftsbetrieb	$T_{WW,Bereit}$	*(Prüfstandsmessung)*	47,0	°C

Vorrangschaltung der Wärmepumpe (zutreffendes bitte ankreuzen) Warmwasservorrang [ ] Heizungsvorrang [x]

Volumenstrom der Fortluftbeimischung (falls vorh.)	V_{zul}	*(Prüfstandsmessung)*	0	m³/h

A.3 Weitere Berechnungen

Infiltrationsluftwechsel:

			für Jahresbedarf:	für Heizlastfall:				
Windschutzkoeffizient e			0,07	0,18				
Windschutzkoeffizient f			15	15	Netto Luftvolumen für Drucktest	V_{n50}	Luftdurchlässigkeit	q_{50}
Luftwechsel bei Drucktest	n_{50}	1/h	0,60	0,60	536	m³	0,64	m³/(hm²)

Art der Lüftungsanlage

			für Jahresbedarf:	für Heizlastfall:
x	Balancierte Passivhauslüftung	*bitte ankreuzen*		
	Reine Abluft			
	Abluftüberschuss	1/h	0,00	0,00
	Infiltrationsluftwechsel	$n_{L,Res}$ 1/h	**0,062**	**0,154**

Effektiver Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

x	Gerät innerhalb der thermischen Hülle				
	Gerät außerhalb der thermischen Hülle				
	Wärmebereitstellungsgrad Gerät	η_{WRG}		0,81	Kompaktgerät ausgew. im Blatt Kompakt
	Leitwert Außenluftkanal	Ψ	W/(mK)	0,111	Berechnung siehe Nebenrechnung
	Länge des Außenluftkanals		m	1	
	Leitwert Fortluftkanal	Ψ	W/(mK)	0,124	Berechnung siehe Nebenrechnung
	Länge des Fortluftkanals		m	1	
	Temperatur des Aufstellraumes (nur eintragen falls Gerät außerhalb der thermischen Hülle)		°C	20	

Innenraumtemperatur (°C)	20
mittl. Außentemp. Heizp. (°C)	3,7
mittl. Erdreichtemp. (°C)	10,1

Effektiver Wärmebereitstellungsgrad $\eta_{WRG,eff}$ **80,6%**

Effektiver Wärmebereitstellungsgrad Erdreichwärmeübertrager

Wirkungsgrad Erdreichwärmeübertrager	$\eta^*_{EWÜ}$	80%
Wärmebereitstellungsgrad EWÜ	$\eta_{EWÜ}$	31%

Solaranlage Variante 2:

S O L A R E W A R M W A S S E R B E R E I T U N G

Objekt:	DA Passivhaus	Gebäudetyp/Nutzung:	Einfamilienhaus
Standort:	Würzburg	Energiebezugsfläche A_{EB}:	146,0 m²

Solarer Deckungsgrad mit Wärmebedarf WW incl. WW-Bedarf Wasch&Spül

WW-Wärmebedarf	q_{gWW}	3553	kWh/a	aus Blatt WW+Verteil	
Geogr. Breite		49,8	°	aus Blatt Klimadaten	
Auswahl Kollektor aus Liste (s.u.):		6	Auswahl:	6 Standard-Flachkollektor	
Kollektorfläche		4,00	m²		
Abweichung zur Nordrichtung		180	°		
Neigung gegen die Horizontale		35	°		
Höhe des Kollektorfelds			m		
Höhe des Horizonts	h_{Horl}		m		
Horizontentfernung	a_{Horl}		m		
zusätzlicher Abminderungsfaktor Verschattung	r_{so}		%		

Personenbelegung	4,0	Personen
spezifische Kollektorfläche	1,0	m²/Pers

geschätzter solarer Deckungsbeitrag an WW-Bereitung	**46%**			
Solarer Wärmebeitrag zur Nutzwärme	**1625**	kWh/a	**11**	kWh/(m²a)

Erfassung des Hilfsstroms Variante 2:

HILFSSTROM

Objekt: DA Passivhaus

1 Wohnfläche	146	m²	
2 Heizzeit	205	d	
3 Luftvolumen	365	m³	
4 Wohnungen	1	HH	
5 Umbaut. Volumen	705	m³	

Laufzeit LA im Winter	4,91	kh/a
Laufzeit LA im Sommer	3,85	kh/a
Luftwechselrate	0,40	h⁻¹
Enteisung WT ab		°C

Primärenergiefaktor-Strom	2,7	kWh/kWh
Heizwärmebedarf	15	kWh/(m²a)
Nenn-Wärmeleistung des Kessels	15	kW
Wärmebedarf TW-Erwärmungsanlage	3553	kWh/a
Auslg. Vorlauftemperatur	0	°C

Spalte Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Anwendung	vorhanden (1/0)	in warmeleitenden Hülle (1/0)	Normbedarf	Nutzungsfaktor	Betriebsdauer	Bezugsgröße	Strombedarf (kWh/a)	Verfügbarkeit als interne Wärme	genutzt in Zeitraum (kh/a)	interne Wärmequelle (W)	Primärenergie-bedarf (kWh/a)
Lüftungsanlage											
Lüftung im Winter	1	1	0,50 W/m³	* 0,40 h⁻¹	* 4,9 kh/a	* 365 m³	= 356	im Wärmebereitstellungsgrad enthalten			961
Lüftung im Sommer	1	1	0,50 W/m³	* 0,40 h⁻¹	* 3,9 kh/a	* 365 m³	= 279	kein Sommerbeitrag zu inneren WQ			754
Enteisung WT	0	0	0 W	* 1,00	* 0,2 kh/a	* 1	= 0	* 1,0	/ 4,91	= 0	0
Heizungsanlage											
Eingabewert Nennleistungsaufnahme d. Pumpe			W	1 (geregelt/ungeregelt (1/0))							
Umwälzpumpe	0	1	25 W	* 0,8	* 4,9 kh/a	* 1	= 0	* 1,0	/ 4,91	= 0	0
el. Leistungsaufnahme des Kessels bei 30% Last			W								
Hilfsenergie Kessel Heiz.	0	0	55 W	* 1,00	* 0,00 kh/a	* 1	= 0	* 1,0	/ 4,91	= 0	0
Trinkwarmwasser-Anlage											
Eingabewert mittl. Leistungsaufnahme d. Pumpe			W								
Zirkulationspumpe	0	0	29 W	* 1,00	* 4,9 kh/a	* 1	= 0	* 0,6	/ 8,76	= 0	0
Eingabewert Nennleistungsaufnahme d. Pumpe			W								
Speicherladepumpe WW	1	1	57 W	* 1,00	* 0,0 kh/a	* 1	= 0	* 1,0	/ 4,91	= 0	0
el. Leistungsaufnahme des Kessels bei 100% Last			W								
Hilfsenergie Kessel WW	0	0	165 W	* 1,00	* 0,0 kh/a	* 1	= 0	* 1,0	/ 4,91	= 0	0
Eingabewert Nennleistungsaufnahme d. Solarpumpe			W								
Hilfsstrom solar	1	1	25 W	* 1,00	* 1,8 kh/a	* 1	= 44	* 0,6	/ 8,76	= 118	118
Hilfsstrom sonst											
Hilfsstrom sonst	1	1	30 kWh/a	* 1,00	* 1,0	* 1 HH	= 30	* 1,0	/ 8,76	= 3	81
Summe							709			7	1914
Kennwert kWh/(m²a)				durch Wohnfläche dividieren:			4,9				13,1

Ergebnisse Kompaktgerät:

Innenraumtemperatur (°C)	20		
mittl. Außentemp. Heizp. (°C)	4		
mittl. Erdreichtemp. (°C)	10		
Wirkungsgrad EWÜ Fortluftbeimischung (falls vorh.)	$\eta^*_{EWÜ}$	80%	
Wärmebereitstellungsgrad EWÜ Fortluftbeimischung (falls vorh.)	$\eta_{EWÜ,Zul}$ (Auslegungswert)	31%	
Volumenstrom der Fortluftbeimischung (falls vorh.)	V_{Zul} (Prüfstandsmessung)	0	m³/h
Wärmelieferung direktelektrisch	$Q_{E,dir}$	618	kWh/a
Wärmelieferung WP Heizung	$Q_{WP,Heiz}$	1483	kWh/a
Wärmelieferung WP Warmwasser Winter	$Q_{WP,WW,Winter}$	900	kWh/a
Wärmelieferung WP Bereitschaft Winter	$Q_{WP,Bereit,Winter}$	114	kWh/a
Wärmelieferung WP Warmwasser Sommer	$Q_{WP,WW,Sommer}$	1028	kWh/a
Wärmelieferung WP Bereitschaft Sommer	$Q_{WP,Bereit,Sommer}$	336	kWh/a
Aufwandszahl Wärmeerzeuger WW & Heizung		44%	
Jahresarbeitszahl	**JAZ**	2,2	
Endenergiebedarf der Wärmebereitstellung	Q_{End}	1810	kWh/a
jährlicher Primärenergiebedarf		4888	kWh/(m²a)
jährliche Emission CO_2-Äquivalent		1231	kg/a
		8,4	kg/(m²a)

Interne Wärmequellen:

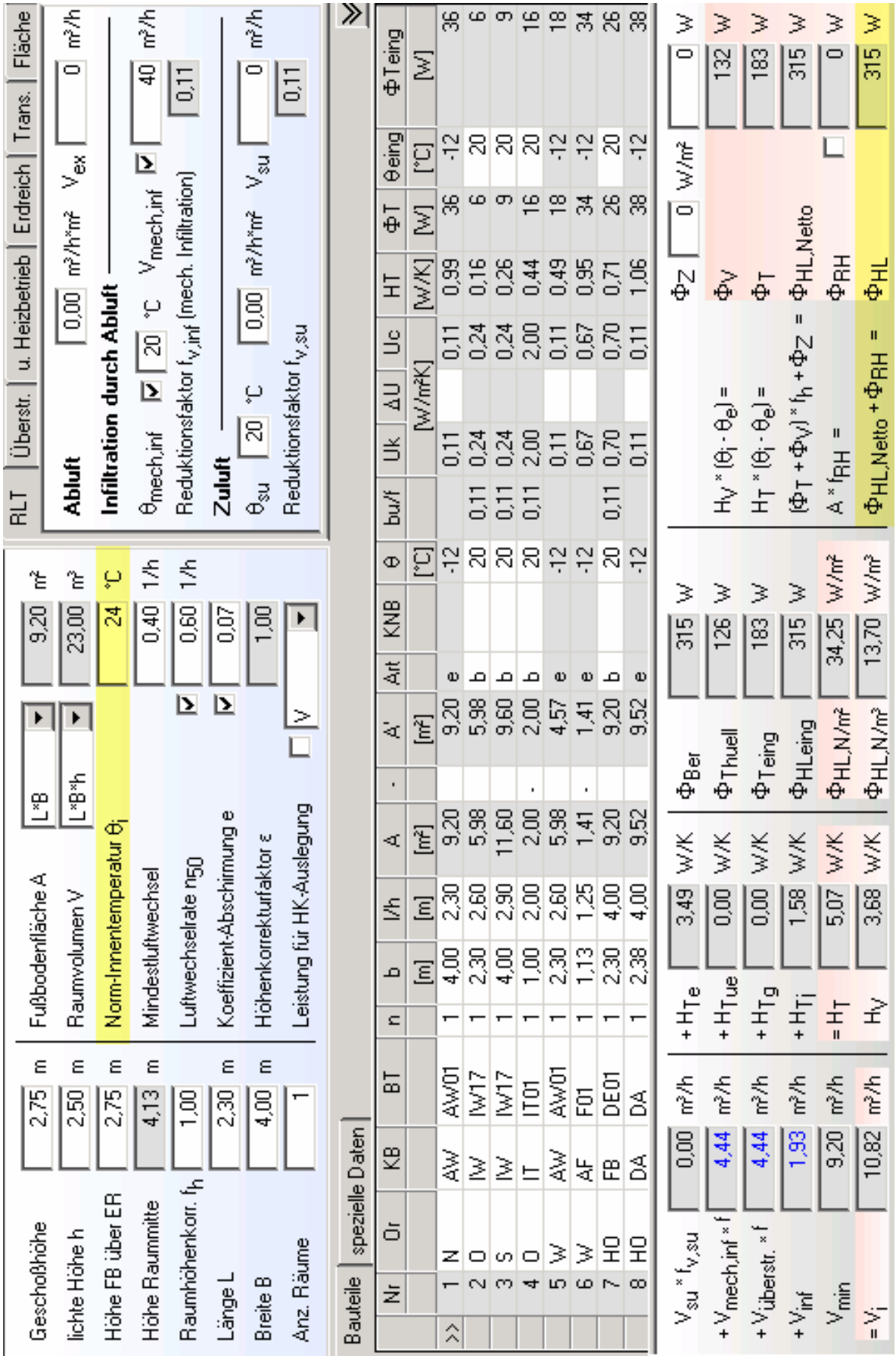
Nutzung: Wohnen | 2,10 W/m²

Art der verwendeten Werte: Standard | kein Eintrag erforderlich | W/m²

Berechnung interne Wärme Haushalte

Spalte Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Anwendung	vorhanden (1/0) bzw. Anzahl Personen	in der thermischen Hülle (1/0)	Normverbrauch	Nutzungsfaktor	Häufigkeit	Nutzenergie (kWh/a)	Bei Elektroboiler mitgerechnet?	Verfügbarkeit	genutzt in Zeitraum (h/a)	interne Wärmequelle (W)
	Personen / Wohnfläche		4,0 / 146 m²	P		Heizwärmebedarf / Heizzeit	15 / 205	kWh/(m²a) / d/a		
Geschirrspülen	1	1	1,2 kWh/Anw.	1,00	65 1/(P*a)	312		0,30	8,76	11
Waschen	1	1	1,1 kWh/Anw.	1,00	57 1/(P*a)	251		0,30	8,76	9
Trocknen mit:	1	1	3,5 kWh/Anw.	0,88	57 1/(P*a)	698		0,70	8,76	56
Kondensationstrockner		1	0,0			0		0,80		
Energieverbr. durch Verdunstung	0	1	-3,1 kWh/Anw.	0,60	57 1/(P*a)	0	(1- 0) *	0,00	8,76	0
Kühlen	1	1	0,8 kWh/d	1,00	365 d/a	285		1,00	8,76	33
Gefrieren	1	1	0,9 kWh/d	1,00	365 d/a	321		1,00	8,76	37
oder Kombination	0	1	1,0 kWh/d	1,00	365 d/a	0		1,00	8,76	0
Kochen	1	1	0,2 kWh/Anw.	1,00	500 1/(P*a)	400		0,50	8,76	23
Beleuchtung	1	1	11,0 W	1,00	2,9 kWh/(P*a)	128		1,00	8,76	15
Elektronik	1	1	80,0 W	1,00	0,55 kWh/(P*a)	176		1,00	8,76	20
Kleingeräte/sonstiges	1	1	50,0 kWh	1,00	1,0 1/(P*a)	200		1,00	8,76	23
Hilfsgeräte (s. Blatt Hilfsstrom)										7
Sonstige Einrichtungen (s. Bl. Strom)	0	0,0	80,0 W/P	1,00	8,76 kh/a	0			8,76	0
Personen	4	1	-5,0 W/P	1,00	8,76 kh/a	2803		0,55	8,76	176
Kaltwasser	4	1	-25,0 W/P	1,00	8,76 kh/a	-876		1,00	8,76	-20
Verdunstung	4	1		1,00	8,76 kh/a					-100
Summe									W	287
Kennwert									W/m²	1,97
Wärmeangebot aus internen Quellen							205 d/a		kWh/(m²a)	9,7

Raumheizlast Bad im Passivhaus:



Geschoßhöhe	2,75 m	Fußbodenfläche A	L*B	9,20 m²
lichte Höhe h	2,50 m	Raumvolumen V	L*B*h	23,00 m³
Höhe FB über ER	2,75 m	Norm-Innentemperatur θ_i		24 °C
Höhe Raummitte	4,13 m	Mindestluftwechsel		0,40 1/h
Raumhöhenkorr. f_h	1,00	Luftwechselrate n_{50}		0,60 1/h
Länge L	2,30 m	Koeffizient-Abschirmung e		0,07
Breite B	4,00 m	Höhenkorrekturfaktor ε		1,00
Anz. Räume	1	Leistung für HK-Auslegung	V	

RLT | Überstr. | u. Heizbetrieb | Erdreich | Trans. | Fläche

Abluft 0,00 m³/h*m² V_{ex} 0 m³/h

Infiltration durch Abluft

$\theta_{mech,inf}$ 20 °C $V_{mech,inf}$ 40 m³/h

Reduktionsfaktor $f_{v,inf}$ (mech. Infiltration) 0,11

Zuluft

θ_{su} 20 °C 0,00 m³/h*m² V_{su} 0 m³/h

Reduktionsfaktor $f_{v,su}$ 0,11

Bauteile | spezielle Daten

	Nr	Or	KB	BT	n	b [m]	l/h [m]	A [m²]	-	A' [m²]	Art	KNB	θ [°C]	bu/f	Uk	ΔU [W/m²K]	Uc	HT [W/K]	ΦT [W]	θeing [°C]	ΦTeing [W]
>>	1	N	AW	AW01	1	4,00	2,30	9,20		9,20	e		-12		0,11		0,11	0,99	36	-12	36
	2	O	IW	IW17	1	2,30	2,60	5,98		5,98	b		20	0,11	0,24		0,24	0,16	6	20	6
	3	S	IW	IW17	1	4,00	2,90	11,60		9,60	b		20	0,11	0,24		0,24	0,26	9	20	9
	4	O	IT	IT01	1	1,00	2,00	2,00	-	2,00	b		20	0,11	2,00		2,00	0,44	16	20	16
	5	W	AW	AW01	1	2,30	2,60	5,98		4,57	e		-12		0,11		0,11	0,49	18	-12	18
	6	W	AF	F01	1	1,13	1,25	1,41	-	1,41	e		-12		0,67		0,67	0,95	34	-12	34
	7	HO	FB	DE01	1	2,30	4,00	9,20		9,20	b		20	0,11	0,70		0,70	0,71	26	20	26
	8	HO	DA	DA	1	2,38	4,00	9,52		9,52	e		-12		0,11		0,11	1,06	38	-12	38

V_{su} * $f_{v,su}$	0,00 m³/h	+ H_{Te}	3,49 W/K	Φ_{Ber}	315 W		
+ $V_{mech,inf}$ * f	4,44 m³/h	+ H_{Tue}	0,00 W/K	Φ_{Thuell}	126 W	H_V * (θ_i - θ_e) =	Φ_V
+ $V_{überstr.}$ * f	4,44 m³/h	+ H_{Tg}	0,00 W/K	Φ_{Teing}	183 W	H_T * (θ_i - θ_e) =	Φ_T
+ V_{inf}	1,93 m³/h	+ H_{Ti}	1,58 W/K	Φ_{HLeing}	315 W	(Φ_T + Φ_V) * f_h + Φ_Z =	$\Phi_{HL,Netto}$
V_{min}	9,20 m³/h	= H_T	5,07 W/K	$\Phi_{HL,N/m²}$	34,25 W/m²	A * f_{RH} =	Φ_{RH}
= V_i	10,82 m³/h	H_V	3,68 W/K	$\Phi_{HL,N/m³}$	13,70 W/m³	$\Phi_{HL,Netto}$ + Φ_{RH} =	Φ_{HL}

Φ_Z 0 W/m² 0 W

Φ_V 132 W

Φ_T 183 W

$\Phi_{HL,Netto}$ 315 W

Φ_{RH} 0 W

Φ_{HL} 315 W

Anhang B: Berechnungen Sonnenhaus

B.1 Berechnungen U-Werte

Schichtenaufbau (von warm nach kalt) **Außenwand**

Nr.	Bezeichnung	d (cm)	λ	R	μ_1	μ_2	ρ	c_p
1	Leichtputz (< 700 kg/m³)	1,50	0,250	0,060	15,00	20,00	700	1
2	POROTON-Planziegel-T8 mit integrierter Perlitdämmung	42,50	0,080	5,313	0,00	0,00	0	0
3	Putzmörtel aus Kalkgips, Gips, Anhydrit und Kalkanhydrit	2,00	0,700	0,029	10,00	10,00	1400	1

Wärmedurchlasswiderstand R_λ:	5,40	m²K/W
Wärmeübergangswiderstand innen R_{si}:	0,13	m²K/W
Wärmeübergangswiderstand außen R_{se}:	0,04	m²K/W
U-Wert:	**0,18**	**W/m²K**

Dicke:	**46,00**	**cm**
Spezif. Bauteilmasse:	**38,5**	**kg/m²**
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit (3cm/10cm):	**10,50 / 10,50**	**Wh/m²K**

Nr.	Bezeichnung **Dach, Gefach Holzanteil 10%**	d (cm)	λ	R	μ_1	μ_2	ρ	c_p
1	Gipskartonplatten (DIN 18180)	1,50	0,250	0,060	8,00	8,00	900	1
2	Holzfaserplatten, einschl. MDF (DIN 12524 - 800 kg/m³)	2,00	0,180	0,111	10,00	10,00	800	2
3	Konstruktionsholz (DIN 12524 - 700 kg/m³)	8,00	0,180	0,444	200,00	200,00	700	2
4	OSB-Platten (DIN 12524)	1,80	0,130	0,138	50,00	50,00	650	2
5	Konstruktionsholz (DIN 12524 - 500 kg/m³)	22,00	0,130	1,692	50,00	50,00	500	2
6	Holzfaserplatten, einschl. MDF (DIN 12524 - 800 kg/m³)	3,50	0,180	0,194	10,00	10,00	800	2

Nr.	Bezeichnung **Dach, Gefach Dämmung 90%**	d (cm)	λ	R	μ_1	μ_2	ρ	c_p
1	Gipskartonplatten (DIN 18180)	1,50	0,250	0,060	8,00	8,00	900	1
2	Holzfaserplatten, einschl. MDF (DIN 12524 - 800 kg/m³)	2,00	0,180	0,111	10,00	10,00	800	2
3	Mineral. und pflanzl. Faserdämmstoff (DIN 18165-1 - WL	8,00	0,040	2,000	1,00	1,00	260	1
4	OSB-Platten (DIN 12524)	1,80	0,130	0,138	50,00	50,00	650	2
5	Mineral. und pflanzl. Faserdämmstoff (DIN 18165-1 - WL	22,00	0,040	5,500	1,00	1,00	260	1
6	Holzfaserplatten, einschl. MDF (DIN 12524 - 800 kg/m³)	3,50	0,180	0,194	10,00	10,00	800	2

Wärmedurchlasswiderstand R_λ:	6,58	m²K/W
Wärmeübergangswiderstand innen R_{si}:	0,10	m²K/W
Wärmeübergangswiderstand außen R_{se}:	0,04	m²K/W
U-Wert:	**0,15**	**W/m²K**

Dicke:	**38,80**	**cm**
Spezif. Bauteilmasse:	**156,0**	**kg/m²**
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit (3cm/10cm):	**33,90 / 47,98**	**Wh/m²K**

Nr.	Bezeichnung **Bodenplatte**	d (cm)	λ	R	μ_1	μ_2	ρ	c_p
1	Zement-Estrich	3,50	1,400	0,025	15,00	35,00	2000	1
2	Polyethylenfolie 0,25mm nach DIN 12524	0,02	0,330	0,001	400000,	400000,	0	2
3	Beton nach EN 12524 (Rohdichte 2400 kg/m³)	25,00	2,000	0,125	130,00	130,00	2400	1
4	Polystyrol PS -Partikelschaum (WLG 035 - > 30 kg/m³)	12,00	0,035	3,429	40,00	100,00	30	2
5	Bimskies (lose Schüttung, abgedeckt)	15,00	0,190	0,789	3,00	3,00	1000	1

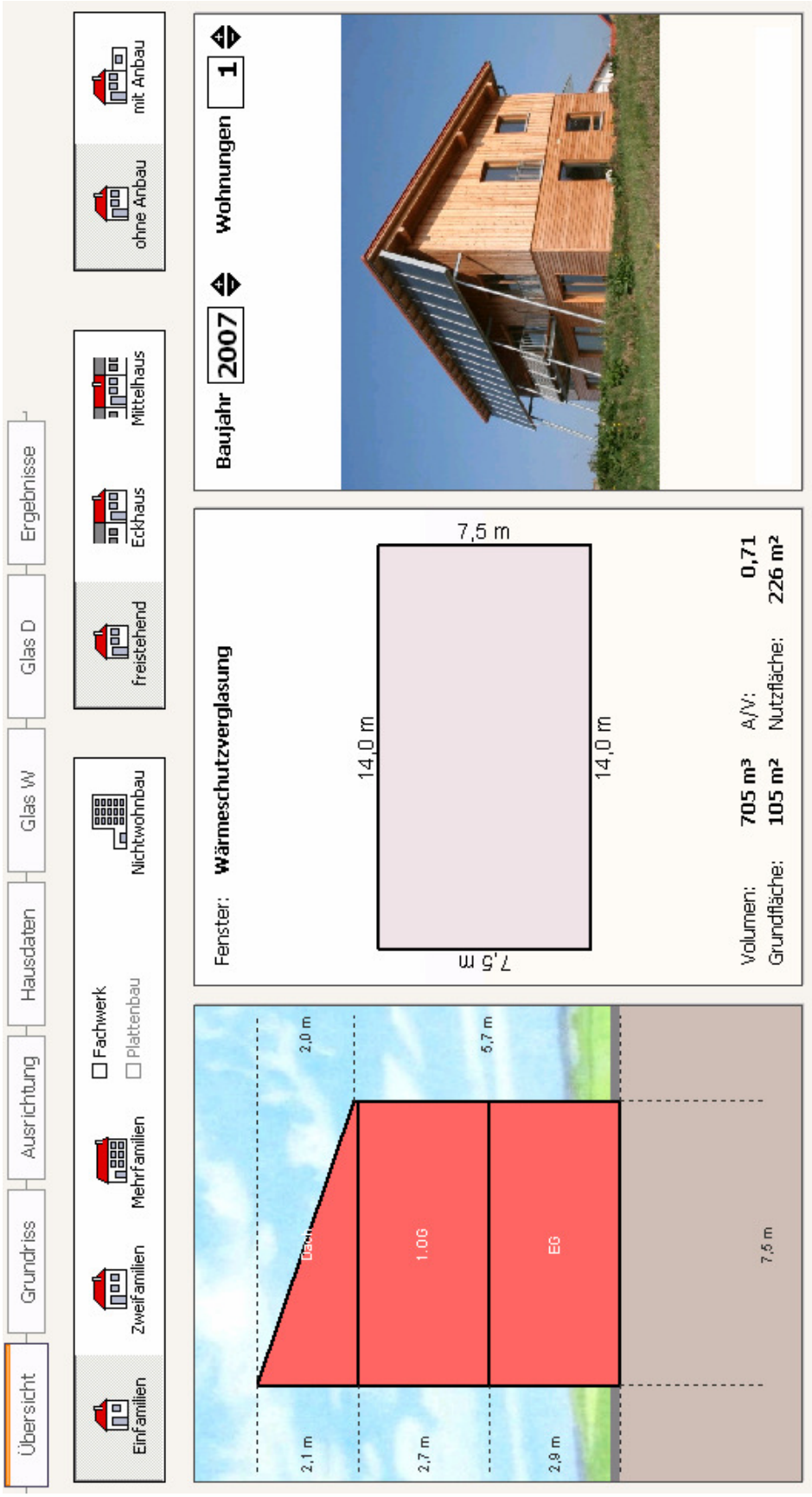
Wärmedurchlasswiderstand R_λ:	4,37	m²K/W
Wärmeübergangswiderstand innen R_{si}:	0,17	m²K/W
Wärmeübergangswiderstand außen R_{se}:	0,04	m²K/W
U-Wert:	**0,22**	**W/m²K**

Dicke:	**55,52**	**cm**
Spezif. Bauteilmasse:	**823,6**	**kg/m²**
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit (3cm/10cm):	**60,00 / 225,52**	**Wh/m²K**

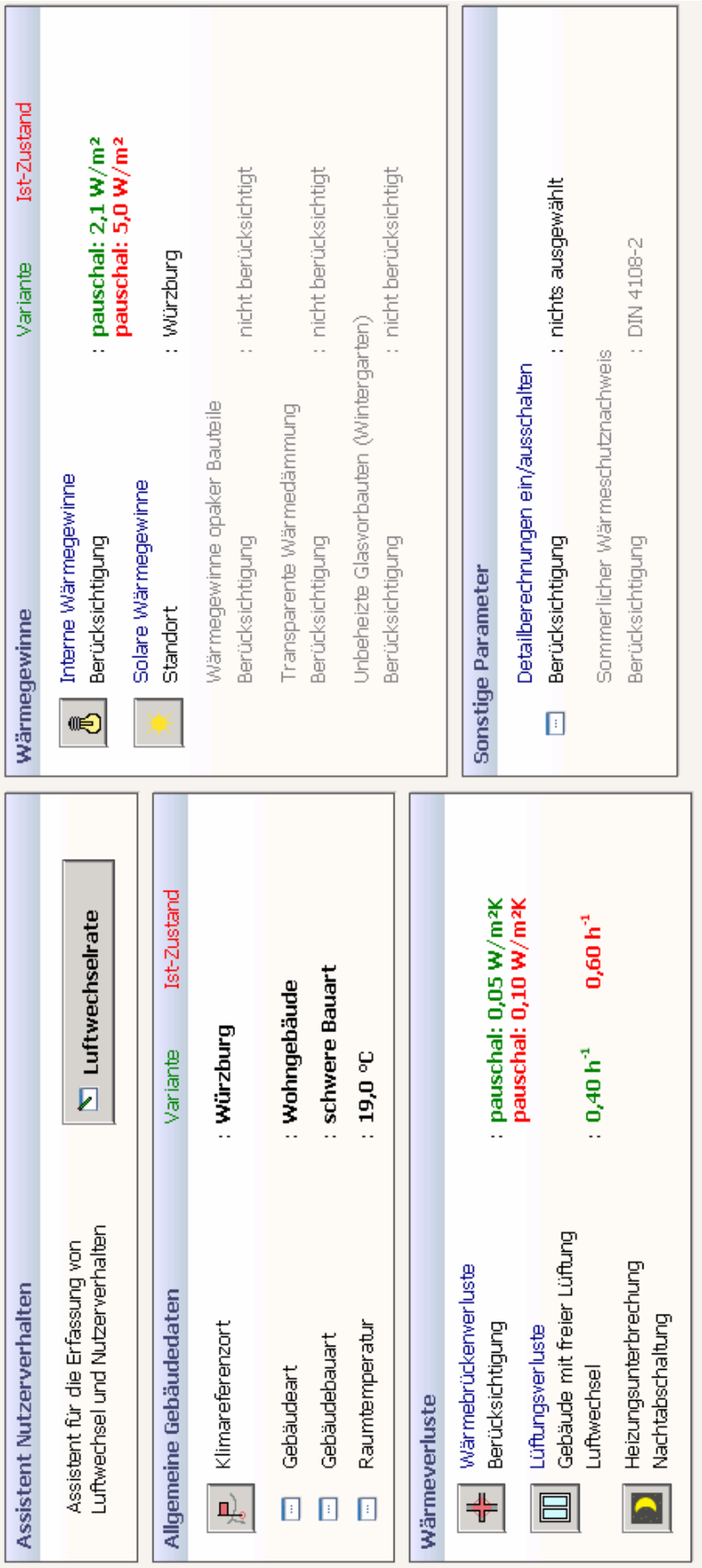
Fenster 50,45 m² **0,80** W/m²K Wärmeschutzverglasung

B.2 Weitere Berechnungen

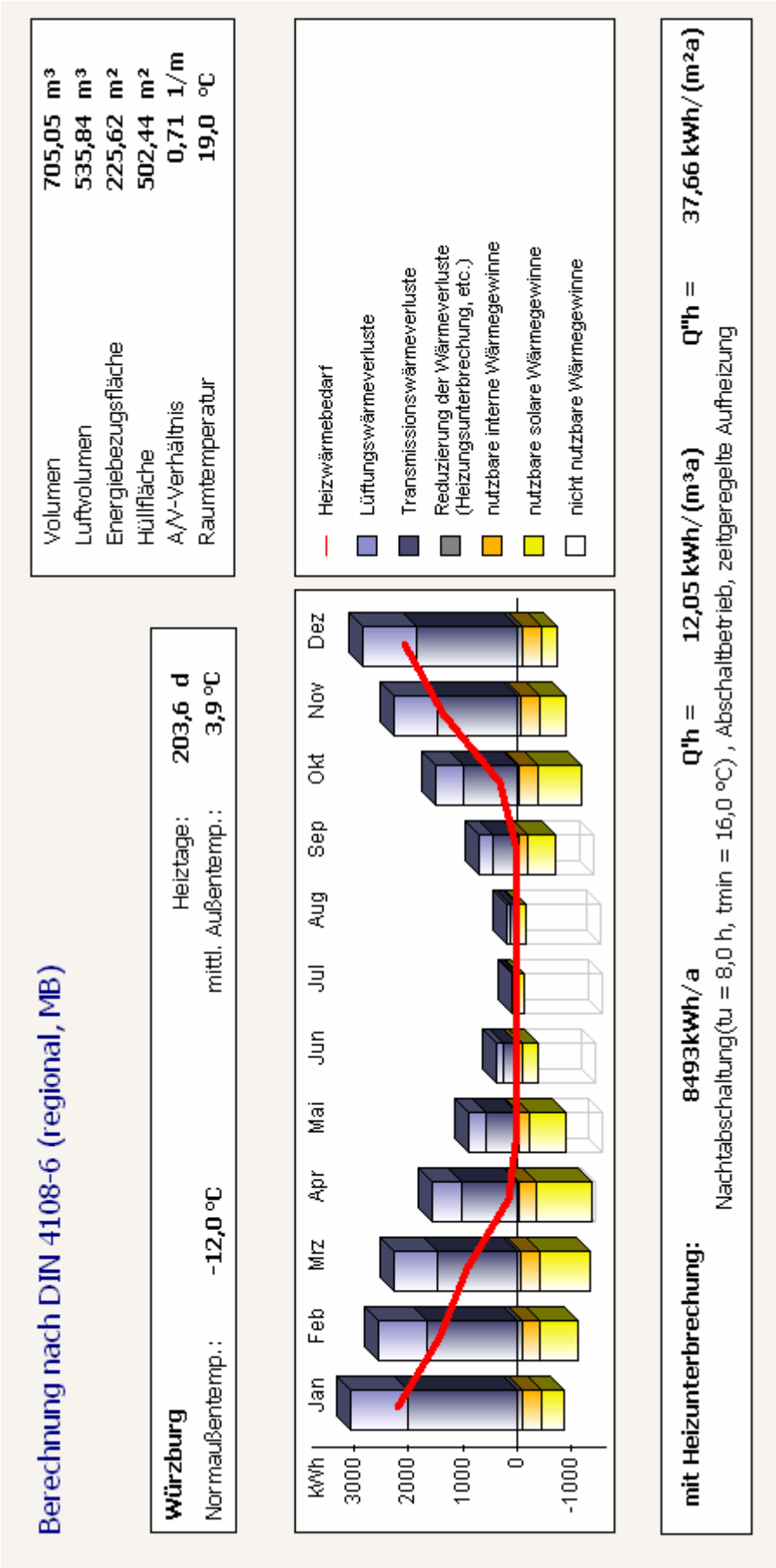
Erfassung Gebäudedaten:



Festlegung der Parameter:



Ergebnisanzeige des Heizwärmebedarfs aus Hottgenroth Energieberater:



Definition der Solaranlage in Polysun 4.0 Designer

Definition der Verbraucher

User	SPF-Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Solltemperatur	Energieverbrauch
Anwesenheit	1	immer anwesend	Anwesenheitstage: 365	-	-
Warmwasser			191,2 l/Tag	45.0 °C	2840.5 kWh/Jahr
Gebäude	0	DA-SH	Tatsächliche EBF: 194,6 m²	20.0 °C	14877.6 kWh/Jahr

Definition der Solaranlage

Element	SPF-Nr.	Bezeichnung	Eigenschaften, Wert, Einheit
Kollektor	356	6.93x Sunbox HFK-S	Bruttogesamtfläche: 42,15 m², Gesamte Absorberfläche: 37,73 m², Ausrichtung: 0°, Anstellwinkel: 65°
Kessel	0	Holzkessel	Leistung: 30 kW, Wirkungsgrad: 88%
Pumpe 1	21	Grundfos UPS 25-60	
Pumpe 2	2	Pumpe, mittel	
Rohr 31	33	Kupferrohr 28x1.2	-
Speicher 8	0	Jenni Solartank	Volumen: 8350 l, Dämmungs-Dicke: 250 mm
Steuerung Mischventil 6			Definition der Solltemperatur: Fixer Wert
Zusatzheizungs-Steuerung1			Einschalt-Speichertemperatur: 47 °C
Steuerung Mischventil 1			Definition der Solltemperatur: Fixer Wert
Pumpensteuerung 1			Speicher-Maximaltemperatur: 93 °C
Steuerung Mischventil 2			Definition der Solltemperatur: Variabler Wert
Heizsteuerung 2			Heizkreisaktivierung: 16 °C
Steue			Definition der Solltemperatur: Variabler Wert
Pumpensteuerung 5			Speicher-Maximaltemperatur: 80 °C

Anhang C: Weitere Berechnungen nach DIN 4701-10

C.1 Berechnungen Verluste

Trinkwarmwasser

Verluste Speicherung

Die Speicherverluste bleiben in der Berechnung unberücksichtigt.

Verluste Verteilung

Die allgemeine Bestimmung der Wärmeabgabe eines Rohrabschnitts eines Trinkwarmwasser-Rohrnetzes ohne Zirkulationsleitung erfolgt nach DIN 4701-10, Gleichung (5.1.2-1 und 5.1.2-5) folgendermaßen:

$$q_{TW,d} = \frac{U_i \bullet L_i \bullet \left(\vartheta_{TW,m} - \vartheta_{u,m}\right) \bullet t_{TW} \bullet z}{1000 \bullet A_N}$$

$U = 0{,}15\ \frac{W}{m \bullet K}$ U-Wert der Warmwasserleitungen (doppelte Dämmstärke nach EnEV)

Mit Leitungslänge ohne Zirkulation (Tabelle 5.1-2)

$$\begin{aligned} L &= 13 + 0{,}01 \bullet A_N + 0{,}038 \bullet A_N \\ &= 13 + 0{,}01 \bullet 225{,}6 + 0{,}038 \bullet 225{,}6 = 23{,}8\,m \end{aligned}$$

$\vartheta_{u,m} = 20°C$, mittlere Umgebungstemperatur (Tabelle 5.2)

$\vartheta_{TW,m} = 32\ °C$ (Tabelle 5.2)

$t_{TW} = 350\,\frac{d}{a}$, Bereitstellungsdauer Trinkwasser (Tabelle 5.2)

$z = 24\ \frac{h}{d}$ (für TWW-Rohrnetze ohne Zirkulationsleitungen nach DIN 4701-10)

Somit beträgt der Verlust für die Verteilung des Trinkwarmwassers:

$$q_{TW,d} = \frac{0{,}15\,\frac{W}{mK} \bullet 23{,}8\,m \bullet \left(32 - 20\right) K \bullet 350\,\frac{d}{a} \bullet 24\,\frac{h}{d}}{1000} = \frac{239\,\frac{kWh}{a}}{225{,}6\,m^2} = 1{,}06\,\frac{kWh}{m^2 \bullet a}$$

Der nach DIN 4701-10 anrechenbare Wärmegewinn während der Heizperiode beträgt (nach Gleichung 5.1.2-2):

$$q_{H,TW,d} = \frac{t_{HP}}{t_{TW}} \bullet (1 - f_a) \bullet q_{TW,d,i}$$

$t_{HP} = 185 \frac{d}{a}$ Dauer der Heizperiode (EnEV-Berechnung)

$f_a = 0{,}15$ Wärmeverlustfaktor für Komponenten innerhalb der th. Hülle (Tabelle 5.2)

Die gesamte anrechenbare Heizwärmegutschrift besteht aus den Verlusten der Verteilung. Speicherverluste entstehen keine, da der Boiler im Pufferspeicher integriert ist und die Wärme direkt an das Heizungswasser abgibt.

$$q_{H,TW,d} = \frac{185 \frac{d}{a}}{350 \frac{d}{a}} \bullet (1 - 0{,}15) \bullet 1{,}06 \frac{kWh}{m^2 \bullet a} = 0{,}48 \frac{kWh}{m^2 \bullet a}$$

Heizung

Verluste Übergabe

Der flächenbezogene Wärmebedarf $q_{H,ce}$ für die Übergabe der Wärme im Raum beträgt nach Tabelle 5.3-1:

$$q_{H,ce} = 744 \frac{kWh}{a} = 3{,}3 \frac{kWh}{m^2 \bullet a}$$

Mit integrierten Heizflächen, Einzelraumregelung mit Zweipunktregler und einer Schaltdifferenz von 2 Kelvin.

Verluste Verteilung

Die allgemeine Bestimmung der Wärmeabgabe eines Rohrabschnitts „i“, eines Warmwasserheizungs-Rohrnetzes erfolgt nach Gleichung 5.3.2-1 und 5.3.2-2

$$q_{H,d} = \frac{U_i \bullet L_i \bullet (\vartheta_{HK,m} - \vartheta_{u,m}) \bullet f_a \bullet f_b \bullet t_{HP} \bullet z}{1000 \bullet A_N}$$

$U = 0{,}2 \frac{W}{m \bullet K}$ U-Wert der Heizungsleitungen (Dämmstärke nach EnEV)

Mit Leitungslänge nach Tabelle 5.3-2

$$L = 27{,}5 + 0{,}025 \bullet A_N + 0{,}075 \bullet A_N + 0{,}55 \bullet A_N$$
$$= 27{,}5 + 0{,}025 \bullet 225{,}6 m^2 + 0{,}075 \bullet 225{,}6 m^2 + 0{,}55 \bullet 225{,}6 m^2 = 174 m$$

$\vartheta_{HK,m}$ = 26 °C, mittlere Heizkreistemperatur (Tabelle 5.1)

$\vartheta_{u,m}$ = 20°C, mittlere Umgebungstemperatur (Tabelle 5.2)

f_a = 0,15 Wärmeverlustfaktor für Komponenten innerhalb der th. Hülle (Tabelle 5.2)

f_b = 1,0 Teilbeheizungsfaktor für nicht absperrbare Heizungsrohre (Tabelle 5.2)

$t_{HP} = 185\frac{d}{a}$ Dauer der Heizperiode (DIN 4801-Tabelle A2)

$z = 16\ \frac{h}{d}$ Laufzeit der Pumpe pro Tag

Die Verluste für die Verteilung im Heizungsnetz betragen demnach:

$$q_{H,d} = \frac{0,2\frac{W}{m \bullet K} \bullet 174m \bullet (26-20)K \bullet 0,15 \bullet 1,0 \bullet 185\frac{d}{a} \bullet 16\frac{h}{d}}{1000} = \frac{92\frac{kWh}{a}}{225,6m^2} = 0,41\frac{kWh}{m^2 \bullet a}$$

Verluste Speicher

Die Speicherverluste werden von Polysun ermittelt und sind bereits in den solaren Deckungsgrad eingerechnet.

Summe der Verluste

Die Summe setzt sich aus den Trinkwarmwasser- und den Heizungsverlusten zusammen:

$$q_{TW,d} + q_{H,ce} + q_{H,d} = 0,48\frac{kWh}{m^2 \bullet a} + 3,3\frac{kWh}{m^2 \bullet a} + 0,41\frac{kWh}{m^2 \bullet a} = 4,19\frac{kWh}{m^2 \bullet a} \bullet 225,6m^2 = 945\frac{kWh}{a}$$

C.2 Berechnung Biomasse-Erzeuger Aufwandszahl und Hilfsenergien (SH)

Heizung

Erzeuger-Aufwandszahl

Da im Sonnenhaus kein gewöhnlicher Kessel zu Einsatz kommt, bei dem eine standardisierte Erzeuger-Aufwandszahl eingesetzt werden könnte muss die Aufwandszahl explizit für den eingesetzten Wärmeerzeuger ermittelt werden, um ein realistisches Ergebnis zu erhalten (Gleichung 5.1.4-45):

$$e_{TW,g,Bio} = f_{Q,TW} \bullet e_{TW,g,SP,Bio} + (1 - f_{Q,TW}) \bullet e_{TW,g,HP,Bio}$$

$$e_{TW,g,Bio} = e_{TW,g,HP,Bio}$$

Die Aufwandszahl zur Erzeugung für den Trinkwarmwasserbetrieb ist beim Sonnenhaus gleich der Erzeuger-Aufwandszahl für die Heizperiode, da das Trinkwasser während der Sommermonate und in Übergangsjahreszeiten vollständig von der Solaranlage erwärmt wird. Gleichzeitig ist die Erzeuger-Aufwandszahl für die Trinkwasser-Erwärmung während der Heizperiode gleich der Erzeuger-Aufwandszahl für den Heizbetrieb, da nur Warmwasser nachgeheizt werden kann, wenn auch der Speicher für den Heizbetrieb nachgeladen wird (Gleichung 5.3.4.2-24):

$$e_{TW,g,HP,Bio} = e_{H,g,Bio} = f_{Q,GZ} \bullet \frac{1}{\eta_{GZ}} + (1 - f_{Q,GZ} + f_{CE}) \bullet \frac{1}{\eta_{SB}}$$

Mit Wärmemengenanteil des Grundzyklus (Gleichung 5.3.4.2-25):

$$f_{Q,GZ} = \frac{x_Z \bullet Q_{N,GZ}}{\frac{\dot{Q}_H}{t_{HP}} + \frac{\dot{Q}_{TW}}{t_{TW}}} = \frac{1 \bullet 30kW \bullet 1,5h}{\frac{9342kWh}{40d} + \frac{2961kWh}{40d}} = 0,15$$

x_Z = Anzahl der Grundzyklen pro Tag - beim Sonnenhaus = $1d^{-1}$ (da nur 1 Mal pro Tag der Ofen angeheizt wird)

$Q_{N,GZ}$ = Vom Wärmeerzeuger bei einem Grundzyklus insgesamt abgegebene Nutzwärme 30kW Nennwärmeleistung • 1,5h Grundzyklus= 45kWh (Tabelle 5.3-13)

$\dot{Q}_H$ = Jährlich vom WE zu liefernde Wärme zum Heizen (nach EnEV = 8.493kWh/a zzgl. Verluste ca. 10%)

$\dot{Q}_{TW}$ = Jährlich vom WE zu liefernde Wärme zur TWW-Bereitung (nach EnEV = 2.820kWh/a zzgl. Verluste ca. 5%)

$$t_{HP} = t_{TW} = \text{Anzahl der Nachheiztage} = \frac{5133\frac{kWh}{a}\,\text{Nachheizbedarf}}{25,5kW\ \text{wassers.Leistung} \bullet 5\frac{h}{d_{Nachheiz}}} = 40d$$

Mit Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers im Grundzyklus (Tabelle 5.3-13):

$\eta_{GZ} = \eta_{\text{stationärer Betrieb}}$ (Herstellerangabe) $\bullet$ 0,85 $= 0,88 \bullet 0,85 = 0,75$

Mit Überhitzungsfaktor (Gleichung 5.3.4.2-28):

$$f_{CE} = \frac{0,25 \bullet Q_H}{\dot{Q}_H + \dot{Q}_{TW}} \bullet \left(\frac{\dot{Q}_{N,max} \bullet (1 - z_{HK,m})}{\dot{Q}_{GB}} - \frac{A_{Auf}}{A_N} \right)$$

$$= \frac{0,25 \bullet 8493\frac{kWh}{a}}{9342\frac{kWh}{a} + 2961\frac{kWh}{a}} \bullet \left(\frac{30kW \bullet (1 - 0,85)}{5,9kW} - \frac{80m^2}{225,6m^2} \right) = 0,07$$

$z_{HK,m}$ = Anteil der Heizleistung an Heizkreis 85% (Herstellerangabe)

$\dot{Q}_{GB}$ = maximale Heizleistung des Gebäudes 5,9kW (berechnet)

A_{Auf} = Fläche des Aufstellungsraums des Biomasse-WE 80m² (hier angenommen)

Mit Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers im stationären Betrieb:

η_{SB} = Volllast-Wirkungsgrad 88% (Herstellerangabe)

Die Erzeuger-Aufwandszahl des Biomasse-WE für den Heizbetrieb beträgt:

$$e_{H,g,Bio} = 0,15 \bullet \frac{1}{0,75} + (1 - 0,15 + 0,070) \bullet \frac{1}{0,88} = 1,25$$

Hilfsenergie

Pumpe Solarkreis

Für das Referenzhaus wird eine Hocheffizienzpumpe (mit DC-Motorentechnik) eingesetzt; eine überschlägige hydraulische Berechnung ergab, dass die Pumpe Grundfos ALPHA Pro 25-60 mit Leistungsaufnahme 50 W für den Solarkreis geeignet ist.

Der flächenbezogene Hilfsenergiebedarf der Solarkreispumpe wird anhand Gleichung 5.1.4-44 nach DIN 4701-10 errechnet:

$$q_{g,HE,sol} = \frac{P_{P,sol} \bullet t_{P,sol}}{1000 \bullet A_N \bullet \alpha_{sol}}$$

$P_{P,sol}$ = 50W Nennleistungsaufnahme der Solarpumpe

$t_{P,sol} = 1.672 \frac{h}{a}$ Betriebsdauer der Solarpumpe (aus Polysun)

$\alpha_{TW,sol}$ = 66,5% Deckungsanteil der Solaranlage

Der Hilfsenergiebedarf für den Solarkreislauf beträgt somit:

$$q_{g,HE,sol} = \frac{50W \bullet 1672 \frac{h}{a}}{1000 \bullet 0,665} = \frac{126 \frac{kWh}{a}}{225,6m^2} = 0,56 \frac{kWh}{m^2a}$$

Pumpe Heizkreis

Für das Referenzhaus wird eine Hocheffizienzpumpe Grundfos Typ ALPHA Pro 25-40 eingesetzt; die Leistungsaufnahme beträgt je nach Betriebspunkt der Druckdifferenzregelung 5-25 W.

Der flächenbezogene Hilfsenergiebedarf des Heizkreises wird anhand Gleichung 5.3.2-3 nach DIN 4701-10 errechnet:

$$q_{H,d,HE} = \frac{P_P \bullet t_{HP} \bullet z}{1000 \bullet A_N}$$

P_{Pumpe} = 25W, Nennleistungsaufnahme der Pumpe

$z = 16 \frac{h}{d}$, Laufzeit der Pumpe pro Tag

$f_p = 1,4 - \frac{20}{A_N} = 1,4 - \frac{20}{225,6} = 1,31$, Korrekturfaktor für regelbare Pumpen (Gl. 5.3.2-4)

Der Hilfsenergiebedarf für den Heizkreislauf beträgt somit:

$$q_{H,d,HE} = \frac{25W \bullet 185 \frac{d}{a} \bullet 16 \frac{h}{d}}{1000} = \frac{74 \frac{kWh}{a}}{225,6m^2} = 0,33 \frac{kWh}{m^2a}$$

Pumpe Nachheizung

Der flächenbezogene Hilfsenergiebedarf für die Nachheizung über den Stückholzkessel wird anhand Gleichung 5.3.3-3 (Hilfsenergie zum Laden eines Pufferspeichers) nach DIN 4701-10 errechnet. Da der Kessel ein Naturzugkessel ist wird nur die Hilfsenergie der

Pumpe erfasst. Wegen der geringen Betriebsdauer wird hier eine „normale“, ungeregelte Heizungspumpe (Grundfos UPS25-40) eingesetzt.

$$q_{H,s,HE} = \frac{P_{Pumpe} \bullet t_P}{1000 \bullet A_N}$$

P_{Pumpe} = 45W, Nennleistungsaufnahme der Pumpe

$$t_P = \frac{5133 \frac{kWh}{a} \text{ Nachheizbedarf}}{25,5 kW \text{ wasserseitige Leistung}} = 201 \frac{h}{a} \text{ Betriebsdauer der Umwälzpumpe}$$

Der Hilfsenergiebedarf für die Nachheizung beträgt somit:

$$q_{H,s,HE} = \frac{45W \bullet 201 \frac{h}{a}}{1000} = \frac{9,0 \frac{kWh}{a}}{225,6 m^2} = 0,04 \frac{kWh}{m^2 \bullet a}$$

Sonstiger Hilfsstrombedarf

Für den Hilfsstrombedarf von Stellantrieben und Steuerungen gibt es in der DIN 4701-10 keinen vorgegebenen Berechnungsgang, da in der Regel der Bedarf sehr gering ist und nicht separat erfasst werden muss. Setzt man allerdings diesen Hilfsstrombedarf in Relation zu dem anderen sehr niedrigen Stromverbrauch im Sonnenhaus erscheint dieser immerhin als ca. 40%iger Aufschlag zu dem Bedarf der Pumpen:

Strombedarf für Stellantriebe an den Heizkreisverteilern (überschlägig):

P = 2,5 W Leistungsaufnahme (in Betrieb, wenn Raumthermostat anfordert)

n = 12 Stück (angenommne Anzahl der Heizkreise bzw. Stellantriebe)

$$t = 185 \frac{d}{a} \bullet 16 \frac{h}{d} = 2.960 \frac{h}{a} \text{ (Gesamtbetriebszeit Heizungspumpe)}$$

Da die Stellantriebe wahlweise stromlos geschlossen oder geöffnet eingesetzt werden können, kann als ungünstigster Fall eine tatsächliche Betriebsdauer von 50% der Gesamtbetriebszeit angenommen werden.

Der Hilfsstrombedarf für die Stellantriebe ergibt sich somit zu:

$$\frac{2,5W \bullet 12 \bullet 2960 \frac{h}{a} \bullet 0,5}{1000} = \frac{44,4 \frac{kWh}{a}}{225,6 m^2} = 0,20 \frac{kWh}{m^2 a}$$

Strombedarf für den Standby-Strom der Steuerung (überschlägig):

P = 5 W (Standby-Strom für Steuerung, Herstellerangabe)

$t = 365\ \frac{d}{a} \cdot 24\ \frac{h}{d} = 8760\ \frac{h}{a}$ Betriebszeit

Der Hilfsstrombedarf für die Steuerung ergibt sich somit zu:

$$\frac{5W \cdot 8760 \frac{h}{a}}{1000} = \frac{43,8 \frac{kWh}{a}}{225,6 m^2} = 0,19 \frac{kWh}{m^2 a}$$

Summe der Ergebnisse

Die Summe der Hilfsenergie ergibt somit:

$q_{g,HE,sol} = 0,57\ \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ Hilfsenergiebedarf Solarkreis

$q_{H,d,HE} = 0,33\ \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ Hilfsenergiebedarf Heizkreis

$q_{H,s,HE} = 0,04\ \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ Hilfsenergiebedarf Nachheizung

$0,20\ \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ Hilfsenergiebedarf Stellantriebe

$0,19\ \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ Hilfsenergiebedarf Steuerung

$q_{H,gesamt} = 1,33\ \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ Hilfsenergiebedarf gesamt (entsprechen $300 \frac{kWh}{a}$)

Multipliziert mit dem Primärenergiefaktor 2,7 für Strom ergibt sich ein Primärenergiebedarf für die Hilfsenergie von $\mathbf{810} \frac{kWh}{a}$, als spezifischer Primärenergiebedarf $\mathbf{3,6} \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$.

Literaturverzeichnis

[1] Internetpräsenz Passivhaus-Institut: www.passiv.de

[2] Internetpräsenz Sonnenhaus-Institut: www.sonnenhaus-institut.de

[3] DIN 4108-6: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden

DIN 4108-6: Kommentar zu DIN 4108-6

[4] Pregizer, D. (2007): Grundlagen und Bau eines Passivhauses

[5] Feist, W. (2001): Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser

[6] EnEV 2007: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden

[7] Feist, W. (1997): Das Niedrigenergiehaus

[8] Mürmann, H. (1999): Wohnungslüftung – Kontr. Lüftung mit Wärmerückgewinnung

[9] Tagungsbericht der Kälte-Klima-Tagung 2002, Band IV

[10] Ochsner K. (2005): Wärmepumpen in der Heizungstechnik

[11] Tiator, I., Schenker, M. (2007): Wärmepumpen, Wärmepumpenanlagen

[12] Kaltschmitt, M. (1997) Erneuerbare Energien

[13] Weik, H. (2006): Expert Praxislexikon, Sonnenenergie und solare Techniken

[14] Hadamovsky, H-F, Jonas, D. (2007) : Solarstrom / Solarthermie

[15] Jenni, J. (1996): Sonnenenergieanlagen mit hohem solarem Deckungsgrad

[16] Jenni, J. : Speicher in Theorie und Praxis

[17] Humm, O. (1998): NiedrigEnergie- und Passivhäuser

[18] Bundesamt für Energie BFE (2002): Wärmebrückenkatalog

[19] Passivhaus-Institut (2007) PHPP 2007 (Passivhaus Projektierungspaket 2007)

[20] DIN 4701-10: Energetische Bewertung der Anlagentechnik

DIN 4701-10: Kommentar zu DIN 4701-10

[21] Albers K-J, Hain K.: Gebäudetechnische Systeme, Niedrig-, Ultra- und Passivhäuser

Recknagel, Sprenger, Schramek (07/08): Taschenbuch für Heizung+Klima Technik