

Das Sonnen-Zentrum

Optimierung und Wirtschaftlichkeit eines gewerblich genutzten Gebäudes mit Sonnenhausstandard

Diplomarbeit an der

Hochschule Esslingen

Fakultät Versorgungstechnik und Umwelttechnik

von

Tobias Ott

Wintersemester 2007/2008

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Rohrbach, FHTE

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Hartmann, Hartmann Energietechnik GmbH

Erklärung gemäß § 27 Studien- und Prüfungsordnung der FHTE

Hiermit versichere ich,

Bearbeiter: Tobias Ott

Matrikel-Nr.: 727733,

dass ich vorliegende Diplomarbeit selbständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Kusterdingen, den 30.01.2008

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Aufgrund der knapper werdenden fossilen Energieträger, des Klimawandels und der stetig steigenden Preise für Energie, nehmen alternative Energieträger eine ständig wachsende Bedeutung auf dem Energiemarkt ein.

In der vorliegenden Arbeit werden die Wirtschaftlichkeit, das Verhalten sowie Lösungsansätze zur Optimierung einer solarthermischen Großanlage mit hohem Deckungsanteil zur Heizwärmeerzeugung und Warmwasserbereitung in einem gewerblich genutzten Gebäude untersucht. Dabei wird auf aktuelle Daten der Anlage zurückgegriffen und mit den Lösungsansätzen für die Optimierung verglichen. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung sind derzeit gültige Bedingungen für Preise und staatliche Förderungen zugrunde gelegt.

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Formelzeichen | I |
| Das Sonnen-Zentrum | 1 |
| 1 Einführung..... | 1 |
| 1.1 Vorwort | 1 |
| 1.2 Möglichkeiten und Potentiale der Solarenergie | 2 |
| 2 Solarkollektoren | 5 |
| 2.1 Prinzipielle Vorgänge im Kollektor | 5 |
| 2.2 Definition der zur Berechnung notwendigen Winkel..... | 7 |
| 2.3 Vergleich verschiedener Kollektorarten zur solaren Wärmeerzeugung..... | 8 |
| 2.3.1 Der Schwimmbad-Absorber..... | 8 |
| 2.3.2 Der Flachkollektor..... | 9 |
| 2.3.3 Vakuumröhre..... | 11 |
| 2.3.4 Vakuumröhre mit „Heatpipe“ | 12 |
| 2.3.5 Vakuumkollektor mit Sydney-Röhre und CPC-Reflektor | 13 |
| 2.3.6 Wirkungsgradkennlinien der einzelnen Kollektorarten | 14 |
| 2.3.7 Nutzung konzentrierter Sonnenstrahlung..... | 14 |
| 3 Solarspeichersysteme | 15 |
| 3.1 Kies-Wasserwärmespeicher | 17 |
| 3.2 Erdspeichersysteme | 17 |
| 3.3 Aquiferspeichersystem | 17 |
| 4 Sonnenhäuser | 18 |
| 4.1 Geschichte der Sonnenhäuser..... | 18 |
| 4.2 Technik des Sonnenhauses..... | 20 |
| 5 Das Sonnen-Zentrum..... | 21 |
| 5.1 Anlage im Sonnen-Zentrum | 22 |
| 5.2 Flächen und Verbrauchsdaten | 26 |
| 5.3 Wärmeerzeugung..... | 27 |
| 5.3.1 Kollektoranlage | 27 |
| 5.3.2 Holzvergaserkessel..... | 28 |
| 5.3.3 Pelletofen..... | 29 |
| 5.4 Zusatz Wärmequellen..... | 30 |
| 5.5 Wärmespeicherung..... | 30 |
| 5.6 Regelung der Anlage | 36 |
| 6 Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI 2067 | 38 |
| 6.1 Formeln zur Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI 2067 im Sonnen-Zentrum | 38 |
| 6.1.1 Annuität der Jahres-Gesamtzahlungen..... | 39 |
| 6.1.2 Annuität der kapitalgebundene Kosten | 40 |
| 6.1.3 Annuität der bedarfs- und verbrauchsgebundene Kosten..... | 41 |
| 6.2 Betriebsgebundene Kosten | 58 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 6.3 | Randbedingungen für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit | 59 |
| 7 | Berechnung der Wirtschaftlichkeit Variante Gas-Brennwertheizung | 60 |
| 7.1 | Annuität der kapitalgebundenen Kosten | 60 |
| 7.2 | Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten..... | 62 |
| 7.2.1 | Jährlicher Heizenergiebedarf $Q_{H,a}$ | 62 |
| 7.2.2 | Jährlicher Energiebedarf für Warmwasser $Q_{WE,a}$ | 64 |
| 7.2.3 | Berechnung der elektrischen Hilfsenergie für Heizung | 66 |
| 7.3 | Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten..... | 67 |
| 7.4 | Annuität der betriebsgebundenen Kosten..... | 67 |
| 7.5 | Gesamt Annuität..... | 68 |
| 7.6 | Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Variante Gas-Brennwertheizung im Sonnen-Zentrum | 68 |
| 8 | Berechnung der Wirtschaftlichkeit Variante Sonnenheizung | 69 |
| 8.1 | Annuität der kapitalgebundenen Kosten | 69 |
| 8.2 | Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten..... | 72 |
| 8.2.1 | Jährlicher Heizwärmebedarf $Q_{H,a}$ | 72 |
| 8.2.2 | Jährlicher Energiebedarf für Warmwasser $Q_{WE,a}$ | 74 |
| 8.3 | Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten..... | 77 |
| 8.4 | Annuität der betriebsgebundenen Kosten..... | 78 |
| 8.5 | Gesamt Annuität..... | 79 |
| 8.6 | Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Variante Sonnenheizung im Sonnen-Zentrum mit staatlicher Förderung..... | 79 |
| 8.7 | Kosten Verlauf | 80 |
| 9 | Gaspreisentwicklung in der Zukunft | 81 |
| 10 | Bewertung der Umweltverträglichkeit..... | 82 |
| 11 | Auswirkungen kleinerer solarer Deckungsanteile auf die Wirtschaftlichkeit | 84 |
| 12 | Betriebsverhalten der Anlage..... | 86 |
| 13 | Optimierung der Anlage..... | 88 |
| 13.1 | Vorüberlegung | 88 |
| 13.1.1 | Optimierung durch Ertragssteigerung..... | 88 |
| 13.1.2 | Verbesserung der Ausnutzung des Ertrags | 91 |
| 13.1.3 | Optimierung der Energiebilanz des Gebäudes..... | 92 |
| 14 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 94 |
| 15 | Literaturüberblick | 96 |
| 16 | Quellenverzeichnis | 97 |

Formelzeichen

| | | |
|---------------|---------------------|--|
| η | % | Wirkungsgrad |
| k | W/m ² *K | Wärmedurchgangsfaktor |
| ΔT | K | Temperaturdifferenz |
| ϑ | °C | Temperatur |
| τ | | Transmissionsfaktor |
| ε | | Emissionsfaktor |
| α | | Absorptionsfaktor |
| A | €/a | Annuität |
| R_W | € | Restwert |
| a | | Annuitätsfaktor |
| f_K | | Faktor für Instandsetzung |
| ba | | Preisdynamischer Annuitätsfaktor |
| b | | Barwertfaktor |
| q | | Zinsfaktor |
| r | | Preissteigerungsfaktor |
| T | a | Betrachtungszeitraum |
| T_N | a | Nutzungszeit |
| Q_N | kW | Normwärmebedarf DIN 4701 März 83 |
| Q | kWh/a | Jahres-Energiebedarf für Heizwärme und Warmwassererzeugung |
| t_{Last} | h/a | Dauer des Lastfalls |
| P_{Last} | kW | Leistungsaufnahme der Pumpe im Lastfall |

1 Einführung

1.1 Vorwort

Der Endenergieverbrauch in Deutschland lässt sich in vier Verbrauchsgruppen unterteilen. Dabei entfallen ca. 29 % des Energiebedarfs in den Bereich der privaten Haushalte, 16 % für den Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistung, 29 % für Verkehr, und 26 % des gesamten Endenergiebedarfs in Deutschland werden in der Industrie verbraucht.

In den privaten Haushalten entfällt dabei der größte Anteil mit ca. 76 % auf den Bereich der Raumwärmeerzeugung. Zusammen mit dem Wärmebedarf für Warmwasser werden in den Haushalten rund 87 % der Energie zur Wärmeerzeugung benötigt.

Zwar ist der Markt der regenerativen Energien, wie Biomasse und Solarthermie in den letzten Jahren sehr stark gestiegen, jedoch lagen sie 2005 gerade mal bei 4,2 % des Endenergieverbrauchs für Wärme. /1/

Diese Zahlen zeigen deutlich, dass ein Großteil der Energie in Deutschland zur Heizwärme- und Warmwassererzeugung benötigt wird. Hier besteht ein großes Potential, vor allem für die Beheizung mit Solarwärme in Verbindung mit Biomasse.

Endenergieverbrauch in Deutschland.

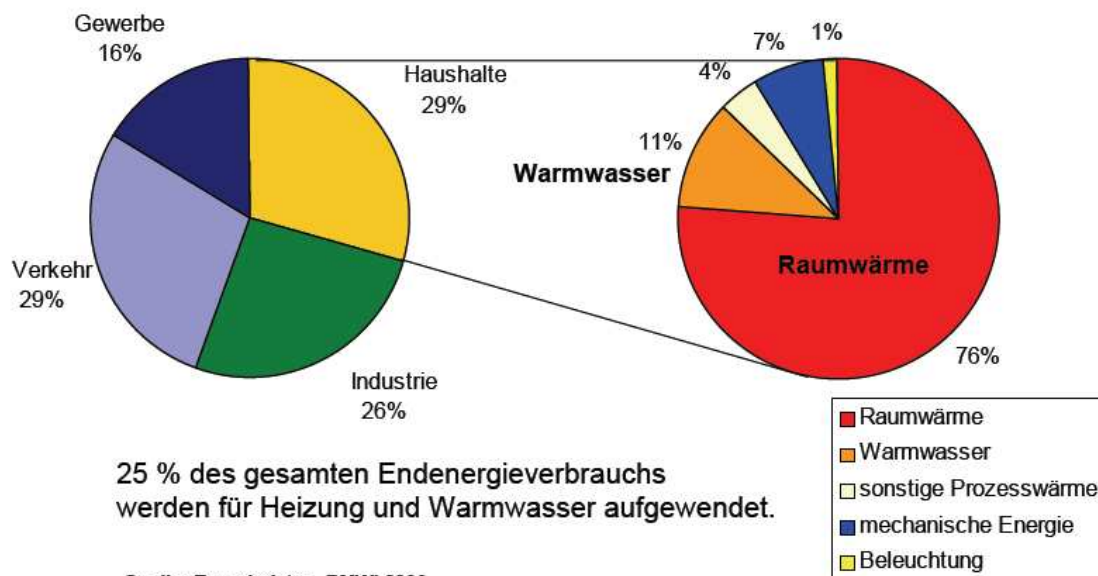


Abbildung 1: Energieverbrauch in Deutschland /1/

1.2 Möglichkeiten und Potentiale der Solarenergie

Die Sonne ist im Prinzip ein riesiges Fusionskraftwerk, in dem Wasserstoff mittels Kernfusion in Helium umgewandelt wird. Die dabei entstehende Energie wird in Form von elektromagnetischer- und Materialstrahlung frei. Täglich werden ca. 360 Milliarden Tonnen Sonnenmaterie in Energie umgewandelt. Bei einer Sonnenmasse von ca. $2 \cdot 10^{27}$ Tonnen ergibt sich eine Lebensdauer von 10^{13} Jahren. Aufgrund dieser Tatsachen kann man die Sonne auch auf lange Sicht als sicheren Energieträger bezeichnen.

Nur ein geringer Teil der von der Sonne abgestrahlten Energie kommt auf der Erde an. Die als Solarkonstante bezeichnete Sonnenstrahlung, die auf der Außenseite der Erdatmosphäre auftrifft, hat eine Intensität von 1367 W/m^2 . /2/

An klaren wolkenlosen Tagen kommen 1000 W/m^2 auf der Erdoberfläche an. Die Sonneneinstrahlung an Wolken bedeckten Tagen beträgt 100 W/m^2 , der andere Teil wird von der Atmosphäre reflektiert und durch in der Luft gebundene Stoffe, wie Wasserdampf oder Staubpartikel absorbiert. Die auf der Erde einfallende und für Solaranlagen nutzbare Strahlung lässt sich in drei Arten unterteilen.

- Direktstrahlung
- Diffusstrahlung
- Reflexionsstrahlung

Als Direktstrahlung bezeichnet man die Art von Strahlung, die direkt bei der Solaranlage ankommt. Die Diffusstrahlung erreicht über Umwege die Solaranlage und wird in ihrer Intensität zum Beispiel durch Wolken oder Nebel geschwächt.

Bei der Reflexionsstrahlung handelt es sich um Sonnenstrahlung, die durch helle Oberflächen, wie Schnee oder weißen Sand oder aber auch durch Wasseroberflächen auf die Solaranlage gelenkt wird.

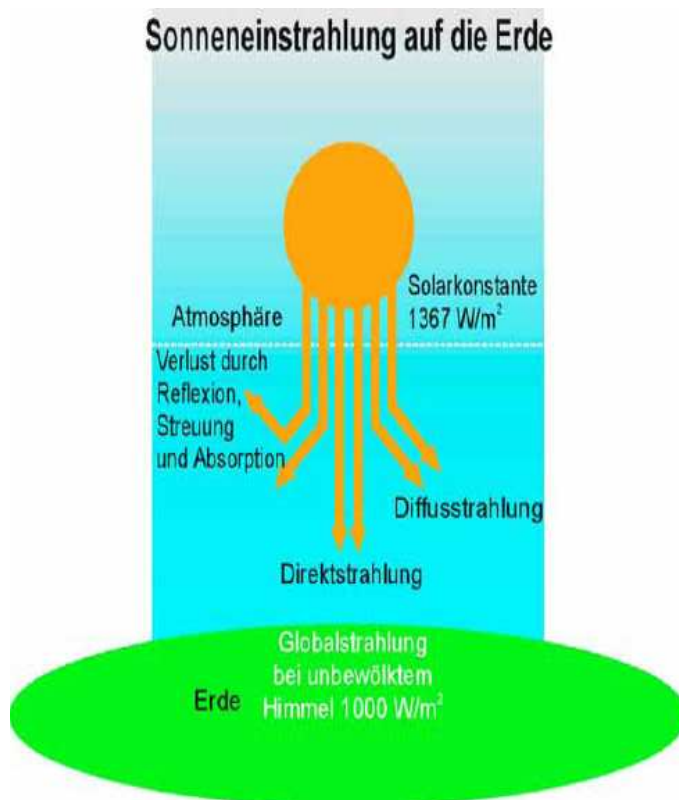


Abbildung 2: Aufteilung der Sonnenstrahlung /3/

Es gibt grundsätzlich drei Arten von Umwandlungsmöglichkeiten, wie die Sonnenenergie auf der Erde nutzbar gemacht werden kann.

| | | |
|-----------------------------|-----------------|---------------------------------|
| Thermische Umwandlung | Aktiv Passiv | Kollektoren Solararchitektur |
| Photoelektrische Umwandlung | Photovoltaik | Solarzellen |
| Photochemische Umwandlung | Photosynthese | Biomasse |

Der Anteil der solarunterstützten Beheizung und Trinkwassererwärmung ist in den letzten Jahren beträchtlich gestiegen. Im Jahr 2005 wurden in Deutschland 100.000 Solarwärmeanlagen neu installiert, 25 % mehr als im Jahr 2004.

Insgesamt kamen 950.000 m² Solarkollektoren mit einer Wärmeleistung von 665 MW neu auf die Dächer. Es wurden seit 1990 6,7 Mio. m² Sonnenkollektoren auf 800.000 Anlagen verteilt und mit einer Leistung von rund 4.700 MW installiert. So konnten die Kosten für eine solarthermische Anlage seit 1990 um 40 % gesenkt werden.

Trotz dieses enormen Wachstums gibt es beim Anteil solarer Wärmeerzeugung in Deutschland auch weiterhin enorme Ausbaumöglichkeiten. Bisher wurde in den meisten Fällen lediglich eine solarunterstützte Trinkwassererwärmung eingebaut, in den letzten Jahren wurden jedoch auch immer mehr Solaranlagen mit zusätzlicher Heizungsunterstützung realisiert. /4/

Die Voraussetzungen sind gerade für die solarunterstützte Beheizung von Gebäuden günstig. Durch verbesserte Wärmedämmung und Heizsysteme mit geringen Systemtemperaturen, kann der solare Deckungsanteil erheblich gesteigert werden.

Auch die ständig steigenden Energiepreise und die große Zahl modernisierungsbedürftiger Gebäude in Deutschland werden dazu führen, dass die Solarenergienutzung in Deutschland weiter ansteigt. Gerade im Bereich der Gebäudebeheizung kann die Solarenergie gut genutzt werden, da hier anders wie im Straßenverkehr das Problem der Energiespeicherung mit Pufferspeichern gelöst werden kann.

Auch der Umstand des steigenden Marktes bei der Beheizung mit Biomasse kann zu einer verstärkten Nutzung der Solarwärme führen. Diese beiden Systeme lassen sich sehr gut miteinander kombinieren, da beide Pufferspeicher benötigen und sie sich damit gut ergänzen können. Im Sommer wird keine Biomasseheizung benötigt und im Winter können die Kollektoren zusätzlich Wärme liefern und so Brennstoff sparen.

2 Solarkollektoren

2.1 Prinzipielle Vorgänge im Kollektor

Um Kollektoren verschiedener Arten richtig energetisch bewerten zu können, müssen zunächst einige grundlegende Begriffe und ihre Zusammenhänge geklärt werden.

Ein Kollektor wandelt die Strahlungsenergie der Sonne in Wärme um und leitet diese an ein Wärmeverteilsystem weiter. Zur Bewertung der Effizienz eines Kollektors dient der Kollektorwirkungsgrad. Dieser gibt das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand an.

Zwei unterschiedliche Kollektoren können anhand des Wirkungsgrades jedoch nur dann miteinander verglichen werden, wenn dieser mit den exakt gleichen Bedingungen ermittelt wurde.

$$\eta_{Koll} = \eta_0 - k_1 \cdot \frac{\Delta T}{E_{glob.}} - k_2 \cdot \frac{\Delta T^2}{E_{glob.}}$$

Der Konversionsfaktor η_0 , berücksichtigt die optischen Verluste in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels. Die Wärmedurchgangsfaktoren k_1 und k_2 zusammen mit der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Umgebungs- und Fluidtemperatur ΔT und der Globalstrahlung E_{glob} berücksichtigt die thermischen Verluste des Kollektors. Bei einer Änderung von ΔT und E_{glob} ändert sich auch der Wirkungsgrad des Kollektors.

Der Wert für die wirksame Globalstrahlung auf den Kollektor lässt sich über eine Gleichung, die die verschiedenen Faktoren berücksichtigt, berechnen. Neben der Möglichkeit der Berechnung kann der Wert der Globalstrahlung für bestimmte Ausrichtungen und Neigungen auch aus der in der DIN 4108 Blatt 6 aufgeführten Tabelle entnommen werden.

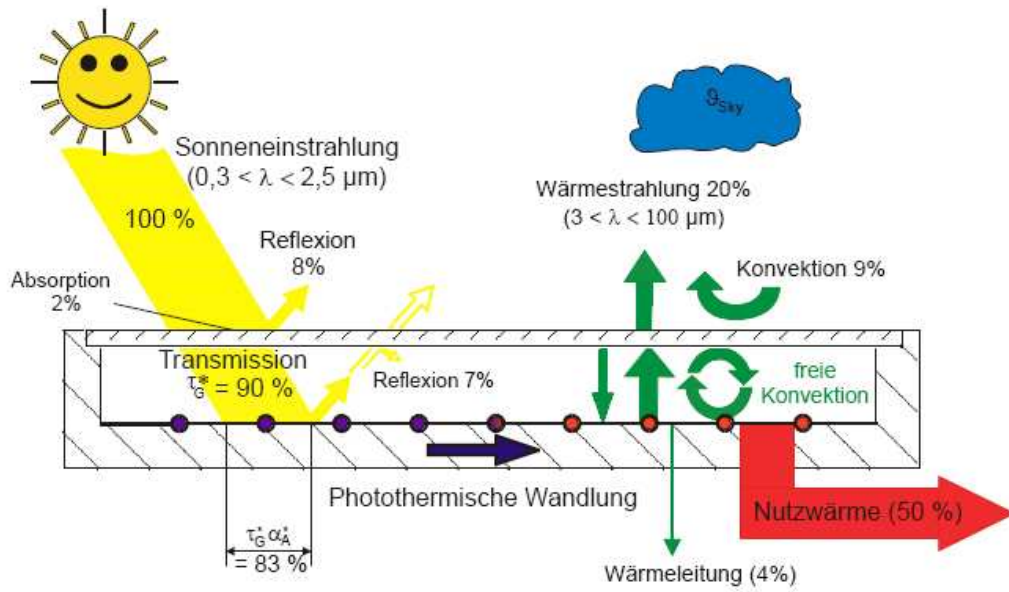


Abbildung 3: Vorgänge am Kollektor /5/

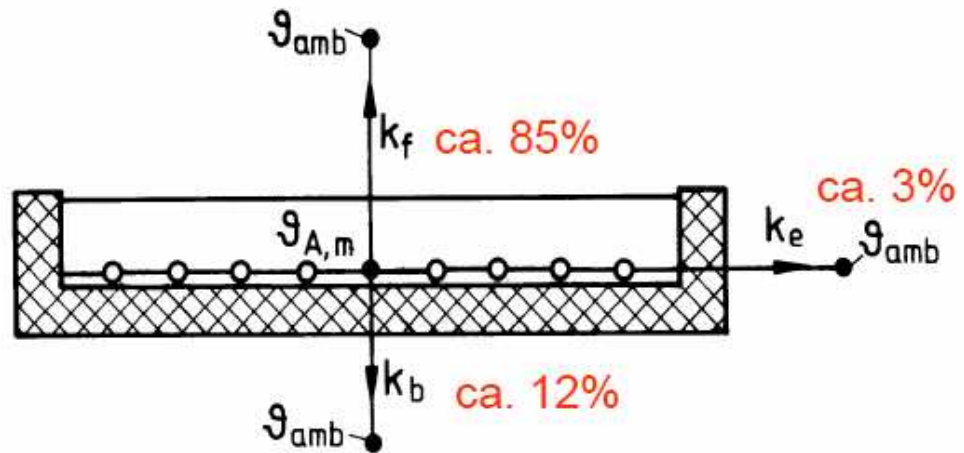


Abbildung 4: Kollektorverluste /6/

2.2 Definition der zur Berechnung notwendigen Winkel

- Sonnenhöhenwinkel β
- Sonnenazimutwinkel Ψ_S
 $\Psi_S < 0$: vormittags
 $\Psi_S > 0$: nachmittags
- Zenitwinkel θ_Z
- Kollektorazimut Ψ_K
 $\Psi_K < 0$: Ost
 $\Psi_K > 0$: West
- Kollektoranstellwinkel γ

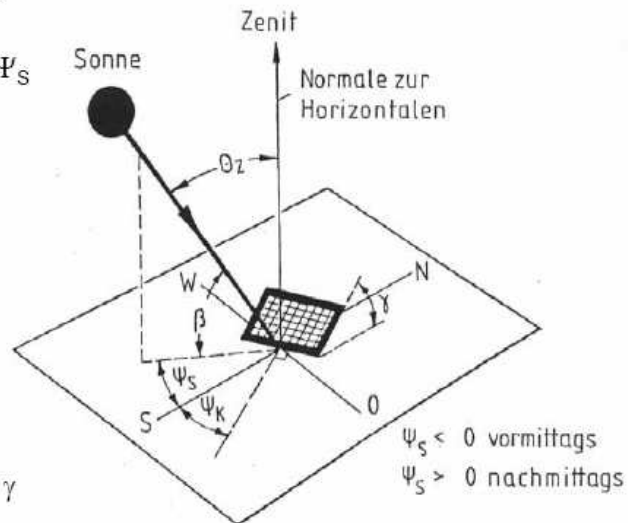


Abbildung 5: Winkeldefinition /7/

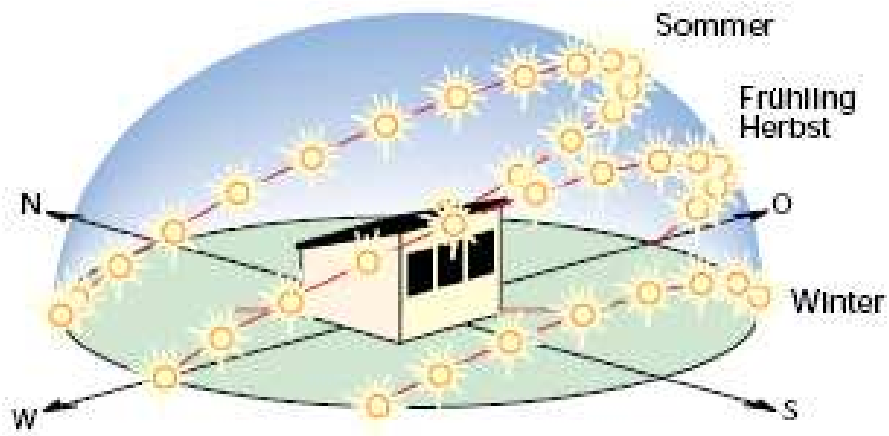


Abbildung 6: Sonnenstanddiagramm /8/

2.3 Vergleich verschiedener Kollektorarten zur solaren Wärmeerzeugung

Man unterscheidet drei Arten von Kollektoren:

- Schwimmbad-Absorber
- Flachkollektor
- Vakuumröhrenkollektor

2.3.1 Der Schwimmbad-Absorber

Es handelt sich bei einem Schwimmbad-Absorber um einen reinen Absorber, ohne Abdeckung und Dämmung. Er kann bei höheren Umgebungstemperaturen die höchsten Wirkungsgrade erzielen, da die Verluste durch die transparente Abdeckung entfallen. Andererseits hat er bei kälterer Umgebungstemperatur hohe Verluste durch Konvektion sowie Wärmestrahlung an der Oberfläche des Kollektors.

Der Absorber besteht aus einer schwarzen Kunststoffkautschukmatte, die mit wasserdurchströmten Rohren durchzogen ist. Ihr Einsatzgebiet ist der untere bis mittlere Temperaturbereich.

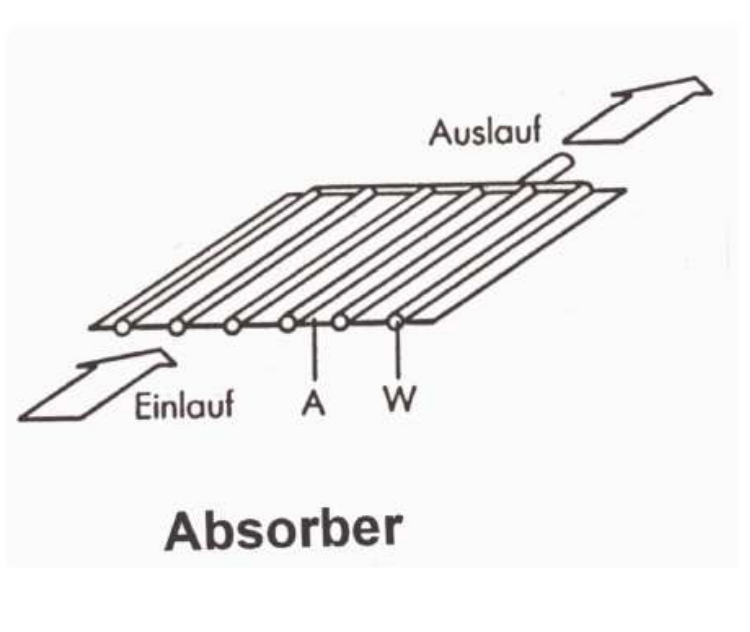


Abbildung 7: Schwimmbadabsorber /9/

2.3.2 Der Flachkollektor

Bei einem Flachkollektor werden die auftretenden Transmissionsverluste durch eine transparente Abdeckung sowie durch einen Rahmen und eine Rückwand mit Isolierung verringert. Im Inneren befinden sich kleine, mit einem Wärmeträgermedium durchströmte Rohre, die mit so genannten Absorberblechen verbunden sind.

Diese Bleche bestehen meist aus Kupfer oder Aluminium mit einer selektiven Beschichtung. Die selektive Beschichtung hat dabei eine ähnliche Funktion wie die schwarzen Oberflächen von Schwimmbad-Absorbern. Sie absorbieren einen Großteil der Solarstrahlung und wandeln diese in Wärme um.

Bei den heute in der Regel verwendeten hochselektiven Beschichtungen ist die Infrarotabstrahlung des Absorbers wesentlich geringer als bei den herkömmlichen Solarlack- oder Schwarzchrom-Absorbern. Diese Verbesserung bei den Abstrahlverlusten wird durch Materialien erreicht, die in der zur Sonne gerichteten Oberfläche hin zunehmend weniger Metallcharakter aufweisen. So besteht die oberste Schicht zum Beispiel aus Quarz und ist eine Antireflexionsschicht. Als Schutz für die Beschichtung dient eine metallische Legierung. Über den Absorber ist eine Glasabdeckung angebracht. Um den solaren Ertrag zu maximieren, muss soviel Sonnenenergie wie möglich die Abdeckung ungehindert passieren. Mit einem geringen Anteil an Eisenoxid (FeO_3) im Glas, kann das Transmissionsverhalten wesentlich verbessert werden.

Das standardmäßig verwendete Solarglas zeichnet sich durch seinen geringen Anteil an Eisenoxid aus und erscheint bei seitlicher Betrachtung weiß, weshalb auch die Bezeichnung Weißglas verwendet wird.

Die Transmission von Solarglas ohne zusätzliche Maßnahmen beträgt ca. $\tau = 0,91$.

Eine weitere Erhöhung der Transmission ist durch das Aufbringen von Antireflexschichten möglich, so dass bis zu 97 % der Strahlung in den Kollektor gelangen. /10/

Ein weiterer wichtiger Anspruch an das Solarglas ist eine hohe Stabilität, sowie eine große Zug- und Druckfestigkeit. Die Verluste durch Konvektion und Wärmestrahlung lassen sich durch die richtige Abdeckung und Isolation des Kollektors, sowie hochselektiv beschichtete Absorberbleche wesentlich verringern.

Eine weitere Verringerung der Wärmeverluste kann durch ein Vakuum im Inneren des Kollektors erzeugt werden.

Ein Flachkollektor hat vielseitige Montagemöglichkeiten. Er kann sowohl als Indach- als auch als Aufdach-Version montiert werden. Es gibt heute aber auch die Möglichkeit eines in die Hausfassade integrierten Flachkollektors. Dach- und Fassadenintegration haben den Vorteil, dass so die Wärmeverluste über die Seiten- und Rückwand nochmals verringert werden. Außerdem entfallen bei der Indachmontage die Kosten für die sonst dort angebrachten Dachziegel.

Das Einsatzgebiet eines Flachkollektors liegt im mittleren Temperaturbereich, zum Beispiel zur Trinkwassererwärmung und zur Heizungsunterstützung.

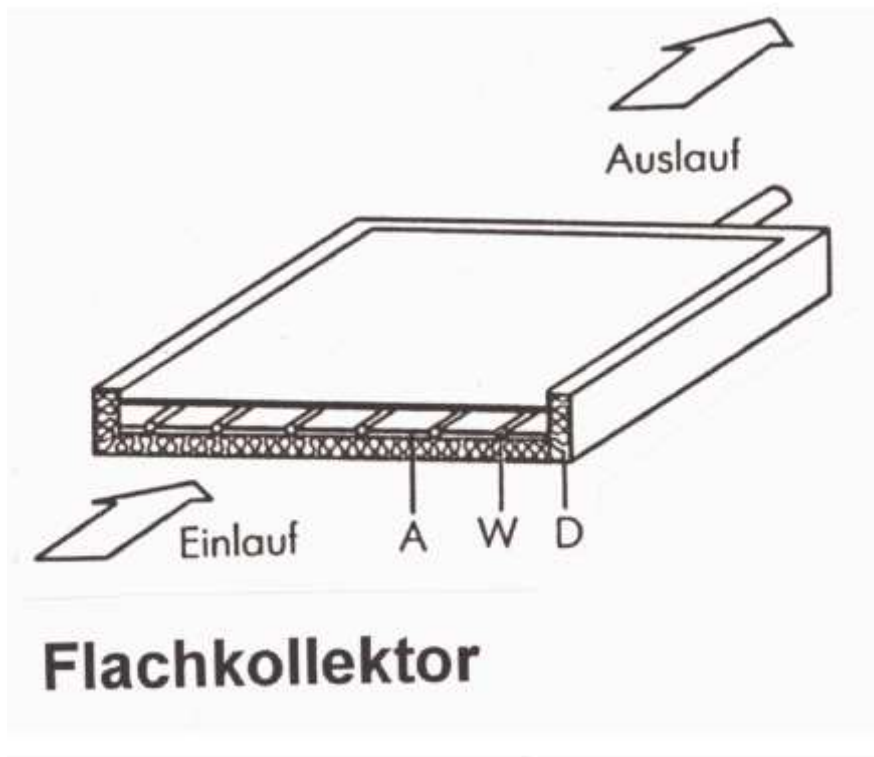


Abbildung 8: Flachkollektor /11/

2.3.3 Vakuumröhre

Bei Vakuumröhrenkollektoren unterscheidet man zwischen direkt durchströmten Röhren und der so genannten „Heatpipe“.

Grundsätzlich funktioniert ein Vakuumröhrenkollektor ähnlich wie ein Flachkollektor, auch er hat einen selektiv beschichteten Absorber, der von einem Wärmeträgermedium durchströmt wird. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass sich die Absorber in einzelnen aneinander gereihten Glasröhren befinden, in denen ein Vakuum herrscht.

Das Vakuum dient dabei als Isolierung gegen Wärmeverluste am Kollektor. Die direkt durchströmte Röhre wird durch ein Doppelrohr, das mit dem Absorberblech verbunden ist, von einem Glykol-Wassergemisch durchströmt.

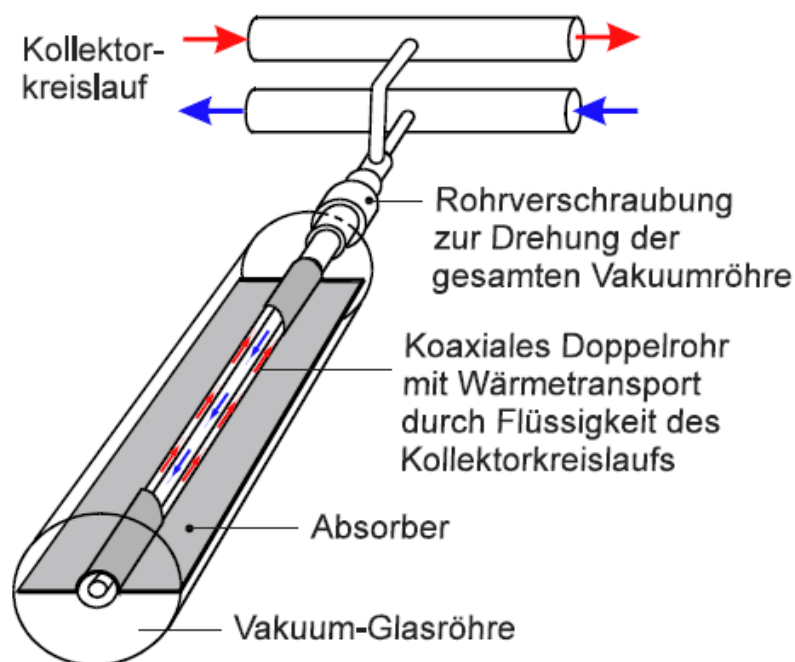


Abbildung 9: Vakuumröhre /12/

2.3.4 Vakuumröhre mit „Heatpipe“

Beim „Heatpipe-Prinzip“ wird ein Wärmeträger in der Vakuumröhre verdampft und über einen Wärmetauscher an der oberen Seite des Kollektors geleitet. Dort wird die Wärme an ein Glykol-Wassergemisch übertragen. Dabei kondensiert der Wärmeträger so, dass zusätzlich die Enthalpie, die durch den Phasenwechsel entsteht, genutzt werden kann.

Beide Arten kommen im Hochtemperaturbereich, beispielsweise zur Prozesswärmeerzeugung, aber auch im mittleren Temperaturbereich zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung zum Einsatz.

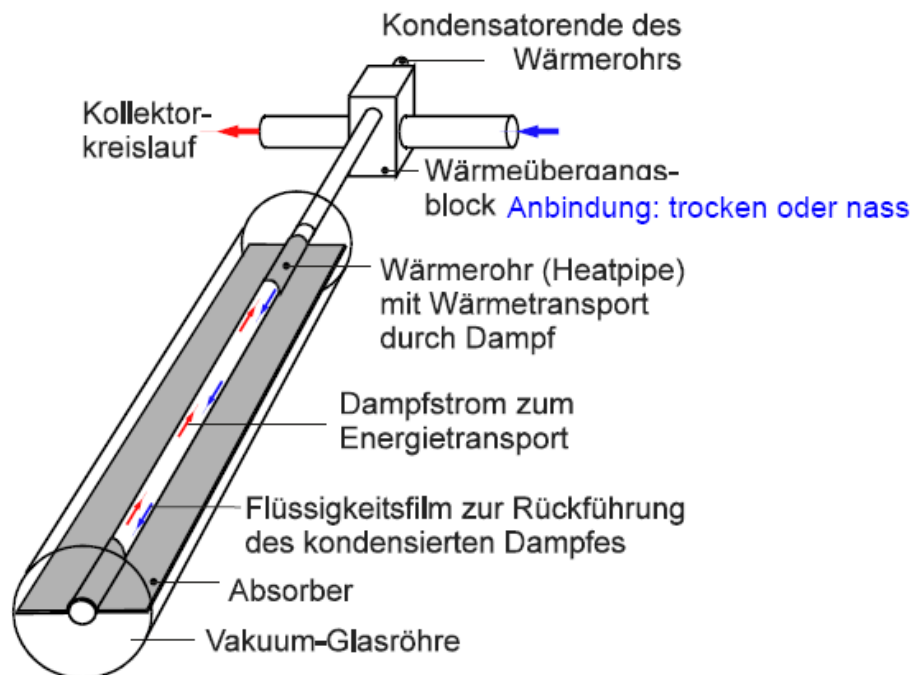


Abbildung 10: Vakuumröhre mit „Heatpipe“ /13/

2.3.5 Vakuumkollektor mit Sydney-Röhre und CPC-Reflektor

Ein Vakuumröhrenkollektor mit Sydney-Röhre und CPC-Reflektor ist ähnlich wie ein normaler Röhrenkollektor vom Wärmeträgermedium durchströmt. Jedoch ist der Aufbau der Röhre wesentlich aufwändiger.

Die äußere Röhre ist gleich wie beim Vakuumröhrenkollektor, danach folgt ein Ringspalt in dem ein Vakuum herrscht, dann kommt die innere Glasröhre mit selektiver Beschichtung.

Direkt an der inneren Röhre befindet sich ein Wärmeleitblech, dass an der Innenwand der inneren Glasröhre angebracht ist. Diese Wärmeleitbleche sind mit den durchströmten Doppelrohren verbunden und leiten die Wärme an das Wärmeträgermedium im Inneren. Im Halbkreis um die Röhre ist der CPC-Reflektor angebracht, an diesem reflektieren die sonst vorbeigehenden Sonnenstrahlen und werden zusätzlich auf den Absorber geleitet.

Der Kollektor ist vor allem im Hochtemperaturbereich im Einsatz, zum Beispiel bei der Prozesswärmeerzeugung.

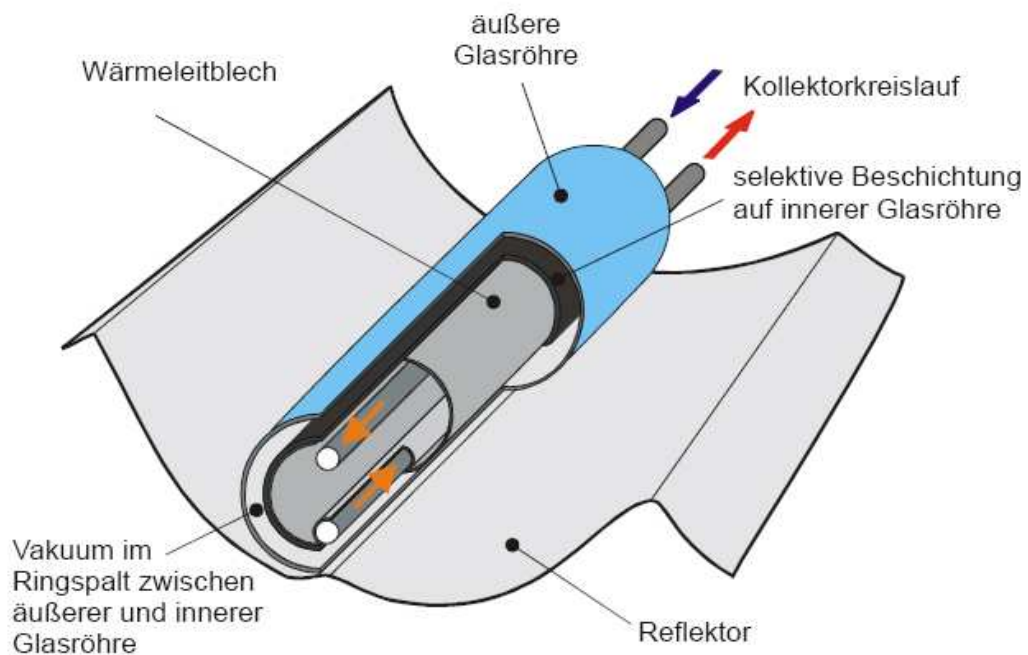


Abbildung 11: Vakuumkollektor mit Sydney-Röhre und CPC-Reflektor /14/

2.3.6 Wirkungsgradkennlinien der einzelnen Kollektorarten

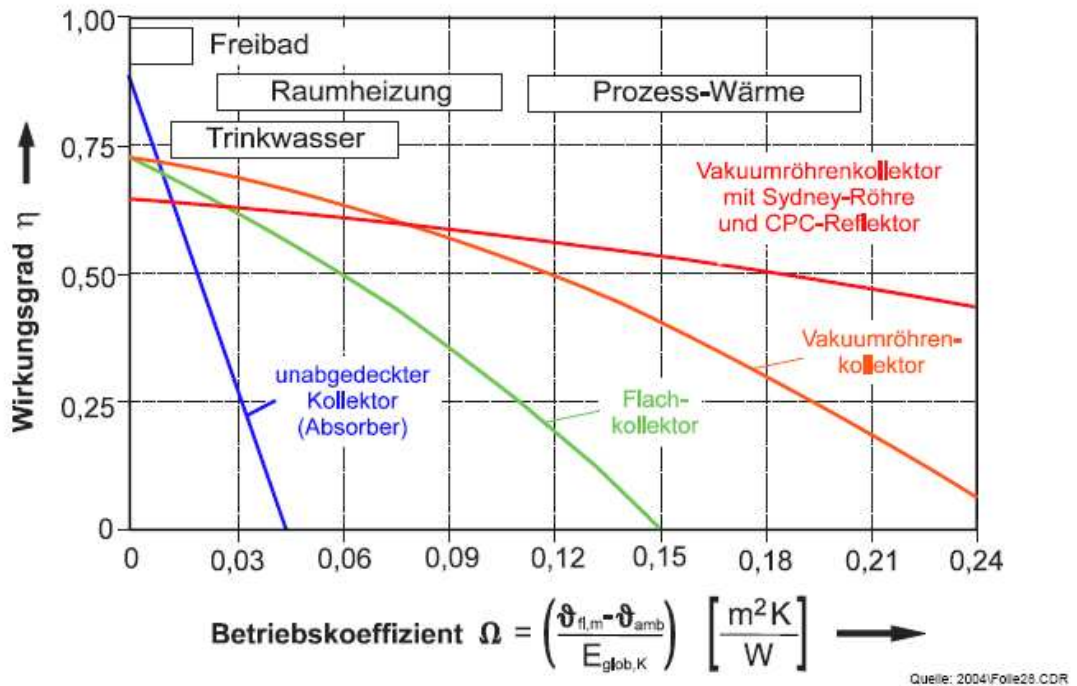


Abbildung 12: Wirkungsgradkennlinien verschiedener Kollektorarten /15/

2.3.7 Nutzung konzentrierter Sonnenstrahlung

Wie bei der Sydney Röhre mit CPC-Reflektor wird auch bei dieser Art der solaren Energienutzung die konzentrierbare Direktstrahlung der Sonne mit einem parabelförmigen Spiegel gebündelt. Dieser konzentrierte Sonnenstrahl wird dann auf einen Absorber gelenkt.

Durch die Bündelung der Sonnenstrahlung können am Absorber sehr hohe Temperaturen erreicht werden, daher eignet sich diese Technik vor allem zur Prozesswärmeerzeugung.

Da jedoch nur die Direktstrahlung konzentriert werden kann und in unseren Breitengraden der Diffusstrahlungsanteil bei durchschnittlich 50 % liegt, kommt diese Technik vorwiegend in den südlichen Regionen Europas, in den Wüstenregionen Amerikas und auch in Afrika zum Einsatz.

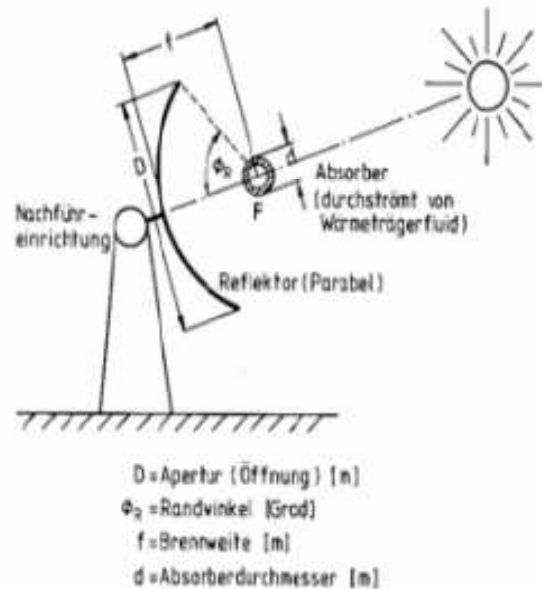


Abbildung 13: Sydney-Röhre mit CPC-Reflektor zur Prozesswärmeerzeugung /16/

3 Solarspeichersysteme

Der Wärmespeicher einer Solaranlage spielt eine zentrale Rolle. Er wird dazu genutzt die Unterschiede zwischen solarem Ertrag und ihrem Bedarf zu überbrücken. Außerdem können über ihn die bei solarthermischen Anlagen im Sommer auftretenden Leistungsspitzen abgefangen und bei Bedarf genutzt werden. Gleichzeitig wird er als hydraulische Entkopplungsmöglichkeit genutzt, um den in unseren Breiten erforderlichen, mit Frostschutzmittel versetzten Solarkreislauf, vom Heizverteilsystem zu trennen.

Speicher werden unter anderem in der Dauer ihrer Speicherung unterschieden. Es gibt Kurzzeitspeicher, die in der Regel dazu gedacht sind, eine Überbrückung des Angebotes von einigen Stunden zu gewährleisten. Außerdem gibt es noch Langzeitspeicher mit einer Überbrückungsdauer von mehreren Tagen, sowie saisonale Speicher, die eine Überbrückung von mehreren Monaten gewährleisten können. Je nach Nutzungsart werden die einzelnen Speicherarten eingesetzt.

So kann beispielsweise ein Kurzzeitspeicher zur solaren Trinkwassererwärmung eingesetzt werden, da hier ein jährlich nahezu konstanter Bedarf vorhanden ist. Die Kollektorfläche kann besser an den Bedarf angepasst werden.

Langzeit- und saisonale Speicher werden meist bei Anlagen zur Heizungsunterstützung und Warmwassererzeugung eingesetzt. Diese können bei länger anhaltenden Schlechtwetterperioden die Heizlasten mittels der Überschüsse von sonnigen Tagen abdecken. Das unten gezeigte Schaubild veranschaulicht den gegebenen Unterschied zwischen dem Wärmeangebot und dem Bedarf bei solarer Wärme Gewinnung.

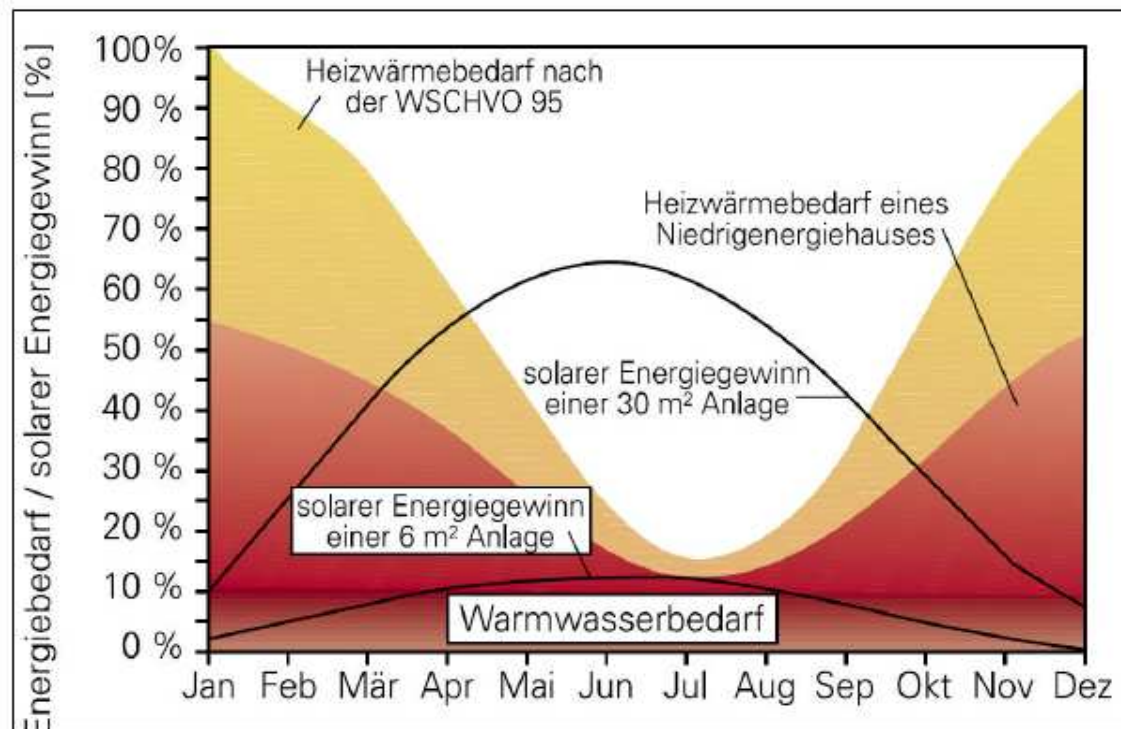


Abbildung 14: Jahreszeitlicher Verlauf des Heizenergiebedarf und Sonnenenergieangebot /17/

Als Speichermedium kommen mehrere Materialien in Frage. Die Vorteile von Wasser bei der Kurz- und Langzeitspeicherung sind jedoch so groß, dass in der Regel Wasser als Speichermedium benutzt wird. Wasser ist praktisch überall verfügbar, hat eine sehr hohe spezifische Wärmekapazität, ist ökologisch unbedenklich und günstig in der Anschaffung.

Bei der saisonalen Wärmespeicherung kommen neben Wasser auch andere Speichermedien zum Einsatz.

- Kies-Wasserwärmespeicher
- Erdspeichersysteme
- Aquiferspeichersysteme

3.1 Kies-Wasserwärmespeicher

Diese sind in die Erde eingelassene Speicher. Sie bestehen von außen nach innen aus einer Dämmschicht, die oft aus Schaumglasschotter oder ähnlichem Material besteht und außerdem mit einer wasserdichten Folie zur Abdichtung ausgestattet ist.

Im Inneren befindet sich eine Füllung aus einem Kies-Wassergemisch, das mit wasserdurchströmten Rohren durchsetzt ist.

Das heiße Wasser in den Rohren kommt vom Wärmeerzeuger und gibt seine Wärme an das Kies-Wassergemisch ab. Hierbei sorgt der Kies für eine Stabilisierung der unterirdischen Wärmespeichergrube, so dass keine tragende Deckenkonstruktion benötigt wird. Durch die im Vergleich zu Wasser geringe Wärmespeicherfähigkeit des Kiesel, benötigen die Speicher ein größeres Volumen als Speicher mit reinem Wasser als Speichermedium. Typische Speichergrößen liegen zwischen 1000 und 10.000 m³.

3.2 Erdspeichersysteme

Erdspeicher haben prinzipiell dieselbe Funktion.

Hier werden Wärmeübertragungsrohre über Bohrungen ins Erdreich geführt und so die Wärme an die umgebende Erde übertragen. Eine Wärmedämmung, wie beim Kies-Wasserspeicher ist dabei nicht vorhanden. Manchmal wird jedoch ein Wärmeschutz nach oben durch eine Isolierschicht realisiert. Typische Größen sind 10.000 - 100.000 m³.

3.3 Aquiferspeichersystem

Aquiferspeicher nutzen das Grundwasser. Im Sommer wird in das unterirdische Wasserreservoir Wärme eingebracht, die im Winter entnommen wird. Sie können auch zur Bevorratung von Kaltwasser zur Kühlung dienen. Sie werden ebenfalls in einer Größenordnung von 10.000 - 100.000 m³ eingesetzt.

Latentwärmespeicher machen sich im Gegensatz zu den sonstigen Speicherarten nicht nur die fühlbare, sensible Wärme zu nutzen, sie können darüber hinaus auch die Energie, die beim Phasenübergang von der flüssigen in die feste Phase entsteht, nutzbar machen. Es gibt hierbei Eis-Wasser-Speicher oder Speicher mit einem Paraffinmedium. Bei Eis-Wasser-Speichern ist jedoch wegen des tiefen Temperaturniveaus eine Wärmepumpe, die das Niveau anhebt, erforderlich. Die Speicherung mit Paraffinen befindet sich noch in der Testphase. Sie kann je nach Zusammensetzung des Paraffins ein Temperaturniveau von 40°C bis 60°C erreichen.

4 Sonnenhäuser

4.1 Geschichte der Sonnenhäuser

„Das Sonnenhaus kombiniert den Einsatz von Solarthermie, guter Wärmedämmung und einer Biomassenachheizung, eine Freude für jeden Häuslebauer und Sonnenfreund!“
/18/

Das erste überlieferte Sonnenhaus wurde bereits vor über 2400 Jahren von dem griechischen Philosophen Sokrates entwickelt. Sein Prinzip: „Nach Süden breit und offen, nach Norden schmal und geschlossen“.

Der Dachüberstand und damit die Verschattung, richten sich nach den jeweiligen Sonnenständen der Jahreszeiten. Diese Grundsätze haben auch heute noch Gültigkeit.

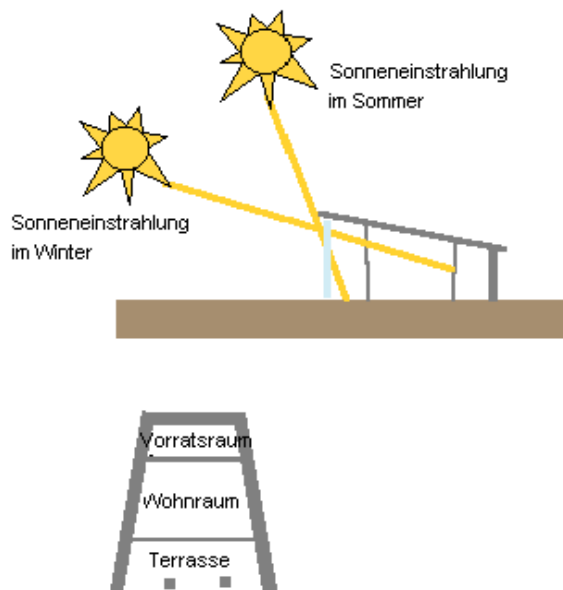


Abbildung 15: Sonnenhaus des Sokrates /19/

Das erste völlig solar versorgte Wohnhaus wurde 1989 vom Schweizer Solarpionier Josef Jenni entwickelt und geplant. Das bis heute genutzte Wohnhaus befindet sich in Oberburg bei Burgdorf im Schweizer Mittelland.



Abbildung 16: Oberburger Sonnenhaus /20/

Heute gibt es in Deutschland etwa 100 überwiegend solar beheizte Wohnhäuser, aber auch im Sektor der gewerblich genutzten Gebäude gibt es bereits Erfahrungen mit überwiegend solar beheizten Gebäuden.

Ein Sonnenhaus ist das Zusammenspiel zwischen aktiver Sonnennutzung durch Kollektoren und der Zusatzheizung mittels Biomasse. Dabei wird mindestens 50 % des Heiz- und Warmwasserbedarfs durch die Kollektoren gedeckt. Der Rest wird mittels Biomasse, zum Beispiel Scheitholz- oder Pelletheizung zugeheizt.

Das gesamte Konzept basiert auf einer optimalen Ausnutzung der Sonnenenergie in Verbindung mit hohen Energiesparstandards im Bereich der Wärmedämmung. Diese Bedingungen müssen erfüllt sein, um einen möglichst großen solaren Deckungsanteil zu erreichen. Durch eine gute Wärmedämmung kann neben dem Einspareffekt über Flächenheizungen mit niedrigen Heizflächenübertemperaturen auch ein angenehmes Behaglichkeitsgefühl erzeugt werden.

4.2 Technik des Sonnenhauses

Die Sonnenenergie wird über Kollektoren auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und mittels Wärmeträgermedium je nach Bedarf sofort genutzt oder in einem Langzeitwärmespeicher eingelagert.

Die Dimensionierung des Kollektorfeldes und des Speichers ist stark vom gewünschten Deckungsanteil, der Lage und der Art des Gebäudes abhängig. Auch die Ausrichtung und Neigung der Kollektoren spielen hierbei eine entscheidende Rolle. Je nach Größe und solarem Deckungsanteil hat ein Einfamilien-Sonnenhaus eine Kollektorfläche von ca. 25 bis 80 m² und ein spezifisches Pufferspeichervolumen von 120 bis 300 l/m².

Für länger anhaltende Schlechtwetterperioden mit weniger Sonnenschein sollte eine Biomasseheizung vorgesehen werden. Hier eignen sich wegen des geringen Bedarfs Kamin- oder Kachelöfen mit Wasserwärmetauscher. Bei größerem Bedarf können auch Pellet- oder Holzvergaserkessel sinnvoll sein.

Ein Großteil der Sonnenhäuser in Deutschland wurde dabei vom Verband der Solar-Partner und ihren Partnerbetrieben geplant und gebaut. Der Verband der Solar-Partner, früher Verband der Solar-Einkaufsgemeinschaft, ist ein Zusammenschluss von fünf Solarfachbetrieben, zu denen auch die Firma Hartmann Energietechnik gehört.

Gemeinsam mit dem Straubinger Architekt Georg Dasch gründeten sie 2004 das Sonnenhausinstitut mit Sitz in Straubing. Das Sonnenhausinstitut hat die Aufgabe die Verbreitung und Verbesserung der Solartechnik in Deutschland voran zu treiben und so das Sonnenhaus als allgemein gültigen Baustandard zu etablieren. Seit 1998 wurden in Bayern und Baden-Württemberg 50 Neubauten und ca. 25 Altbauumbauten mit Sonnenhausstandard gebaut. /21/

Durch diesen ständigen Erfahrungsaustausch der bereits verwirklichten Projekte können die verschiedenen Systeme im Sonnenhaus ständig optimiert werden.

5 Das Sonnen-Zentrum

Das Sonnen-Zentrum in Rottenburg-Oberndorf wurde 2006 fertig gestellt. Es wird als gewerbliches Gebäude mit privatem Wohnbereich genutzt. Es ist nach dem Vorbild des Sonnenhauses von Sokrates gebaut und hat ein um 3° nach Norden geneigtes Pultdach. So kann die nach Süden ausgerichtete Seite durch große Fensterflächen im Winter eine maximale passive Sonnenausnutzung gewährleisten. Im Sommer, wenn die Sonne höher am Himmel steht, schützt das weit ausgelegte Vordach durch Verschattung der Fensterflächen vor einer Überhitzung des Innenraumes. Auf der Nordseite des Gebäudes ist die Wandfläche durch das geneigte Pultdach wesentlich kleiner. Dadurch können die Wärmeverluste des Gebäudes minimiert werden.

Der gewerblich genutzte Teil im Erdgeschoss gliedert sich in einen Gastronomie- und Büroteil, sowie in einen Werkstatt- und Lagerhallenbereich. Eine Wohnung und weitere Büros befinden sich im Obergeschoss des Gebäudes. Im Keller sind Lagerräume und die Technikzentrale untergebracht.

5.1 Anlage im Sonnen-Zentrum

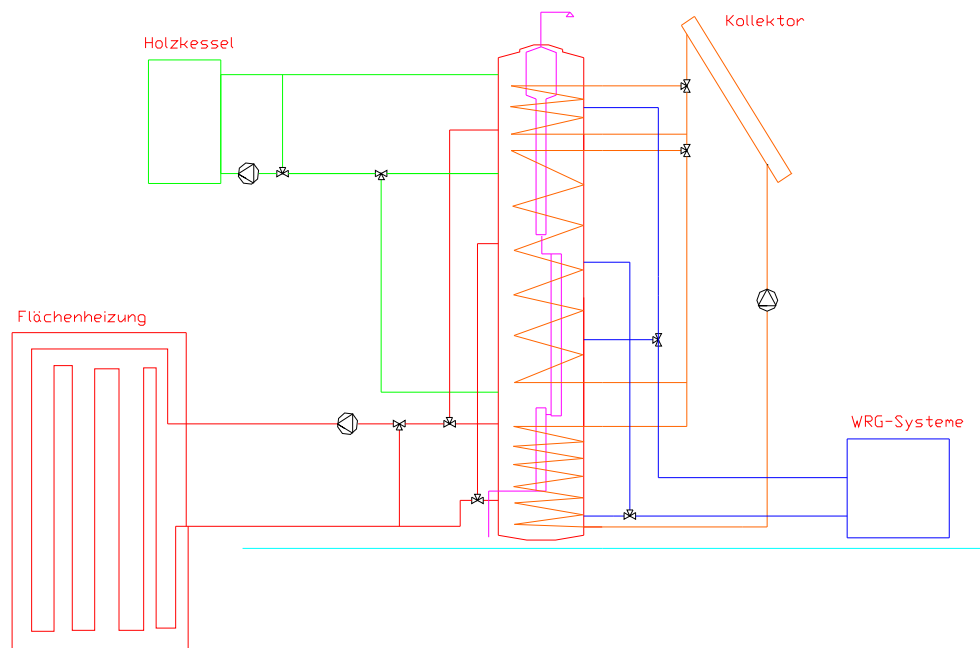


Abbildung 17: Schema der Anlage im Sonnen-Zentrum



Abbildung 18: Sonnen-Zentrum Süd-Ost-Ansicht /21/

Der große Langzeit-Wärmespeicher befindet sich im Eingangsbereich des Sonnen-Zentrums und erstreckt sich über alle drei Stockwerke des Gebäudes.

Mit einer Höhe von 9,25 m, einem Durchmesser von 1,7 m und einem Fassungsvermögen von knapp 20.000 Litern ist er im Eingangsbereich mit einer Wendeltreppe ins Obergeschoss kombiniert.



Abbildung 19: Pufferspeicher; Foyer Sonnen-Zentrum /22/

Die Heizlast des gesamten Gebäudes wird über Flächenheizungen und eine Betonkernaktivierung gedeckt. Das Gebäude nutzt durch seine Bauweise zusätzlich die großen, nach Süden ausgerichteten Fensterflächen für eine passive Nutzung der Sonnenenergie.

Im Eingangsbereich befindet sich eine kleine Ausstellung mit Produkten aus dem Sonnen-Zentrum.

Der Bürobereich im Erdgeschoss und der Produktionsbereich wird von der Hartmann Energietechnik genutzt. In der Produktionshalle wird die Beheizung über Betonkernaktivierung realisiert. Die Betonkernaktivierung wurde mit einem 3500 m Fußbodenheizungsrohr auf 744 m² Fläche in die Bodenplatte gebaut. Darunter befindet sich eine 30-50 cm Schotterschicht als Speichermasse und darunter zur Minderung der Verluste eine Schicht aus Schaumglasschotter.

Der Wohnbereich im Obergeschoss des Sonnen-Zentrums wird mit einer Fußbodenheizung und mit Wandheizflächen erwärmt. Außerdem befindet sich im Obergeschoss noch ein weiterer Bürobereich. Insgesamt hat das Sonnen-Zentrum 1654,5 m² beheizte Grundfläche.

Die Fensterflächen bestehen aus einer Dreifachverglasung mit einem U-Wert von 0,5 W/m²K. Auch bei der Außenwand wurde darauf geachtet, dass die Wärmeverluste klein gehalten werden. Sie besteht aus einer Holzbalken Ständerkonstruktion mit einem durchschnittlichen U-Wert von 0,2 W/m²K. Das gesamte Gebäude wird, laut Gebäudesimulation zu 80 % solar beheizt.

Zu diesem Zweck befindet sich an der Südfassade ein 150 m² großer Fassadenkollektor mit einer ca. 70° Neigung zur optimalen Ausnutzung der Wintersonne.



Abbildung 20: Fassadenkollektor des Sonnen-Zentrums /23/

Außerdem befindet sich auf dem ca. 2000 m² großen Dach des Gebäudes eine Solarstromanlage mit einer Gesamtleistung von 58 kWp. Der Rest-Wärmebedarf im Sonnen-Zentrum wird über einen Scheitholzvergaserkessel und einen Pelletofen im Foyer gewährleistet



Abbildung 21: Luftbild Sonnen-Zentrum mit Photovoltaik-Anlage /24/

5.2 Flächen und Verbrauchsdaten

Das gesamte Gebäude hat einen Norm-Wärmebedarf von 61,3 kW und eine gesamte Nutzfläche von 1654 m². Daraus ergibt sich ein spezifischer Wärmebedarf von 37 W/m².

Eine genaue Berechnung der Heizlast und der Nutzflächen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Sie wurde von der Firma Hartmann Energietechnik zur Verfügung gestellt.

5.3 Wärmeerzeugung

5.3.1 Kollektoranlage

Bei den Kollektoren, die im Sonnen-Zentrum die Strahlungsenergie der Sonne in Wärme umwandeln, handelt es sich um Flachkollektoren vom Typ Solar Hochleistungsflachkollektor, kurz HFK, der Sun-Pro GmbH. Die Holzrahmen werden mit einer Blecheinfassung gegen die Witterung geschützt.

Das 150 m² große Kollektorfeld ist in die 30° nach Süd-Osten ausgerichtete Fassade des Sonnen-Zentrums mit einem Anstellwinkel von 70° integriert. Der Kupferabsorber im Inneren des Kollektors mit einer selektiven TiNOX-Beschichtung hat einen Absorptionsgrad von $\alpha = 0,95$, sowie einem Emissionsgrad von 0,05. Die Dämmung an der Rückseite des Kollektors besteht aus 40 mm dicker Steinwolle. Das Wärmeträgermedium ist wegen des Frostschutzes bei der Kollektordurchströmung ein Wasser-Propylenglykol-Gemisch. Die je zwei Module mit 5 x 3 m wurden übereinander in Reihe, die fünf Gruppen im Tichelmann-System verschaltet.

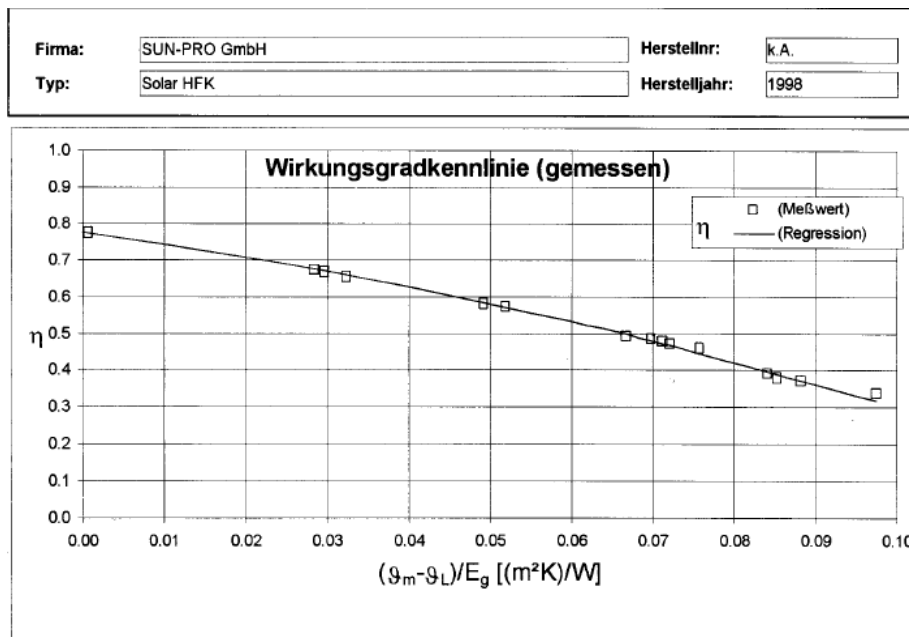


Abbildung 22: Prüfbericht Kollektortest /25/

5.3.2 Holzvergaserkessel

Der Holzvergaserkessel Typ Drummer mit 49 kW thermischer Leistung der Firma Lopper fasst ganze Meterstücke und hat bei einer vollen Füllung des 340 l fassenden Brennraums eine Abbrandzeit von 7 - 9 Stunden, je nach Holzart. Beim Holzvergaserkessel verbrennt das Holz in zwei Phasen. Zunächst erfolgt eine vollständige Trocknung des Brennstoffs. In der ersten Phase des Verbrennungsvorgangs findet eine Vergasung der festen Bestandteile des Holzes statt. In der zweiten Verbrennungsstufe werden dann die noch in den Brennungsgasen übrigen und unerwünschten CO- und Staubbestandteile vollständig bei etwa 1000°C verbrannt. Für einen geringen Anteil an Stickoxiden ist es wichtig, dass die Verbrennungstemperatur dabei nicht zu hoch ist, da es sonst zur thermischen Stickoxidbildung kommt und dadurch ihr Anteil erheblich steigt. Die Temperatur wird durch eine Regulierung der Sekundärluft auf einem konstanten Niveau gehalten.

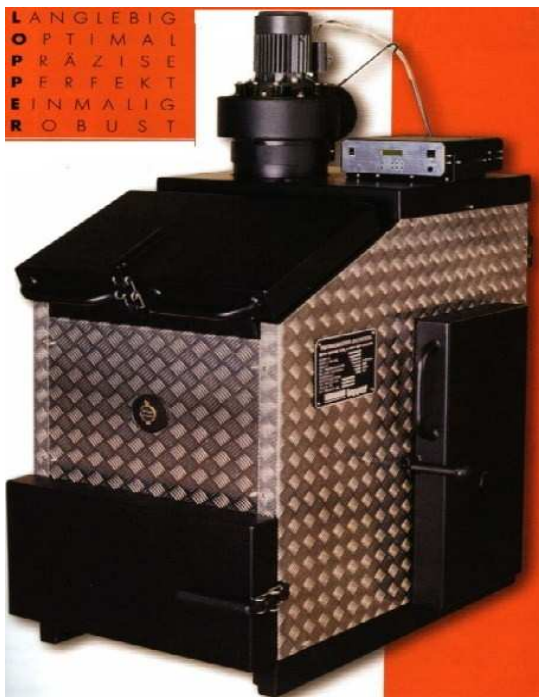


Abbildung 23: Holzvergaserkessel Lopper /26/

5.3.3 Pelletofen

Zusätzlich zum Scheitholzkessel ist noch ein Pelletofen als Wärmequelle an den Pufferspeicher angeschlossen. Der Ofen wird hauptsächlich zu Demonstrationszwecken genutzt. Er befindet sich im Foyer des Gebäudes und hat einen thermischen Leistungsbereich von 3 - 13 kW. Der Pelletofen hat einen integrierten Wasserwärmetauscher und besitzt einen Vorratsbehälter mit einem Fassungsvermögen von 40 kg Pellet auf der Rückseite.



Abbildung 24: ivotec-Pelletofen /27/

5.4 Zusatz Wärmequellen

Neben dem Holzvergaserkessel gibt es im Sonnen-Zentrum noch weitere Wärmequellen, die ebenfalls im Wärmespeicher eingelagert werden. Der Holzbackofen des Gastronomiebetriebes ist mit einem Abgaswärmetauscher ausgestattet. Mit ihm kann die überschüssige Wärme des Backofens als zusätzliche Wärmequelle in den Speicher eingelagert werden.

Auch die Abwärme der Kühlaggregate, die zur Temperierung des Kühlraumes nötig sind, wird über einen Wärmetauscher im Speicher genutzt.

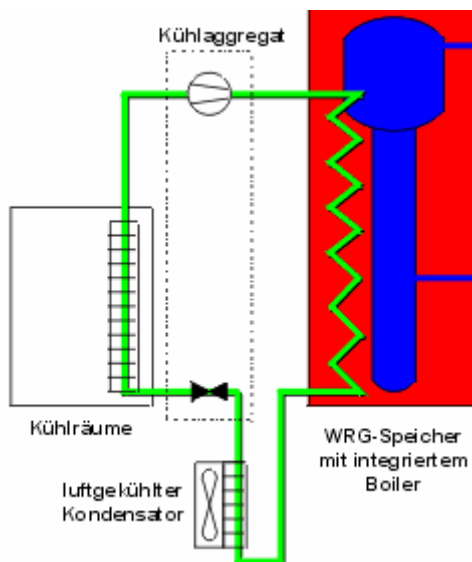


Abbildung 25: Wärmerückgewinnung in den Speicher /28/

5.5 Wärmespeicherung

Das Herz der Wärmeerzeugungsanlage im Sonnen-Zentrum ist der 20.000 l fassende saisonale Wärmespeicher der Firma Jenni Energietechnik AG. Auf seiner gesamten Höhe von 9,25 m kann er an verschiedenen Stellen be- und entladen werden, um eine bestmögliche Schichtung im Speicherinneren zu erhalten und um bei der Entladung möglichst tiefe Temperaturen nutzen zu können. Durch seine schlanke aber hohe Form wird das Einbringen von verschiedenen Temperaturniveaus im Speicher verbessert.

Im Inneren des Speichers befinden sich drei eingebaute Wärmetauscher mit 3 x 36 m oben, 4 x 36 m in der Mitte und 5 x 36 m Rohrlänge unten. Die Wärmetauscher arbeiten nach dem Prinzip der einseitig freien Konvektion. Es handelt sich hierbei um Glattrohrwärmetauscher. Sie erstrecken sich beinahe über die gesamte Speicherhöhe, dies ermöglicht eine Reduzierung der Umwälzmenge im Sonnenkreis, ohne dass der Nutzen sinkt. Die Anlage kann so schneller auf einen Mehrbedarf reagieren. Dies kann durch das im Sonnen-Zentrum angewandte Variflow-Prinzip erreicht werden. Mit den drei übereinander liegenden Wärmetauschern kann die Solarwärme in die oberen, unmittelbar nutzbaren Bereiche gebracht werden. Durch die Öffnung der oberen Wärmetauscherkreise kommt es aufgrund des sich erhöhenden Druckverlustes zu einer Reduzierung des Volumenstroms im Solarkreis, und dadurch zu einer längeren Verweildauer des Glykol-Wassergemisches im Kollektor. Dies hat eine zusätzliche Anhebung der mittleren Fluidtemperatur zur Folge und führt dadurch zu einer Erhöhung der Vorlauftemperatur im Kollektorkreis. Dieser Effekt wird durch die Auslegung der oberen Wärmetauscher auf höhere Druckverluste zusätzlich unterstützt. Die Energiemenge bleibt dabei wegen der Erhöhung des Temperaturunterschiedes bei gleichzeitiger Abnahme des Massenstroms konstant, jedoch kommt es zu einer Verbesserung des exergetischen Nutzens. Dieses Verhalten kann jedoch nur bis zu einer bestimmten Grenze sinnvoll genutzt werden, da sich mit der Verringerung des Volumenstroms auch die für den Wärmeübergang wichtige turbulente Durchströmung des Kollektors zurückbildet.

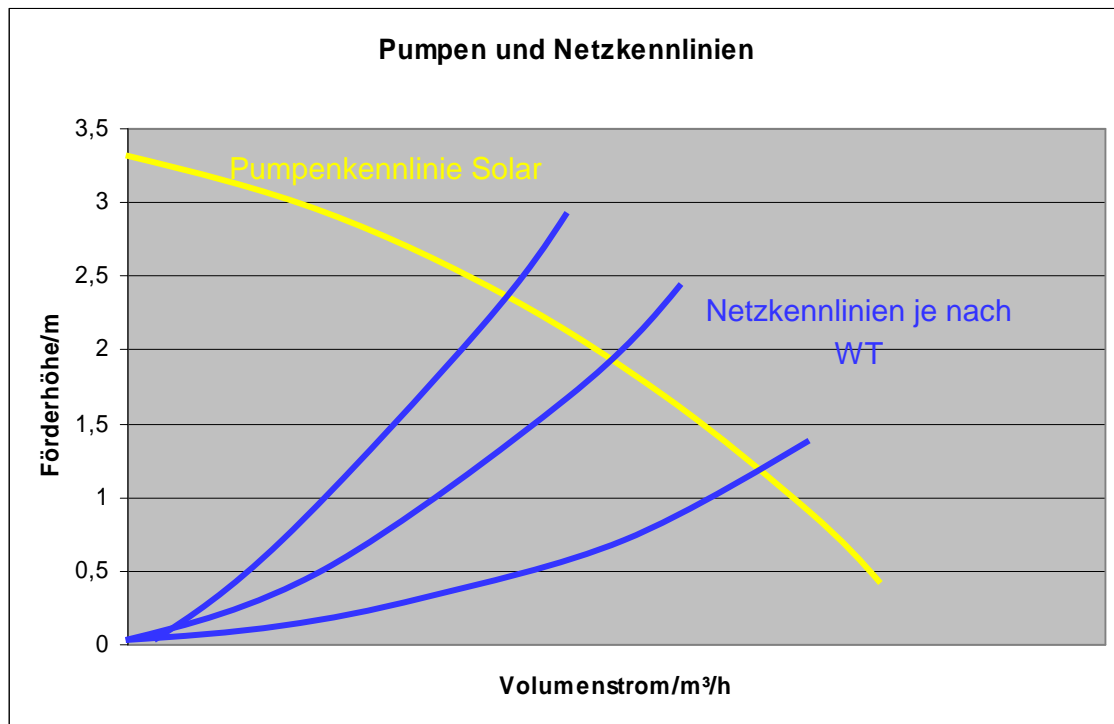


Abbildung 26: Pumpen- und Netzkennlinie Variflow

Ebenfalls im Inneren des Speichers befinden sich drei Trinkwasserspeicher, in denen über beidseitig freie Konvektion Warmwasser erzeugt wird. Diese Art der Wärmeübertragung hat zwar einen geringeren Leistungsbereich als zum Beispiel der einseitig freie oder gar ein externer Gegenstromwärmetauscher, hat aber den Vorteil, dass keine Speicherladepumpe, keine separate Steuerung und keine weitere Installation erforderlich sind. Außerdem ist es energetisch gesehen sinnvoll, da so die Wärme des Heizungswassers ohne weitere Verluste über die gesamte Oberfläche des integrierten Warmwasserspeichers an das Trinkwasser abgegeben werden kann.

Der Boiler arbeitet also nach dem Durchlauf- und dem Speicherprinzip. Aufgrund der Schichtung sollte sich der integrierte Trinkwasserspeicher über die gesamte Höhe des Pufferspeichers erstrecken. Je nach Anwendung und Verbrauch wird der entsprechende Boiler ausgesucht. Bei größerem Warmwasserbedarf, wie im Sonnen-Zentrum, werden beispielsweise mehrere Boiler eingebaut. Dort decken drei verschiedene Boiler den Warmwasserbedarf. Ein Boiler des Typs Rossnagel 3500 mit einem Fassungsvermögen von 285 l und einer Halslänge von 3500 mm, sowie zwei vom Typ Rohrboiler 1500 mit einem jeweiligen Fassungsvermögen von 60 l und einer Länge von 1500 mm.

Es wurden absichtlich drei miteinander verbundene Boiler gewählt, da es technisch nicht möglich ist, einen Boiler über die gesamte Höhe eines Speichers dieses Ausmaßes zu bauen.

Für zusätzliche Wärmequellen stehen außerdem noch mehrere Direktanschlüsse in verschiedenen Höhen zur Verfügung. Im Sonnen-Zentrum werden diese zur Nachheizung mit Holz verwendet. Außerdem sind am Speicher noch zwei Anschlüsse für Wärmerückgewinnungsregister vorgesehen. Zur Sicherheitsgruppe des Speichers gehören neben dem Entlüftungsanschluss auch fünf parallel geschaltete, geschlossene Membran-Ausdehnungsgefäße mit einem gesamten Fassungsvermögen von 2500 l. Generell ist auch eine offene Ausdehnungseinrichtung möglich, diese ist wesentlich günstiger, muss jedoch über dem Speicher angebracht werden. Außerdem kann es zu Problemen mit Sauerstoffeintrag in das System kommen.

Die Entnahme für die verschiedenen Heizkreise erfolgt je nach Angebot im Speicher und Bedarf der Heizkreise aus der entsprechenden Temperaturschicht. Dadurch kann eine optimale Ausnutzung der im Speicher enthaltenen Energie gewährleistet werden. Kommt beispielsweise von der Fußbodenheizung eine Anforderung nach einem 30 °C warmen Vorlauf, erfolgt die Entnahme zunächst aus den niedrigeren Temperaturschichten bis diese die Vorlauftemperatur von 30 °C nicht mehr gewährleisten können.

Erst dann wird die Energie aus den oberen Schichten mit höherem Temperaturniveau entnommen. Das verbessert die Ausnutzung der im Speicher eingelagerten Energie und es wird keine Energie mit hohem Temperaturniveau, die vielleicht zur Trinkwassererzeugung nötig wäre, verschwendet.

Bei einer vollen Ladung mit ca. 90 °C und einer maximal möglichen Entladung auf 25 °C hat der Speicher einen Energieinhalt von 1512 kWh.



Abbildung 27: Solarspeicher mit integriertem Boiler /29/



Abbildung 28: Hydraulik des Speichers; Schauwand Sonnen-Zentrum /30/

5.6 Regelung der Anlage

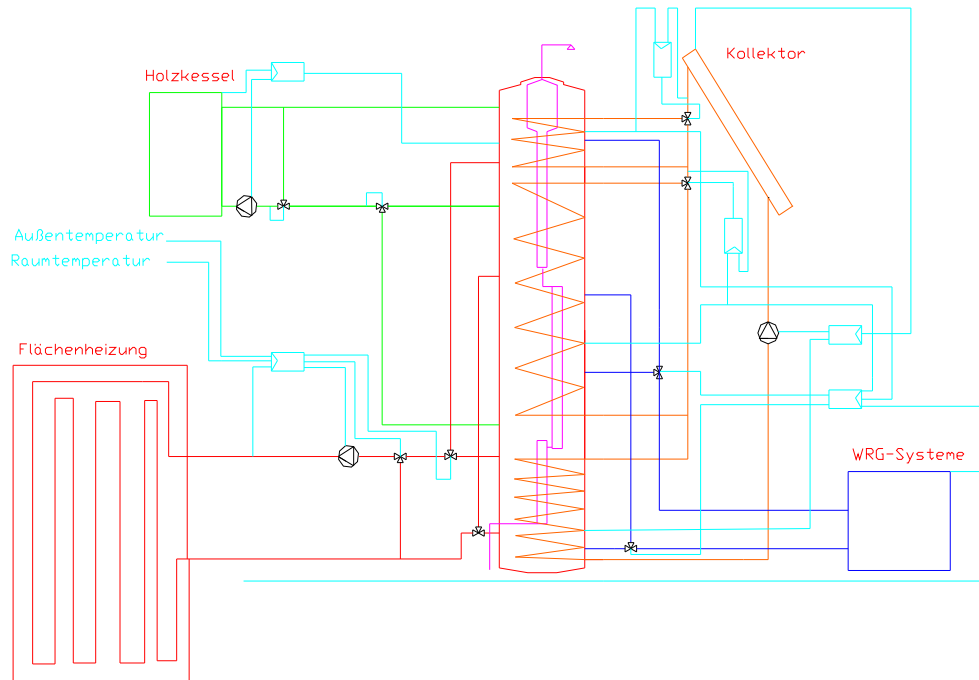


Abbildung 29: Arbeitsweise der Anlage im Sonnen-Zentrum

Die gesamte Anlage im Sonnen-Zentrum wird über eine DDC (digital direction controle) Zentraleinheit gesteuert. Alle Informationen laufen bei ihr zusammen.

Die Zentraleinheit Micro XXL von „Systems Control“ wurde vorwiegend für den Einsatz im solartechnischen Bereich entwickelt. Die Einheit ist komplett frei programmierbar und kann über ein „M-Bus-System“ die erfassten Daten an einen Web-Server weiterleiten.

Diese Technik ermöglicht eine Abfrage der aktuellen Zustände in der Anlage via Internet. Die Messwerte werden alle zehn Sekunden aktualisiert und können in einem Archiv über das Internet abgefragt werden. Diese Technik ermöglicht außerdem ein schnelles Eingreifen bei Störungen der Anlage und bringt wichtige Informationen über das tatsächliche Betriebsverhalten der Anlage.



Abbildung 30 Systems Control Micro XXL; Zentrale Regeleinheit im Sonn-Zentrum /31/

6 Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI 2067

In der VDI 2067 ist ein Verfahren zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von gebäudetechnischen Anlagen beschrieben. Dabei werden die einzelnen Kosten in kapitalgebundene, bedarfs- beziehungsweise verbrauchsgebundene, betriebsgebundene und sonstige Kosten unterteilt.

Die kapitalgebundenen Kosten beinhalten die Investitionskosten aller für den Betrieb benötigten Anlagenkomponenten einer Variante. Die bedarfs- beziehungsweise verbrauchsgebundenen Kosten bestehen aus den Kosten für die Energie, die für den Betrieb der entsprechenden Anlage aufgewendet werden muss.

Bei den betriebsgebundenen Kosten werden die Kosten für die Bedienung, Wartung und Inspektion zusammengefasst. Unter den Bereich der sonstigen Kosten fallen Kosten für Versicherungen, allgemeine Abgaben, anteilige Verwaltungskosten. Außerdem muss festgelegt werden, welche Ausstattungen und Anlagenvarianten den Berechnungen zugrunde liegen. Grundsätzlich gibt es vier Verfahren zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Investitionen. In der VDI 2067 wird die Annuitätsmethode unter Berücksichtigung von Ersatzbeschaffungen als übliches Verfahren angegeben, da es mit diesem Verfahren möglich ist, die Investitionskosten und die laufenden Betriebskosten während eines Betrachtungszeitraumes zusammenzufassen. Das Zusammenfassen der Investitionskosten und der laufenden Kosten wird mit dem Annuitätsfaktor ermöglicht.

6.1 Formeln zur Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI 2067 im Sonnen-Zentrum

Bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung für das Sonnen-Zentrum soll die Solar- mit Holzheizungsunterstützung mit einer konventionellen Gas-Brennwert-Heizung verglichen werden. Diese alternative Beheizungsmöglichkeit wurde bewusst für den Vergleich gewählt. Zum einen handelt es sich bei der Gas-Brennwerttechnik um eine gängige und viel genutzte Heizmethode, zum anderen sind bei der Solar- und bei der Brennwerttechnik geringe Systemtemperaturen von bedeutender Rolle für ihren Nutzungsgrad.

Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit wurden die jährlichen Kosten mit der Annuitäten - Methode ermittelt. Bei der gesamten Berechnung wird für die Zusatzwärmeerzeugung mit Holz nur der Holzvergaserkessel in die Berechnungen einbezogen. Der Pelletofen im Foyer dient hauptsächlich zu Demonstrationszwecken und ist für die Funktionalität der Anlage nicht notwendig. Auch die Wärmerückgewinnung durch den Abgaswärmetauscher des Holzbackofens und die Rückgewinnung der Abwärme, der Kompressionskältemaschine werden bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung nicht berücksichtigt.

6.1.1 Annuität der Jahres-Gesamtzahlungen

Die Annuität der Jahres-Gesamtzahlungen setzt sich aus der Einzahlungsannuität abzüglich der Summe der kapital-, der bedarfs- und verbrauchsgebundenen, sowie den betriebsgebundene und sonstigen Auszahlungsannuitäten zusammen. Mit der Gesamtannuität werden die Anlagenvarianten miteinander verglichen.

Bei der im Sonne-Zentrum realisierten Anlage wird der Betrachtungszeitraum für die Ermittlung der Gesamtannuität auf 30 Jahre angesetzt, dies entspricht der Lebensdauer des in der Anlage verwendeten Hochleistungs-Flächenkollektors HFK.

$$A_N = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S})$$

A_N = Annuität der Jahresgesamtzahlung

$A_{N,E}$ = Einzahlungsannuität

$A_{N,K}$ = Annuität der kapitalgebundene Auszahlungen

$A_{N,V}$ = Annuität der bedarfs-(verbrauchs-)gebundenen Auszahlung

$A_{N,B}$ = Annuität der betriebsgebundenen Auszahlung

$A_{N,S}$ = Annuität der sonstigen Auszahlungen

6.1.2 Annuität der kapitalgebundene Kosten

Zur Ermittlung aller kapitalgebundener Kosten der bestehenden Anlage konnte auf detaillierte Material- und Lohnrechnungen zurückgegriffen werden.

Die Annuität der kapitalgebundenen Kosten wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_N - R_W) \cdot a + \frac{f_K}{100} \cdot A_0 \cdot ba_{IN}$$

$$A_{1\dots N} = A_0 \cdot \frac{r^{(n \cdot T_N)}}{q^{(n \cdot T_N)}}$$

$n =$ je nach Nummer der Ersatzbeschaffung $n = 1, 2, 3, 4, \dots, N$

$A_0 =$ Investitionskosten

$A_1 \dots A_N =$ Barwert der Ersatzbeschaffungen

$R_W =$ Restwert

$a =$ Annuitätsfaktor

$f_K =$ Faktor für Instandsetzung in % des Investitionsbetrags

$ba_{IN} =$ preisdynamischer Annuitätsfaktor für Instandsetzungszahlungen

Da bei der alternativen Variante der Gas-Brennwertheizung ebenfalls mit niedrigen Systemtemperaturen gearbeitet werden sollte, konnten die kapitalgebundenen Kosten der Nutzenübergabe und Verteilung für die Alternative mit übernommen werden. Bei den kapitalgebundenen Kosten für die Erzeugung wurde auf ein eigens von einem ausführenden Fachunternehmen angefertigtes Angebot für die Beschaffungs- und Installationskosten zurückgegriffen.

In der hier berechneten Anlage werden die Einzahlungen bei der Variante der Sonnenheizung in Form von staatlichen Subventionen im Rahmen des KfW-Programms „Erneuerbare Energien“ berücksichtigt. Diese werden anhand der aktuell gültigen Sätze für solarunterstützte Heizungssysteme mit dem Maximalsatz für Mehrfamilienhäuser oder Gewerbegebäude von 30 % der Gesamtinvestition ermittelt.

Zusätzlich zur Förderung der Solaranlage wurde für den Scheitholzvergaserkessel von 5 - 50 kW mit dem Effizienzbonus Stufe 2 ein Investitionszuschuss von 2.250 € angenommen.

6.1.3 Annuität der bedarfs- und verbrauchsgebundene Kosten

Bei der Ermittlung der Kosten für Energie kann nur zum Teil auf die neue VDI 2067 zurückgegriffen werden. Teilweise fehlen hier noch Berechnungsblätter und andererseits ist das in Blatt 10 und 11 beschriebene Verfahren bisher nur als EDV-Verfahren erschienen. Dieses Verfahren wird in dieser Arbeit nicht durchgeführt, stattdessen wird das in 6.1.4.1 beschriebene Verfahren nach der alten VDI 2067 Blatt 2 zur Berechnung des voraussichtlichen Jahres-Heizwärmeverbrauchs angewandt.

Diese Kosten beinhalten die Zahlungen für Energie einschließlich der Zinskosten für den gelagerten Energieträger. Der Brennstoffbedarf wird über den jährlichen Heizwärmeverbrauch für Heizung und Warmwasser ermittelt. Dabei wurde zur besseren Orientierung ein Energieflussbild der auftretenden Wärmeströme im Sonnen-Zentrum angefertigt.

Der Energiebedarf wird dann anhand dieses Flussbilds für das Sonnen-Zentrum zunächst allgemein und unabhängig von der Art der Beheizung für das Gebäude ermittelt.

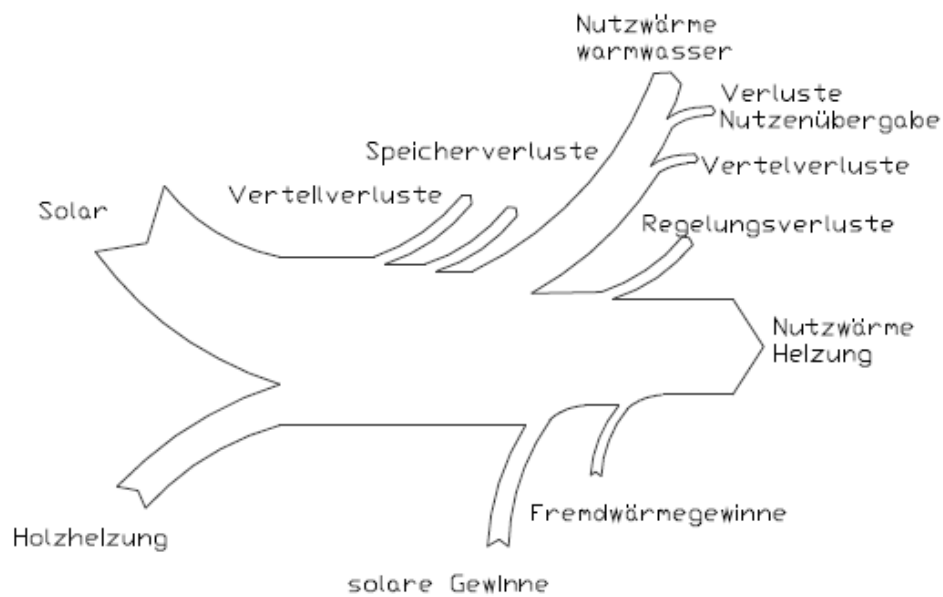


Abbildung 31: Energieflüsse im Sonnen-Zentrum

Für den Kostenvergleich der beiden Heizsysteme wird dann der Brennstoffstoffbedarf für das jeweilige System unter Berücksichtigung des jeweiligen jährlichen Nutzungsgrades der verschiedenen Erzeugungsarten berechnet. Hierzu wird bei der Solarheizungsvariante der solare Deckungsgrad mit Hilfe einer vorliegenden dynamischen Gebäudesimulation ermittelt. Dieser wird bei den Brennstoffkosten und dem Nutzungsgrad für den Holzvergaserkessel berücksichtigt. Die Kosten für elektrische Hilfsenergie beinhalten elektrische Energie für Pumpen, elektrische Stellantriebe, Regler, sowie Messeinrichtungen. Da es sich bei dieser Anlage um eine Referenzanlage handelt und ein Teil des messtechnischen Aufwandes, sowie ein Teil der Datenerfassung zum Zweck der Veranschaulichung der Funktionsweise der Anlage dient, werden nur die für die Funktion benötigte Geräte berücksichtigt.

Die Berechnung der bedarfsgebundenen Kosten erfolgte anhand folgender Gleichung:

$$A_{N,v} = A_{V1} \cdot b_{av}$$

A_{V1} = bedarfs-(verbrauchs-)gebundene Zahlungen im ersten Jahr

b_{av} = preisdynamischer Annuitätsfaktor für bedarfs- (verbrauchs-)gebundene Zahlungen

Die Zahlungen für Brennstoff und elektrische Energie im ersten Jahr werden anhand des gesamten Energiebedarfs für Heizwärme und Warmwasser des Gebäudes und der Jahres-Nutzungsgrade bei der Energieerzeugung ermittelt. Der Brennstoffbedarf wird dann mit den jeweiligen Heizwerten der einzelnen Brennstoffart berechnet. Für die Brennstoffkosten werden aktuelle Werte für den Gas- und Holzpreis angesetzt. Die Energiekosten werden mit einer Preissteigerungsrate von 6 % ermittelt. Die ebenfalls zu den bedarfs- (verbrauchs-)gebundenen Kosten gehörenden Aufwendungen für sonstige Betriebsstoffe beziehen sich bei der Solaranlage auf die Kosten für das Frostschutzmittel im Solarkreislauf sowie bei der Gas-Brennwertanlage auf eventuell nötige Kondensataufbereitungsmittel zur Neutralisation des säurehaltigen Kondensates. Diese Kosten werden bei beiden Anlagen vernachlässigt.

6.1.3.1 Jahresenergiebedarf für Heizwärme- und Warmwassererzeugung Q_{ges}

Dieser gesamte jährliche Energiebedarf beinhaltet den Bedarf zuzüglich der Wärmeverluste bei der Verteilung und der Nutzenübergabe für Warmwasser und Gebäudebeheizung. Die Energieverluste bei der Erzeugung werden individuell für die beiden Varianten getrennt berücksichtigt, da bei der Erzeugung mit Holz andere Wirkungsgrade als bei der Gasheizung zu berücksichtigen sind.

$$Q_{ges.} = (Q_{H,a} + Q_{WE,a}) \cdot \frac{1}{\eta_V} \cdot \frac{1}{\eta_a}$$

$Q_{H,a}$ = Jahres-Heizwärmeverbrauch

$Q_{WE,a}$ = Jahreswärmeverbrauch zur Warmwassererzeugung

η_V = Verteilnutzungsgrad der gesamten Anlage

η_a = mittlerer Jahresnutzungsgrad des Wärmeerzeugers

Der Jahresnutzwärmebedarf wurde nach der VDI 2067 Blatt 2 berechnet. Hierbei muss die Berechnung des voraussichtlichen Jahres-Heizwärmeverbrauch durchgeführt werden, da es für fast völlig solar beheizte Gebäude ohne ausreichende Datenerfassung keine andere Möglichkeit gibt den Jahres-Heizenergieverbrauch zu ermitteln.

Das Verfahren zur Berechnung des Energiebedarfs beheizter und klimatisierter Gebäude, das in der neuen VDI 2067 Blatt 10 und 11 beschrieben ist, kann in dieser Arbeit nicht angewandt werden, da es sich um ein EDV gestütztes dynamisches Rechenverfahren handelt.

In dem hier beschriebenen Verfahren wird der Jahresheizwärmeverbrauch nach dem Gradtagszahlverfahren ermittelt. Dieser Verbrauch beinhaltet den gesamten Jahresheizwärmeverbrauch ohne Wärmegewinne abzüglich des Jahresfremdwärmegewinns.

6.1.3.2 Bestimmung des Jahres-Heizwärmeverbrauch nach VDI 2067 Blatt 2/ Jahres-Heizwärmeverbrauch Q_{HA}

Der Jahres-Heizwärmeverbrauch berücksichtigt die Wärmegewinne, die durch passive Sonneneinstrahlung sowie innere Gewinne die zum Beispiel durch Menschen verursacht werden.

Die Berechnung des reinen Heizwärmebedarfs ohne Berücksichtigung von Fremdwärme und die Fremdwärmegewinne werden getrennt voneinander ermittelt. Beim Jahres-Heizwärmeverbrauch werden die zusätzlichen Gewinne vom reinen Heizwärmebedarf abgezogen.

$$Q_{HA} = Q_{GA} - Q_{FG}$$

Q_{GA} = Jahres-Heizwärmebedarf ohne Berücksichtigung von Fremdwärmegegewinn

Q_{FG} = Jahres-Fremdwärmegegewinn

6.1.3.3 Ermittlung des Jahres-Heizwärmebedarf ohne Berücksichtigung von Fremdwärmegegewinn Q_{GA}

Der Jahresheizwärmeverbrauch ohne Berücksichtigung von Fremdwärmegegewinnen ist abhängig von der Anzahl der Heiztage, der mittleren Norminnentemperatur, der mittleren Außentemperatur, der Normaußentemperatur und von dem Norm-Wärmebedarf des Gebäudes.

Für das Sonnen-Zentrum wird der Norm-Gebäudewärmebedarf aus einer vorhandenen Wärmebedarfsberechnung nach DIN 4701/ März 83 entnommen.

$$Q_{GA} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot 24 \frac{h}{d} \cdot z \cdot \frac{(\vartheta_{im} - \vartheta_{am})}{(\vartheta_{im} - \vartheta_a)} \cdot Q_{N,Geb}$$

f_1 = Korrekturfaktor für zusätzlichen Lüftungsbedarf

f_2 = Korrekturfaktor für zeitlich eingeschränkten Heizbetrieb

f_3 = Korrekturfaktor für räumlich eingeschränkten Heizbetrieb

f_4 = Korrekturfaktor für Ausstattung mit Regelgeräten

f_5 = Korrekturfaktor für abweichende Raumtemperatur

z = Heiztage pro Jahr

ϑ_{im} = Mittlere Norm-Innentemperatur in °C

ϑ_{am} = Mittlere Außentemperatur in °C

$Q_{N,Geb}$ = Norm-Gebäudewärmebedarf

6.1.3.4 Korrekturfaktor für zusätzlichen Lüftungsbedarf f_1

Der Korrekturfaktor berücksichtigt die Änderungen des Lüftungswärmebedarfs aufgrund von unterschiedlichen Nutzergewohnheiten. Je nach Nutzung und den Gewohnheiten der Nutzer kommen verschiedenen Luftwechselzahlen zustande. Diese werden in normale, erhöhte und starke Fensterlüftung eingeteilt und im Bewertungsfaktor für Fensterlüftung berücksichtigt. Da es sich im Sonnen-Zentrum um angenehme Strahlungswärmeübertragung durch Flächenheizungen handelt und dadurch ein gutes Behaglichkeitsempfinden erzeugt wird, wird von einer normalen Fensterlüftung für das Gebäude ausgegangen.

$$f_1 = 1 + f_L \cdot \frac{A_E}{\dot{Q}_{N, Geb}}$$

f_L = Bewertungsfaktor Fensterlüftung = 0 für normale Fensterlüftung

A_E = beheizte Nutzfläche in m²

$\dot{Q}_{N, Geb}$ = Norm-Wärmebedarf des Gebäudes in [W]

6.1.3.5 Korrekturfaktor für zeitlich eingeschränkten Heizbetrieb f_2

Zur Ermittlung des Korrekturfaktors für den zeitlich eingeschränkten Heizbetrieb wird das Gebäude in drei Zonen eingeteilt. In den einzelnen Zonen werden jeweils die gleichen Nutzeransprüche vorausgesetzt. Die Gewichtung des Bewertungsfaktors der einzelnen Raumgruppen am gesamten Korrekturfaktor wird über den Heizlastanteil der einzelnen Raumgruppen bestimmt. In der VDI 2067 sind drei verschiedene eingeschränkte Heizbetriebe aufgeführt.

Im Sonnen-Zentrum wird der Absenkbetrieb realisiert.

$$f_2 = 1 - [1 - f_E(1)] \cdot a(1) - [1 - f_E(2)] \cdot a(2) - [1 - f_E(3)] \cdot a(3)$$

$f_E(1-3)$ = Bewertungsfaktor der Raumgruppen

$a(1-3)$ = Anteilige Heizlast der Bewertungsgruppen

Der Bewertungsfaktor der Raumgruppen ergibt sich aus den Bewertungsfaktoren für die zeitliche Absenkung an Wochentagen und am Wochenende.

$$f_E(G) = \frac{4}{7} \cdot f_{ET}(G) + \frac{3}{7} \cdot f_{EW}(G)$$

G = Gruppe 1-3

f_{ET} = Eingeschränkter Betrieb an Wochentagen abhängig von der Absenkdauer aus Tabelle 2 VDI 2067 Blatt 2

f_{EW} = Eingeschränkter Betrieb am Wochenende Tabelle 2 VDI 2067 Blatt 2

6.1.3.6 Korrekturfaktor für räumlich eingeschränkten Heizbetrieb f_3

Da in der Regel nicht alle Räume auf die Norm-Raumtemperatur geheizt werden, kann der Anteil der eingeschränkt beheizten Flächen mit diesem Korrekturfaktor berücksichtigt werden. Für das Sonnen-Zentrum wird dabei die eingeschränkt beheizte Produktionshalle berücksichtigt.

$$f_3 = 1,00 - 0,34 \cdot a_r$$

a_r = Anteil der eingeschränkt beheizten Flächen

6.1.3.5 Korrekturfaktor für Ausstattung mit Regelgeräten f_4

Um Raumtemperaturschwankungen in Abhängigkeit der Außentemperatur und der Regelungstechnischen Einrichtung eines Gebäudes bewerten zu können, wird der Korrekturfaktor für die Ausstattung der Regelgeräte eingeführt. Im Sonnen-Zentrum wird hierfür eine Vor- sowie Einzelraumregelung für Warmwasser-Fußbodenheizungen mit leichtem Fußbodenaufbau angesetzt.

$$f_4 = \frac{f_R \cdot \vartheta_{im} - \vartheta_{am}}{\vartheta_{im} - \vartheta_{am}}$$

f_R = Bewertungsfaktor der Regelgeräte ermittelt über Art der Regelung aus Tabelle 4 VDI 2067 Blatt 2

ϑ_{im} = mittlere Norm-Innentemperatur

ϑ_{am} = mittlere Außentemperatur in der Heizzeit

6.1.3.7 Korrekturfaktor für abweichende Raumtemperatur f_5

Im diesem Gebäude wird zusätzlich der Korrekturfaktor für eine Abweichung der mittleren Gebäudetemperatur berücksichtigt, da es durch die großen nach Süden ausgerichteten Fenster zu einer Erhöhung der mittleren Raumtemperatur über 2 K hinaus kommen kann.

$$f_5 = \frac{(\vartheta_{iB} - \vartheta_{am})}{(\vartheta_{im} - \vartheta_{am})}$$

ϑ_{iB} = eingestellte Raumtemperatur im Betrieb

6.1.3.8 Ermittlung des Jahres-Fremdwärmegewinns Q_{FG}

Der Fremdwärmegewinn setzt sich aus einem äußeren und einem inneren Fremdwärmeanfall zusammen. Dieser wird mit einem Korrekturfaktor für Fremdwärmenutzung in Abhängigkeit der Wohn- und Fensterflächen, des Heizsystems, des Nutzerverhaltens, der Trägheit des Gebäudes und der regelungstechnischen Ausstattung der Anlage korrigiert.

$$Q_{FG} = f_6 \cdot (Q_{Sa} + Q_{Ia})$$

f_6 = Korrektur zur Ausnutzung von Fremdwärme

Q_{Sa} = äußerer Fremdwärmeanfall

Q_{Ia} = innerer Fremdwärmeanfall

6.1.3.9 Ermittlung des äußeren Wärmeeinflusses

$$Q_{Sa} = \sum_j (g \cdot e \cdot A_{Fej} \cdot S_{aj})$$

g = Glasflächenanteil

e = Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung

A_{Fej} = gesamte Fensterfläche der Fassade mit der Himmelsrichtungsorientierung j

Die Fensterfläche A_{FE} lässt sich über einen geschätzten Fensteranteil in % abschätzen. In diesem Fall wird jedoch der Fensterflächenanteil anhand der in der Heizlastberechnung aufgeführten Fensterflächen für jede Ausrichtung errechnet und die einzelnen Fremdwärmegewinne durch Strahlung addiert. Diese aufwändige Ermittlung der einzelnen Wärmegewinne wird in diesem Fall so genau durchgeführt, weil das Gebäude durch seine Bauweise so konstruiert ist, dass ein größtmöglicher Fremdwärmegewinn möglich wird. Um diese bautechnische Maßnahme möglichst gut zu berücksichtigen, wird auf diese Berechnung besonders geachtet. Der monatliche Gesamtstrahlungsanteil S_{aj} wurde dabei aus dem Tabellenwerk des Test-Referenz-Jahr kurz TRY für Region 5 entnommen.

6.1.3.10 Ermittlung des inneren Fremdwärmeanfalls

In der VDI 2067 Blatt 2 sind durchschnittliche Werte je nach Nutzung des Gebäudes angegeben. In diesem Fall wird aufgrund der unterschiedlichen Nutzung des Sonnen-Zentrums für die jeweiligen Fremdwärmelasten der flächenanteilige Wert der einzelnen Nutzbereiche summiert. Die beheizten Nutzflächen werden aus der vorliegenden Heizlastberechnung entnommen.

$$Q_{Ia} = \sum_i A_{Ei} \cdot q_{lai}$$

A_{Ei} = beheizte Nutzfläche in m²

q_{lai} = Fremdwärmeanfall je Quadratmeter

6.1.3.11 Korrektur zur Ausnutzung von Fremdwärme f_6

Die Fremdwärme kann nicht voll genutzt werden, wenn es keine idealen Regeleinrichtungen gibt, die sofort auf Fremdwärme reagieren. Diese nicht ideale Ausnutzung des Fremdwärmeertrags wird mit dem Korrekturfaktor f_6 berücksichtigt. Dabei wird ein Bewertungsfaktor abhängig von der Regelung und der Art der Wärmeübertragung eingeführt.

In diesem Fall handelt es sich um eine Fußbodenheizung mit Vorlauf- und Einzelraumregelung mit leichtem Fußbodenaufbau. Außerdem wird ein Fremdwärmenutzungsgrad η_f definiert, der sich über eine exponentielle Funktion in Abhängigkeit der nutzbaren Sonneneinstrahlung bezogen auf den gesamten Jahres-Heizwärmebedarf ohne Fremdwärmenutzung bezieht.

$$\eta_f = e^{-0,5 \frac{Q_{Sa}}{Q_{Ga}}}$$

$$f_6 = f_F \cdot \eta_F$$

$f_f =$ Bewertungsfaktor für Fremdwärme abhängig von der Regelung

6.1.3.12 Berechnungen des Wärmebedarfs zur Bereitstellung des Warmwassers Q_{WE}

Grundsätzlich setzt sich der Wärmebedarf zur Bereitstellung von Warmwasser aus dem Nutzwärmebedarf und den einzelnen Verlusten bei der Erzeugung, der Speicherung, der Verteilung, sowie bei der Nutzenübergabe zusammen.

Da der Bedarf zunächst unabhängig von der Art der Erzeugung ermittelt werden soll, werden die Verluste bei der Erzeugung vorerst bei der Bedarfsberechnung nicht berücksichtigt und erst später für die einzelnen Erzeugungsarten dazu gerechnet.

$$Q_{WE} = Q_N + Q_{B,a} + Q_{V,a} + Q_{S,a} + Q_{E,a}$$

$Q_{N,a} =$ Nutzenergiebedarf Warmwasser VDI 2067 Blatt 12

$Q_{B,a} =$ jährlicher Wärmeaufwand für die Speicherung

$Q_{V,a} =$ jährlicher Wärmeaufwand für die Verteilung

$Q_{S,a} =$ jährlicher Wärmeaufwand für den Sticheleitungsbetrieb

$Q_{E,a} =$ jährlicher Aufwand für die Ein- und Nachregulierung

6.1.3.13 Ermittlung des jährlichen Nutzwärmebedarfs für Warmwasser $Q_{N,a}$

Bei der Ermittlung des Nutzwärmebedarfs für Warmwasser wird das Gebäude aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsarten in vier Teilbereiche aufgeteilt und der Bedarf in den einzelnen Bereichen getrennt ermittelt.

$$Q_{N,a,ges.} = Q_{N,a,1} + Q_{N,a,2} + Q_{N,a,3u.4}$$

6.1.3.14 Nutzenergiebedarf für Warmwasser im Wohnbereich $Q_{N,a1}$

Der Bereich 1, Wohnbereich des Gebäudes, wird von acht Personen bewohnt.

Zunächst wird der jeweilige personenbezogene, tägliche Nutzenergiebedarf anhand der sanitären Ausstattung ermittelt. Diese Werte beruhen auf Feldmessungen im Rahmen der VDI und werden jeweils für einen Bereich zwischen sparsamem und ausgiebigem Verbrauch angegeben. Für diese Arbeit werden jeweils Werte im oberen Bereich gewählt. Daraus ergibt sich für den gesamten Wohnbereich der jährliche Nutzenergiebedarf.

$$Q_{N,a1} = q_{N,d} \cdot n_P \cdot z$$

$q_{N,d}$ = täglicher personenbezogener Nutzenergiebedarf für Warmwasser

n_P = Personenanzahl

z = jährliche Nutzungszeit in Tagen pro Jahr

6.1.4.3 Nutzenergiebedarf für Warmwasser im Gastronomiebereich $Q_{N,a,2}$ und im Büro und Produktionsbereich $Q_{N,a,3u.4}$

Zu den Verbrauchsgewohnheiten im gewerblichen Bereich werden in der VDI keine Angaben gemacht. Zur Ermittlung des Bedarfs wird hier auf einen personenbezogenen Warmwasserbedarf zurückgegriffen. Für den Gastronomiebereich wird der jährliche Nutzenergiebedarf über eine durchschnittliche tägliche Besucherzahl und die jährlichen Öffnungstage durch Befragung des Betreibers ermittelt.

Im Büro- und Produktionsbereich wird der jährliche Nutzenergiebedarf jeweils getrennt ermittelt, da davon auszugehen ist, dass im Produktionsbereich der personenbezogene Bedarf durch die schmutzintensivere Arbeit höher liegt, als im Bürobereich.

Zur Ermittlung des jährlichen Bedarfs wird eine durchschnittliche Anwesenheit pro Tag und Bereich angesetzt und mit den durchschnittlichen jährlichen Arbeitstagen multipliziert.

Die jeweiligen Pauschalwerte für den Warmwasserbedarf wurden aus dem Taschenbuch für Heizungs- und Klimatechnik entnommen. Es wird davon ausgegangen, dass in den Werten bereits alle Verluste enthalten sind. Die Verluste für den Wohnbereich werden separat ermittelt.

$$Q_{N, a2-4} = q_{N, d} \cdot P \cdot d$$

$q_{N,d}$ = personenbezogener täglicher Energiebedarf

P = tägliche Personenzahl

d = Anzahl der geöffneten Tage pro Jahr

6.1.3.15 Wärmeaufwand für den Speicherbetrieb $Q_{B,a}$

$$Q_{B, a} = Q_{B, d, H} \cdot 365$$

$Q_{B,d,H}$ = täglicher Wärmeaufwand = 2,94 kWh/24h (Herstellerangaben)

Bei beiden betrachteten Varianten treten Speicherverluste an verschiedenen Stellen auf. Bei der Sonnenheizung müssen die Speicherverluste des Pufferspeichers berücksichtigt werden. Diese sind jedoch nur zum Teil als Verluste zu sehen, da mehr als zwei Drittel der Speicherfläche die Wärme an den beheizten Wohnraum abgeben und so nicht als Verlust gelten. Hinzu kommt hierbei noch, dass im unteren Bereich des Speichers durch die Schichtung nur niedrige Temperaturen auftreten, so dass bei der Solarheizungsvariante die Speicherverluste vernachlässigt werden. Bei der Gasheizungsvariante werden die Speicherverluste am Trinkwasserspeicher berücksichtigt, da dieser komplett im unbeheizten Kellerbereich aufgestellt wäre.

6.1.3.16 Jährlicher Wärmeaufwand für die Verteilung des Warmwassers $Q_{V,a}$

$$Q_{V,a} = (l_{w,K} + l_{z,K}) \cdot q_K \cdot (\Delta t_z + n \cdot C_1) \cdot 365$$

- $l_{w,K}$ = Länge aller vom Umlauf betroffenen Warmwasserleitungen
 $l_{z,K}$ = Länge aller vom Umlauf betroffenen Zirkulationsleitungen
 q_K = spezifischer, auf die Leitungslänge bezogener Wärmestrom im Keller
 Δt_z = tägliche Zirkulationsdauer
 n = Anzahl der täglichen Zirkulationsunterbrechungen
 C_1 = Konstante (=1h)

Beim Wärmeaufwand für die Verteilung werden die Zirkulationsverluste an den unbeheizten Keller ermittelt. Diese sind vom Leitungsmaterial und der Länge, sowie von der Art der Isolierung und der Dauer des Zirkulationsumlaufs abhängig.

Bei der Berechnung werden die Längen der Zirkulationsleitung für das komplette Gebäude anhand der Grundrisspläne überschlägig ermittelt.

Der spezifische längenbezogene Verlustwärmestrom wird aus der VDI 2067 Blatt 22, Wärmestrom an unbeheizte Keller, entnommen.

6.1.3.17 Jährlicher Wärmeaufwand für den Stichleitungsbetrieb $Q_{S,a}$

Dieser Wärmeaufwand entsteht in den Leitungsteilen in denen keine Zirkulation des Warmwassers stattfindet. In der Praxis ist es durchaus üblich, die Zirkulationsleitungen lediglich bis zur ersten Zapfstelle oder gar nur bis zum Beginn des betreffenden Raumes zu verlegen.

Da es im Nachhinein schwierig ist, die genaue Verlegung nachzuvollziehen, werden die Stichleitungslängen hier anhand der Grundrisspläne und der Annahme eines Zirkulationszusammenschlusses auf Höhe der ersten Entnahmearmatur ermittelt.

$$Q_{S,a} = \sum (l_s \cdot (W_R + W_W) \cdot (\vartheta_W - \vartheta_L) \cdot f) \cdot n_P \cdot 345$$

| | |
|-----------------|--|
| $l_s =$ | Länge der Stichleitung |
| $W_R =$ | spezifische Wärmekapazität der Rohrleitung |
| $W_W =$ | spezifische Wärmekapazität des Wasserinhalts |
| $\vartheta_W =$ | Warmwassertemperatur |
| $\vartheta_L =$ | Temperatur der Umgebungsluft |
| $f =$ | Nutzungsfrequenz nach VDI 2067 Blatt 12 |
| $n_P =$ | Anzahl der Personen |

6.1.3.18 Jährlicher Aufwand für die Ein- und Nachregulierung $Q_{E,a}$

In Haushalten entsteht durch das Ein- und Nachregulieren bis zur gewünschten Warmwassertemperatur ein Wärmebedarf, der durch einen Mehraufwand bei der Erzeugung ausgeglichen werden muss.

Dieser Mehraufwand kommt vor allem bei den Zapfungen an Waschtischen oder Brausen ohne Thermostatventile zur Geltung. Bei der Füllung der Badewanne spielen diese Verluste keine Rolle.

Der spezifische Wärmeaufwand für die Einregulierung kann dabei je nach Art der Entnahmearmatur aus einer in der VDI angegebenen Tabelle entnommen werden.

Beim Warmwasserbedarf für den gewerblich genutzten Bereich werden diese Verluste vernachlässigt.

$$Q_{E,a} = \sum (f \cdot q_E) \cdot n_P \cdot 345$$

$q_E =$ Wärmeaufwand für die Einregulierung

$n_P =$ Anzahl der Personen

6.1.3.19 Jahres-Nutzungsgrad für die Verteilung η_V

Beim Jahres-Nutzungsgrad für die Verteilung wird auf einen Erfahrungswert aus der VDI 2067 Blatt 1 für Anlagen mit sehr gutem Dämmstandards zurückgegriffen.

$$\eta_V = 0,98$$

6.1.3.20 Jahres-Nutzungsgrad des Wärmeerzeugers η_a

$$\eta_a = \frac{\eta_K \cdot f_S}{\left(\frac{b_a}{b_{VH}} - 1\right) \cdot q_B + 1}$$

- η_K = Kesselwirkungsgrad nach Herstellerangaben
 f_S = Faktor für die Verschmutzung des Erzeugers VDI 2067 Blatt 1
 b_a = Betriebsbereitschaftszeit, Einschaltdauer in h/a
 b_{VH} = Vollbenutzungsstundenzahl in h/a
 q_B = Betriebsbereitschaftsverluste nach Herstellerangaben

Der Kesselwirkungsgrad sowie die Betriebsbereitschaftsverluste werden aus den Herstellerunterlagen des jeweiligen Wärmeerzeugers entnommen.

Die Betriebsbereitschaftsverluste setzen sich aus den Strahlungs- und Konvektionsverlusten während der Stillstandszeit zusammen.

Beim Holzkessel wird dabei berücksichtigt, dass er nur als Zusatzheizung betrieben wird. Die Betriebsbereitschaftszeit und die Vollbenutzungsstunden des Holzvergaser-Kessels sind ebenfalls mit Hilfe des solaren Deckungsanteils zu korrigieren.

6.1.3.21 Jahres-Nutzungsgrad der Gesamtanlage η_{ges} .

$$\eta_{ges.} = \eta_a \cdot \eta_V$$

6.1.3.22 Ermittlung des jährlichen Hilfsenergiebedarfs

Der Hilfsenergiebedarf bezieht sich in beiden Anlagenvarianten hauptsächlich auf den Strombedarf für den Betrieb der Umwälzpumpen.

In der Berechnung für den jährlichen Strombedarf werden die einzelnen Heizkreis- und Speicherladepumpen getrennt voneinander betrachtet. Die Laufzeit wird dabei individuell für jede Pumpe und die einzelnen auftretenden Lastfälle ermittelt. Dabei wird zwischen Volllast-, Teillast- und Schwachlastnutzung unterschieden. Der entsprechende Energiebedarf, wird dabei anhand von Herstellerdiagrammen für den Energiebedarf, abhängig vom Volumenstrom und der Förderhöhe, ermittelt. Die Förderhöhen für die einzelnen Pumpen werden überschlägig bestimmt.

$$Q_{Pumpe} = \sum(T_{Last, i} \cdot P_{Last, i})$$

$T_{Last, i}$ = Dauer des Lastfalles i in [h/a]

$P_{last, i}$ = Leistungsaufnahme der Pumpe des Lastfalls i

| Lastfall | Förderhöhe | Betriebszeit Heizung | Betriebszeit Solar |
|---------------|------------|----------------------|--------------------|
| Volllast | 100% | 6% | 16% |
| Teillast | 75% | 15% | 30% |
| Schwachlast | 25% | 44% | 54% |
| Nachtabenkung | 50% | 35% | 0% |

Abbildung 32: Angenommene Lastfälle für Heizung und Solar

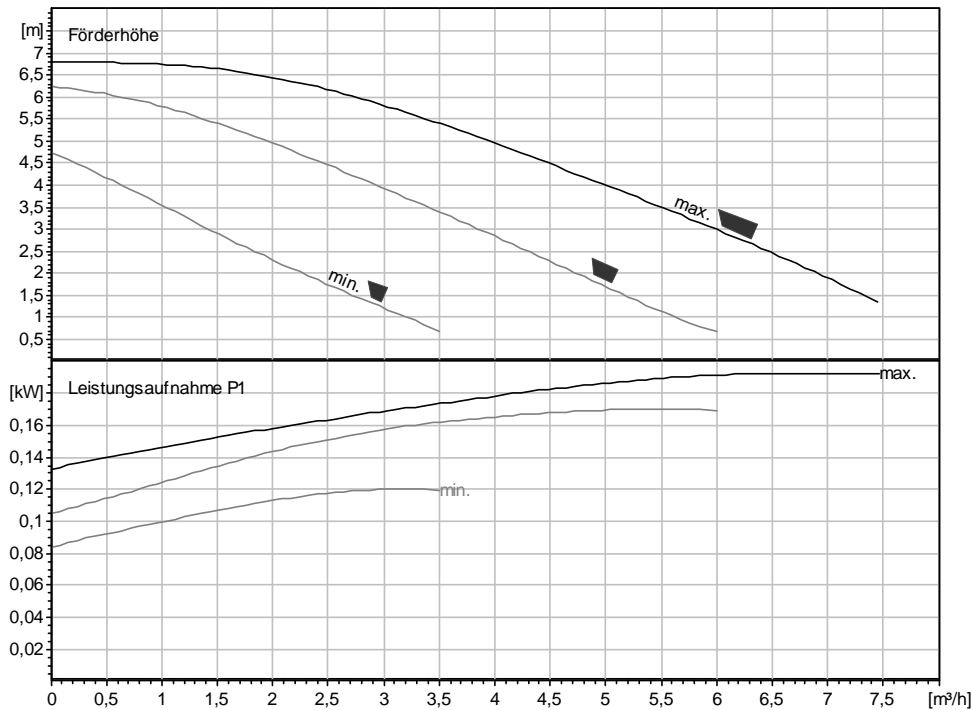


Abbildung 33: Pumpendiagramm und Leistungsaufnahme /32/

6.2 Betriebsgebundene Kosten

Mit der Annuität der betriebsgebundenen Kosten werden die Preisänderungen für die Wartung und Inspektion der Anlage berücksichtigt. Die Kosten für die Wartung und Inspektion werden mit einem prozentualen Anteil an den Investitionskosten für die jeweilige Anlagenkomponente ermittelt. Der jeweilige prozentuale Anteil ist in der VDI 2067 anhand von Erfahrungswerten festgelegt.

$$A_{N, B} = A_{B1} \cdot b_{aB}$$

A_{B1} = Annuität der betriebsgebundenen Kosten im ersten Jahr

b_{aB} = preisdynamischer Annuitätsfaktor für betriebsgebundene Zahlungen

Eventuell auftretende sonstige Zahlungen werden bei der Anlage im Sonnen-Zentrum nicht berücksichtigt.

6.3 Randbedingungen für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit werden zunächst die für beide Varianten geltenden Randbedingungen festgelegt:

- Betrachtungszeitraum $T = 30$ Jahre
- Zinsfaktor $q = 1,07$
- Preissteigerungsfaktor für kapitalgebundene Kosten $r_K = 1,03$
- Preissteigerungsfaktor für verbrauchsgebundene Kosten $r_V = 1,06$
- Preissteigerungsfaktor für betriebsgebundene Kosten $r_B = 1,02$
- Preissteigerungsfaktor für Instandhaltung $r_{IN} = 1,02$
- Annuitätsfaktor $a = 0,0806$
- Barwertfaktor der kapitalgebundenen Zahlungen $b_K = 17,028$
- Barwertfaktor der verbrauchsgebundenen Zahlungen $b_V = 24,549$
- Barwertfaktor der betriebsgebundenen Zahlungen $b_B = 15,241$
- Barwertfaktor der Instandsetzung $b_{IN} = 15,241$
- preisdynamischer Annuitätsfaktor kapitalgebunden $ba_K = 1,37$
- preisdynamischer Annuitätsfaktor verbrauchsgebunden $ba_V = 1,98$
- preisdynamischer Annuitätsfaktor betriebsgebunden $ba_B = 1,23$
- preisdynamischer Annuitätsfaktor für Instandhaltung $ba_{IN} = 1,23$

Im nächsten Schritt werden die Annuitäten der kapitalgebunden, verbrauchsgebundenen und der betriebsgebundenen Kosten für die verschiedenen Varianten getrennt berechnet.

7 Berechnung der Wirtschaftlichkeit Variante Gas-Brennwertheizung

7.1 Annuität der kapitalgebundenen Kosten

Gas-Brennwertkessel

Nutzdauer $T_N = 18$ a [VDI 2067 Blatt 1]

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 1

$f_{k,GK} =$ Anteil der Instandsetzungskosten = 1,5 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$$A_{N, K, GK} = (A_{0, GK} + A_{1, GK} - RW_{GK}) \cdot a + \frac{f_{k, GK}}{100} \cdot A_{0, GK} \cdot b_{aIN}$$

Trinkwasserspeicher

Nutzdauer $T_N = 25$ a [VDI 2067 Blatt 1]

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 1

$f_{k,TWSp} =$ Anteil der Instandsetzungskosten = 1,0 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$$A_{N, K, TWSp} = (A_{0, TWSp} + A_{1, TWSp} - RW_{TWSp}) \cdot a + \frac{f_{k, TWSp}}{100} \cdot A_{0, TWSp} \cdot b_{aIN}$$

Rohrleitungsmaterial und Montage für Speicher und Feuerungsanlage

Nutzungsdauer $T_N = 40$ a [VDI 2067 Blatt 1]

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 0

$f_{k,R,M,S,P} =$ Anteil der Instandsetzungskosten = 1,0 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$$A_{N, K, R, M, S, F} = (A_{0, R, M, S, F} - RW_{R, M, S, F}) \cdot a + \frac{f_{k, R, M, S, F}}{100} \cdot A_{0, R, M, S, F} \cdot b_{aIN}$$

Flächenheizung inklusive Montage

Nutzungsdauer $T_N = 30$ a [VDI 2067 Blatt 1]

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 0

$f_{kFh} =$ Anteil der Instandsetzungskosten = 1,0 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$$A_{N, K, Fh} = A_{0, Fh} \cdot a + \frac{f_{k, Fh}}{100} \cdot A_{0, Fh} \cdot b_{aIN}$$

Membran-Ausdehnungsgefäß

Nutzungsdauer $T_N = 15$ a [VDI 2067 Blatt 1]

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 1

$f_{kFh} =$ Anteil der Instandsetzungskosten = 0 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$$A_{N, K, MAG} = (A_{0, MAG} + A_{1MAG}) \cdot a + \frac{f_{k, MAG}}{100} \cdot A_{0, MAG} \cdot b_{aIN}$$

Umwälzpumpen

Nutzungsdauer $T_N = 10$ a [VDI 2067 Blatt 1]

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 2

$f_{kFh} =$ Anteil der Instandsetzungskosten = 2 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$$A_{N, K, Pumpe} = (A_{0, Pumpe} + A_{1Pumpe} + A_{2Pumpe} + A_{3Pumpe}) \cdot a + \frac{f_{k, Pumpe}}{100} \cdot A_{0, Pumpe} \cdot b_{aIN}$$

Gesamtannuität der kapitalgebundenen Kosten

$$A_{N, K, Ges} = \sum A_{N, K}$$

$$A_{N, K, Ges} = 9.240,94\text{€} / a$$

7.2 Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten

7.2.1 Jährlicher Heizenergiebedarf $Q_{H,a}$

| | | | | | | | |
|---|--|------------------------|-------------------------------|--|------|--|--------------------|
| Projektbezeichnung:Sonnen-Zentrum Oberndorf | | | | | | | |
| Gebäudeart:Gewerbliches Gebäude mit Wohnbereich | | | | Art der Heizung | | Warmwasserheizung Solar mit Holz-Unterstützung | |
| Klimadaten gemäß Anhang A7: | | | Norm-Wärmebedarf | | | $Q_{N,Geb=}$ | 61,3 kW |
| Wetterstation: | | Tübingen | mittlere Norm-Innentemperatur | | | $\vartheta_{im=}$ | 20 °C |
| Norm-Außentemperatur | | $\vartheta_{a=}$ | -14 °C | Bauart nach DIN 4701 | | | |
| Außentemperatur-Korrektur | | $\Delta\vartheta_{a=}$ | 2 K | Nutzungsfläche des Gebäudes | | | $A_{R=}$ 1654 m² |
| Norm-Außentemperatur Korrigiert | | $\vartheta'_{a=}$ | -16 °C | Flächenbezogener Wärmebedarf | | | $q=$ 37,06 W/m² |
| mittlere Außentemperatur | | $\vartheta_{am=}$ | 5,7 °C | Gesamte Fensterfläche des Gebäudes | | | $A_{FE=}$ 240,7 m² |
| Anzahl der Heitztage/Jahr | | $z=$ | 279,2 d/a | Eingeschränkt beheizte Fläche des Geb. (z.B. 15°C) | | | 744 m² |
| TRY-Region (Anhang A7) | | | 5 | | | | |
| f ₁ =Korrekturfaktor für Lüftungswärmebedarf | | | | | | | |
| Luftwechsel-Richtwerte | | | | Luftwechsel | | $n=$ | 0,5 |
| normaler Luftwechsel | | $n=$ | 0,5 | lichte Raumhöhe | | $h_{Raum=}$ | 3 |
| erhöhter Luftwechsel | | $n=$ | 0,75 | Lüftungswärmeanteil | | $\zeta=$ | 0,6 |
| starker Luftwechsel | | $n=$ | 1 | Lüftungswärmebedarf | | $Q_{L=}$ | 36,8 |
| | | | | Bewertungsfaktor Fensterlüftung | | $f_{L=}$ | 0 |
| | | | | Korrekturfaktor für Lüftungswärmebedarf | | $f_{1=}$ | 1 |
| f ₂ =zeitlich eingeschränkter Heizbetrieb | | | | | | | |
| Bauweise gemäß Tab. 1 Seite 7 | | | | Bauweise= | | b | |
| Gebäudekonstante gemäß Tab. 1 Seite 7 | | | | $\tau=$ | | 67,46 | |
| Bei Fußbodenheizung Aufbau leicht=1;mittel=2;schwer=3 | | | | Fb.-Aufbau= | | 3 | |
| Erhöhung der Gebäudekonstante dadurch auf | | | | $\tau=$ | | 77,46 | |
| Raumgruppen mit unterschiedlichen Betriebszeiten | | | | 1 | 2 | 3 | |
| Wärmebedarfsanteil bzw. Außenwandanteil der Raumgruppe | | | | 20 | 30 | 50 % | |
| Regelung: 1=Absenkung;2=Abschaltung;3=Optimierung | | | | 1 | 1 | 1 | |
| Dauer der Einschränkung werktags: 0...16h | | | | 8 | 8 | 0 h | |
| daraus der Bewertungsfaktor f_{ET} nach Tab. 2 Seite 8 | | | | 0,97 | 0,97 | 1 | |
| Dauer der Einschränkung Wochenende: 0.....60h | | | | 0 | 0 | 60 h | |
| daraus der Bewertungsfaktor f_{ew} nach Tab. 2 Seite 8 | | | | 0 | 0 | 0,78 | |
| Bewertungsfaktor Raumgruppe f_E Gl.17 | | | | 0,55 | 0,55 | 0,91 | |
| Korrekturfaktor alle Zonen nach Gl.18 Seite 7 | | | | | | $f_{2=}$ | 0,73 |
| f ₃ =räumlich eingeschränkter Heizbetrieb | | | | | | | |
| Anteil der räumlich eingeschränkt beheizten Flächen | | | | $\alpha_r=$ | 0,45 | | |
| Korrekturfaktor räumlich eingeschränkter Heizbetrieb f3 Gl. 19 bzw. Seite 8 | | | | | | $f_{3=}$ | 0,85 |
| f ₄ =Ausstattung mit Regelgeräten | | | | | | | |
| Ausstattung mit Regelgeräten gemäß Tab.4, Seite 9 | | | | | | n | |

| | | | | | | |
|--|--|-------------------|--------|----------------------|------------------|--------|
| Gütefaktor nach f_R Tabelle 4, Seite 9 | | $f_R=$ | 1,02 | | | |
| Korrekturfaktor für Ausstattung mit Regelgeräten | | | | $f_d=$ | 1,03 | |
| | | | | | | |
| $f_5=$ abweichende Raumtemperatur im Betrieb | | | | | | |
| eingestellte Raumtemperatur im abweichenden Betrieb | | $\vartheta_{iB}=$ | 22 °C | | | |
| Korrekturfaktor für abweichende Raumtemperatur im Betrieb Gl. 21, Seite 9 | | | | $f_5=$ | 1,14 | |
| | | | | | | |
| Jahres-Heizwärmebedarf ohne Fremdwärme | | | | | | |
| $Q_{Ga}=f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot 24 \cdot z \cdot (\vartheta_{im} - \vartheta_{am}) / (\vartheta_{im} - \vartheta_a) \cdot Q_{N, Geb.}$ Gl.8, Seite 5 | | $Q_{Ga}=$ | 125,17 | MWh | | |
| | | | | | | |
| $f_6=$ Korrekturfaktor zur Ausnutzung der Fremdwärme | | | | | | |
| Nutzung: Wohnung=1; Büro=2; Krankenhaus=3; Schule ein-/zweischichtig=4/5; sonstige=6 | | | | | 1,2,6 | |
| Innerer Fremdwärmeanfall je m ² Nutzfläche und Jahr | | $q_{iB}=$ | 50 | kWh/m ² a | | |
| Innerer Fremdwärmeanfall je Jahr Gl. 23 Seite 10 | | $Q_{iB}=$ | 82,7 | MWh/a | | |
| Spezifischer Fremdwärmeanteil q_{Sa} durch Sonneneinstrahlung je m ² Fensterfläche Tab. A7 | | $q_{Sa}=$ | 206 | kWh/m ² a | | |
| Äußerer Fremdwärmeanfall bei i.M. in kWh/m ² a Fe Tab. 7 Seite 21 | | $Q_{Sa}=$ | 92,44 | MWh/a | | |
| Bewertungsfaktor Fremdwärmenutzung gemäß Tab. 4 Seite 9 | | $f_F=$ | 0,75 | | $Q_{Sa}/Q_{Ga}=$ | 0,7385 |
| Fremdwärmenutzungsgrad $\eta_F=e^{-(0,5 \cdot Q_{Sa}/Q_{Ga})}$ Gl. 25 Seite 11 | | $\eta_F=$ | 0,691 | | | |
| $f_6=$ Korrekturfaktor zur Ausnutzung der Fremdwärme Gl. 24 Seite 10 | | | | $f_6=$ | 0,52 | |
| | | | | | | |
| Jahres-Fremdwärmegegewinn $Q_{FG}=f_6 \cdot (Q_{Sa} + Q_{iB})$ Gl. 9 Seite 5 | | $Q_{FG}=$ | 90,80 | MWh | | |
| Voraussichtl. Jahres-Heizwärmebedarf $Q_{HiB}=Q_{Ga} - Q_{FG}$ Gl.7 Seite 5 | | $Q_{HiB}=$ | 34,37 | MWh | | |
| Voraussichtl. Jahres-Vollbenutzungsstunden $b_{vH}=Q_{HiB}/Q_{N, Geb.}$ Gl. 6 Seite 4 | | $b_{vH}=$ | 560,75 | h/a | | |

7.2.2 Jährlicher Energiebedarf für Warmwasser $Q_{WE,a}$

7.2.2.1 Jahres-Nutzenergiebedarf Warmwasser im Wohnbereich $Q_{N,a1}$

| Ausstattungsvarianten: | Personenbezogener Nutzenergiebedarf in kWh/dP Maximalwert |
|--|--|
| Ganzreinigung des Körpers | |
| nur Dusche | 1,0 |
| nur Wanne klein | 1,4 |
| nur Wanne groß | 1,9 |
| Dusche und Wanne klein | 1,3 |
| Dusche und Wanne groß | 1,5 |
| | |
| Teilreinigung des Körpers | |
| Waschtisch | 0,6 |
| Bidet | 0,2 |
| | |
| Reinigung des Geschirrs | |
| nur von Hand | 0,2 |
| Maschine (TWK) rest Hand | 0,05 |
| Maschine (TWW) rest Hand | 0,25 |
| | |
| Reinigung der Wäsche | |
| Maschine (TWW) | 0,06 |
| Personenbezogener täglicher Nutzenergiebedarf im Hauptwohnbereich | 2,41 |

| Nutzenergiebedarf für die Warmwasserbereitung $Q_{N,a1}=n_P \cdot q_{N,ges,a}$ | | | |
|--|-------------|--------------|--|
| Personenbezogener täglicher Nutzenergiebedarf im Hauptwohnbereich | 2,41 | kWh/dP | |
| Anzahl der Personen im Hauptwohnbereich n_P | 8 | Personen | |
| jährliche Nutzungszeit z | 345 | Tage | |
| Personenbezogener jährlicher Nutzenergiebedarf $q_{N,ges,a}$ | 831,5 | kWh/a,P | |
| jährliche Nutzenergiebedarf Warmwasser Hauptwohnbereich | 6652 | kWh/a | |
| Nutzenergiebedarf für Warmwasser im Wohnbereich $Q_{N,a1}$ | 6652 | kWh/a | |

7.2.2.2 Jahres-Nutzenergiebedarf Warmwasser Gastronomiebereich $Q_{N,a2}$

| Gesamter Wärmebedarf für Warmwasser im Restaurantbereich | | |
|---|--------------|-------------|
| Personenbezogener Warmwasserbed. in Gaststätten | kWh/dP | 1,2 |
| Durchschnittliche, tägliche Besucherzahl im Restaurant | Pers. | 20 |
| Durchschnittliche jährliche Öffnungszeit | Tage/a | 200 |
| Gesamter Wärmebedarf für Warmwasser im Restaurantbereich $Q_{N,a2}$ | kWh/a | 4800 |

7.2.2.3 Jahres - Nutzenergiebedarf Warmwasser Büro- und Produktionsbereichbereich $Q_{N,a,3}$

| 3 und 4 Büro- und Produktionsbereich | | | |
|---|------------------------------|---|----------------|
| | Liter/Tag,Person bei 45°C | Energiebedarf/Tag*Pers. bei TK = 10°C in kWh/d*Pers. | |
| Bürobereich | 10 | 0,41 | |
| Produktionsbereich | 40 | 1,63 | |
| tägliche Anwesenheit der Personen inkl. Gleichzeitigkeit Büro | | | Pers. 7 |
| tägliche Anwesenheit der Personen inkl. Gleichzeitigkeit Produktion | | | Pers. 10 |
| jährliche Arbeitstage | | | Tage/a 210 |
| Gesamter Wärmebedarf für Warmwasser im Büro | | | kWh/a 598,3635 |
| Gesamter Wärmebedarf für Warmwasser im Produktionsbereich | | | kWh/a 3419,22 |
| Gesamter Wärmebedarf | | | kWh/a 4017,58 |

7.2.2.4 Berechnung des Wärmearaufwand für die Nutzenübergabe und des Hilfsenergiebedarfs für die Warmwasserbereitung

| 1 | Wohnbereich | Hauptwohnbereich | | | | | | | |
|----|--|---------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 2 | Räume (Wohn-, Schlaf-, und Aufenthaltsräume) | 10 | | | | | | | |
| 3 | Personenzahl | 6 | | | | | | | |
| 4 | Warmwasserversorgung/-temperatur/ Durchlauferhitzer und oder Speicher | Zentra | | | | | | | |
| 5 | Wassererwärmer | Speicher, Durchlauf, 360l | | | | | | | |
| 6 | Warmwassertemperatur | 60°C | | | | | | | |
| 7 | Sanitäreinrichtung | SP | WT1 | WT2 | WT3 | BR1 | BR2 | NB | |
| 8 | Armaturen (E=Einhebel, Z=Zweigriff, T=Thermostat) | E | E | E | E | T | T | E | |
| 9 | Nutzungsfrequenz nach VDI 2067 Blatt12 | 1/d | 0,13 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| 10 | Nutzungsfrequenz*Personenzahl | 1/d | 0,78 | 4,2 | 4,2 | 4,2 | 1,2 | 1,2 | 0,6 |
| 11 | Laufzeit der Zirkulationspumpe | h/d | 12 | | | | | | |
| | Anzahl der Zirkulationsunterbrechungen | 1/d | 2 | | | | | | |
| 12 | Laufzeit der Speicherladung | h/d | 0 | | | | | | |
| 13 | Wärmearaufwand für die Ein- und Nachstellung und für die Sticheleitung | | | | | | | | |
| 14 | Einregulierbedarf/Armaturen | Wh | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 4,7 | 4,7 | 0 |
| 15 | Einregulieraufwand | Wh/d | 9,126 | 49,14 | 49,14 | 49,14 | 5,64 | 5,64 | 0 |
| 17 | Rohrlänge DN 12 | m | | | | | | | |
| 18 | Spez. Wärmearaufwand/Nutzung nach Tab. A3 | Wh/m | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| 19 | Wärmearaufwand | Wh/d | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | Rohrlänge DN 15 | m | 0,5 | 3 | 3 | 2 | 1,5 | 1,5 | |
| 21 | Spez. Wärmearaufwand/Nutzung nach Tab. A3 | Wh/m | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 |
| 22 | Wärmearaufwand | Wh/d | 5,7 | 34,2 | 34,2 | | | | 0 |
| 23 | Rohrlänge DN 18 | m | 0 | 0 | 0 | | | | 2 |
| 24 | Spez. Wärmearaufwand/Nutzung nach Tab. A3 | Wh/m | 17,1 | 17,1 | 17,1 | 17,1 | 17,1 | 17,1 | 17,1 |
| 25 | Wärmearaufwand | Wh/d | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34,2 |
| 26 | Wärmearaufwand Sticheleitungen | Wh/d | 5,7 | 34,2 | 34,2 | 0 | 0 | 0 | 34,2 |

| | | | | | | | | |
|----|--|-------|-----------------|--|---------|-------|--|--|
| | Wärmeaufwand für Einregulierung | Wh/d | 167,83 | | | | | |
| 27 | Wärmeaufwand Stichelung | Wh/d | 108,3 | | | | | |
| 28 | Wärmeaufwand für die Verteilung für das gesamte Gebäude | | | | | | | |
| 29 | Zirkulation | | einzeln gedämmt | | | | | |
| 30 | Unbeheizter Keller | m | 70 | | | | | |
| | Wärmestrom | W/m | 11 | | | | | |
| | Wärmeleistung Zirkulationsumlauf | W | 770 | | | | | |
| 31 | Wärmeaufwand für die Verteilung | Wh/d | 9240 | | | | | |
| | Wärmeaufwand für Speicherung | kWh/d | 2,94 | Wärmeaufwand für den Speicherbetrieb $Q_{B,a}$ | 1073,1 | kWh/a | | |
| 32 | Hilfsenergiebedarf | | | | | | | |
| 33 | Errechnete Leistung der Zirkulationspumpe | W | | Leistung Zirkulationspumpe | 25 | | | |
| 34 | Stromaufwand Zirkulationspumpe | Wh/d | 300 | | | | | |
| | Wärmeaufwand für die Nutzenübergabe | Wh/d | 10589,23 | kWh/a | 3859,54 | | | |
| 35 | Hilfsenergiebedarf | Wh/d | 300 | kWh/a | 109,5 | | | |

7.2.2.5 Gesamtenergiebedarf für Heizung und Warmwasser Q_{ges}

| Jährlicher Brennstoffenergiebedarf Gasheizung | | | | |
|--|---|--------------------|----------|-------|
| Gesamter Wärmebedarf: | $Q_{ges.}=(Q_{Ha}+Q_{N,a})$ | $Q_{ges.} =$ | 53965,21 | kWh/a |
| Solare Nutzenergie: | $Q_{solar} = \text{aus dynamischer Simulationsberechnung}$ | $Q_{solar} =$ | 0 | kWh/a |
| Solarer Deckungsanteil: | $\alpha_{Solar} = Q_{Solar} / Q_{gesamt}$ | $\alpha_{Solar} =$ | 0,00 | |
| Kesselnutzungsgrad | $\eta_{Kessel,a} = (\eta_K * f_s) / ((b_a / b_{VH} - 1) * q_B + 1)$ | $\eta_{Kessel} =$ | 0,95 | |
| Verteilnutzungsgrad | $\eta_V = \text{Pauschalwert VDI 2067}$ | $\eta_V =$ | 0,98 | |
| Gesamt-Nutzungsgrad | $\eta_{ges} = \eta_{Kessel,a} * \eta_V$ | $\eta_{ges} =$ | 0,93 | |
| Gesamter Wärmebedarf | | | 57964,78 | |
| Brennstoffenergiebedarf: | $Q_{Brennstoff} = Q_{ges.} * (1 - \alpha_{Solar})$ | $Q_{Brennstoff} =$ | 57964,78 | kWh/a |

7.2.3 Berechnung der elektrischen Hilfsenergie für Heizung

| Pumpen | Anzahl | Betriebsstunden h/a | elektr. Leistung $P_{1.100\%}$ [kW] | elektr. Leistung $P_{1.75\%}$ [kW] | elektr. Leistung $P_{1.25\%}$ [kW] | elektr. Leistung $P_{1.50\%}$ [kW] | Jährliche elektr. Energie [kWh/a] |
|---|--------|---------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Heizkreis: | | | | | | | |
| HK-Ost | 1 | 5550 | 0,171 | 0,163 | 0,144 | 0,154 | 843,43 |
| HK-West | 1 | 5550 | 0,171 | 0,163 | 0,144 | 0,154 | 843,43 |
| Betonkern | 1 | 5550 | 0,171 | 0,163 | 0,144 | 0,154 | 843,43 |
| Boiler | 1 | 730 | 0,11 | | | | 80,30 |
| Summe Hilfsenergiebedarf Heizung | | | | | | | 2610,60 |

7.3 Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten

$$A_{N, V, Ges} = A_{V1} \cdot b_{AV}$$

$$A_{N, V, Ges} = 6.756,22 \text{ €/ } a$$

A_{V1} = verbrauchsgebundene Zahlungen im ersten Jahr

$$A_{V1} = Q_{\text{Wärme}} \cdot K_{A, Gas} + \dot{Q}_{GK} \cdot K_{L, Gas} + K_{Z, Gas} + Q_{\text{Strom}} \cdot K_{\text{Strom}}$$

$$A_{V1} = 3.415,08 \text{ €/ } a$$

$Q_{\text{Wärme}}$ = Energiebedarf für Heizung und Warmwasser = 57964,78 kWh/a [VDI 2067 Blatt 2, 12, 22]

Q_{Strom} = Hilfsenergiebedarf = 2720,1 kWh/a [Pumpenstrom]

$K_{A, Gas}$ = Arbeitspreis Gas = 4,91 Ct/kWh [Preistabelle Stadtwerke Reutlingen]

Q_{GK} = Wärmeleistung Gas-Kessel = 62 kW

$K_{L, Gas}$ = Leistungspreis Gas = 13,39 €/kW*a [Preistabelle Stadtwerke Reutlingen]

$K_{Z, Gas}$ = Zählpreis Gas = 24,99 €/a [Preistabelle Stadtwerke Reutlingen]

K_{Strom} = Strompreis = 20 Ct/kWh [Standartwert]

7.4 Annuität der betriebsgebundenen Kosten

$$A_{N, B, Ges} = (A_{B1, GK} + A_{B1, TWSp} + A_{B1, R, M, S, F} + A_{B1, Fh} + A_{B1, MAG} + A_{B1, Pumpe}) \cdot b_{AB}$$

$$A_{N, B, Ges} = 172,72 \text{ €/ } a$$

$A_{B1, i}$ = betriebsgebundene Zahlung der einzelnen Komponenten im ersten Jahr

$$A_{B1, i} = A_{0, i} \cdot f_{W, i}$$

$$A_{B1, ges} = \sum A_{B1, i} = 140,63 \text{ €/ } a$$

$A_{0, i}$ = Investitionskosten der Komponente i der Anlage

$f_{W,i}$ = prozentualer Anteil für Wartung der Komponente i [VDI 2067 Blatt 1]

$f_{W,GK}$ = 1 %

$f_{W,TWSp}$ = 0,3 %

$f_{W,R,M,S,F}$ = 0 %

$f_{W,Fh}$ = 0 %

$f_{W,MAG}$ = 0,5 %

$f_{W,Pumpe}$ = 0 %

7.5 Gesamt Annuität

$$A_{N, ges} = A_{N, K, ges} + A_{N, V, ges} + A_{N, B, ges}$$

$$A_{N, ges} = 16.169,88 \text{ €/a}$$

7.6 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Variante Gas-Brennwertheizung im Sonnen-Zentrum

| Kostengruppen und Kostenarten | Anschaffungs-kosten € | Jahres-kosten €/a | Bemerkungen |
|---|-----------------------|-------------------|-------------|
| A. Kapitalgebundene Kosten | | | |
| Gesamte kapitalgebundenen Kosten | 93.925,33 € | 9.240,94 € | |
| B. Verbrauchsgebundene Kosten | | | |
| B.1 Brennstoff- bzw. Energiekosten einschl. Zinskosten für Lagerung | | 3.691,87 € | |
| B.2 Kosten für elektrische Hilfsenergie | | 544,02 € | |
| B.3 Kosten für sonstige Betriebsstoffe | | - € | |
| B.4 Anfuhr- und Lagerkosten | | - € | |
| Gesamte Annuität Verbrauchsgebundenen Kosten | | 6.756,22 € | |
| C. Betriebsgebundene Kosten | | | |
| C.1 Betätigung, Bedienung, Reinigung | | | |
| C.2 Kundendienst | | | |
| C.3 Schornsteinfegergebühr | | | |
| Gesamte Annuität Betriebsgebundenen Kosten | | 172,72 € | |
| D. Sonstige Kosten | | | |
| | | | |
| Gesamte Sonstige Kosten | | - € | |
| Jahreskosten | | | |
| Gesamtannuität | | 16.169,88 € | €/a |

8 Berechnung der Wirtschaftlichkeit Variante Sonnenheizung

8.1 Annuität der kapitalgebundenen Kosten

Kollektor

Nutzungsdauer $TN = 30$ a

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 0

$f_{k,Koll} =$ Anteil der Instandsetzungskosten = 0,5 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$A_{0,Koll} =$ Investition Kollektor abzüglich Förderung

$$A_{N, K, Koll} = A_{0, Koll} \cdot a + \frac{f_{k, Koll}}{100} \cdot A_{0, Koll} \cdot b_{aIN}$$

Pufferspeicher

Nutzungsdauer $TN = 25$ a

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 1

$f_{k,Sp} =$ Anteil der Instandsetzungskosten = 1,0 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$A_{0,Sp} =$ Investition Kollektor abzüglich Förderung

$$A_{N, K, Sp} = (A_{0, Sp} + A_{1, Sp} - R_{WSp}) \cdot a + \frac{f_{k, Sp}}{100} \cdot A_{0, Sp} \cdot b_{aIN}$$

Holz-Vergaserkessel

Nutzungsdauer $TN = 20$ a

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 1

$f_{k,Kessel} =$ Anteil der Instandsetzungskosten = 2,0 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$A_{0,Kessel} =$ Investition Holzessel abzüglich Förderung

$$A_{N, K, Kessel} = (A_{0, Kessel} + A_{1, Kessel} - R_{WKessel}) \cdot a + \frac{f_{k, Kessel}}{100} \cdot A_{0, Kessel} \cdot b_{aIN}$$

Rohrleitungsmaterial und Montage für Speicher und Feuerungsanlage

Nutzungsdauer $TN = 40$ a

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 0

$f_{k,R,M,S,F}$ = Anteil der Instandsetzungskosten = 1,0 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$A_{0,R,M,S,F}$ = Investition

$$A_{N,K,R,M,S,F} = (A_{0,R,M,S,F} - R_{WR,M,S,F}) \cdot a + \frac{f_{k,R,M,S,F}}{100} \cdot A_{0,R,M,S,F} \cdot b_{aIN}$$

Rohrleitungsmaterial und Montage für Kollektoranlage

Nutzungsdauer $TN = 40$ a

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 0

$f_{k,R,M,Koll}$ = Anteil der Instandsetzungskosten = 1,0 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$A_{0,R,M,Koll}$ = Investition

$$A_{N,K,R,M,Koll} = (A_{0,R,M,Koll} - R_{W,R,M,Koll}) \cdot a + \frac{f_{k,R,M,Koll}}{100} \cdot A_{0,R,M,Koll} \cdot b_{aIN}$$

Flächenheizung inklusive Montage

Nutzungsdauer $TN = 30$ a

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 0

$f_{k,Fh}$ = Anteil der Instandsetzungskosten = 1,0 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$A_{0,Fh}$ = Investition

$$A_{N,K,Fh} = A_{0,Fh} \cdot a + \frac{f_{k,Fh}}{100} \cdot A_{0,Fh} \cdot b_{aIN}$$

Ventile

Nutzungsdauer $TN = 10$ a

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 2

$f_{k,Vent}$ = Anteil der Instandsetzungskosten = 1,5 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$A_{0,Vent}$ = Investition

$$A_{N, K, Vent} = (A_{0, Vent} + A_{1, Vent} + A_{2, Vent} - R_{W, Vent}) \cdot a + \frac{f_{k, Vent}}{100} \cdot A_{0, Vent} \cdot b_{aIN}$$

Membran - Ausdehnungsgefäß

Nutzungsdauer TN = 15 a

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 1

$f_{k, Vent}$ = Anteil der Instandsetzungskosten = 0 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$A_{0, Vent}$ = Investition

$$A_{N, K, MAG} = (A_{0, MAG} + A_{1, MAG}) \cdot a + \frac{f_{k, MAG}}{100} \cdot A_{0, MAG} \cdot b_{aIN}$$

Umwälzpumpen

Nutzungsdauer TN = 10 a

Anzahl der Ersatzbeschaffungen = 2

$f_{k, Pumpe}$ = Anteil der Instandsetzungskosten = 2,0 % der Investition [VDI 2067 Blatt 1]

$A_{0, Pumpe}$ = Investition

$$A_{N, K, Pumpe} = (A_{0, Pumpe} + A_{1, Pumpe} + A_{2, Pumpe}) \cdot a + \frac{f_{k, Pumpe}}{100} \cdot A_{0, Pumpe} \cdot b_{aIN}$$

Gesamtannuität der kapitalgebundenen Kosten

$$A_{N, K, Ges} = \sum A_{N, K}$$

$$A_{N, K, Ges} = 16.156,75 \text{ €/ } a$$

8.2 Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten

8.2.1 Jährlicher Heizwärmebedarf $Q_{H,a}$

| | | | | | | | |
|--|--|-----------------|-----------|--|------|--|------------|
| Projektbezeichnung: Sonnen-Zentrum Oberndorf | | | | | | | |
| Gebäudeart: Gewerliches Gebäude mit Wohnbereich | | | | Art der Heizung | | Warmwasserheizung Solar mit Holz-Unterstützung | |
| Klimadaten gemäß Anhang A7: | | | | Norm-Wärmebedarf | | $Q_{N,Geb=}$ | 61,3 kW |
| Wetterstation: | | Tübingen | | mittlere Norm-Innentemperatur | | $t_{im=}$ | 20 °C |
| Norm-Außentemperatur | | $t_{a=}$ | -14 °C | Bauart nach DIN 4701 | | | |
| Außentemperatur-Korrektur | | $\Delta t_{a=}$ | 2 K | Nutzungsfläche des Gebäudes | | $A_{E=}$ | 1654 m² |
| Norm-Außentemperatur Korrigiert | | $t_{a=}$ | -16 °C | Flächenbezogener Wärmebedarf | | $q=$ | 37,06 W/m² |
| mittlere Außentemperatur | | $t_{am=}$ | 5,7 °C | Gesamte Fensterfläche des Gebäudes | | $A_{FF=}$ | 240,7 m² |
| Anzahl der Heiztage/Jahr | | $z=$ | 279,2 d/a | Eingeschränkt beheizte Fläche des Geb. (z.B. 15°C) | | | 744 m² |
| TRY-Region (Anhang A7) | | | 5 | | | | |
| f ₁ =Korrekturfaktor für Lüftungswärmebedarf | | | | | | | |
| Luftwechsel-Richtwerte | | | | Luftwechsel | | $n=$ | 0,5 |
| normaler Luftwechsel | | $n=$ | 0,5 | lichte Raumhöhe | | $h_{Raum=}$ | 3 |
| erhöhter Luftwechsel | | $n=$ | 0,75 | Lüftungswärmeanteil | | $\zeta=$ | 0,6 |
| starker Luftwechsel | | $n=$ | 1 | Lüftungswärmebedarf | | $Q_{L=}$ | 36,8 |
| | | | | Bewertungsfaktor Fensterlüftung | | $f_{L=}$ | 0 |
| | | | | Korrekturfaktor für Lüftungswärmebedarf | | $f_{1=}$ | 1 |
| f ₂ =zeitlich eingeschränkter Heizbetrieb | | | | | | | |
| Bauweise gemäß Tab. 1 Seite 7 | | | | Bauweise= | | b | |
| Gebäudekonstante gemäß Tab. 1 Seite 7 | | | | $\tau=$ | | 67,46 | |
| Bei Fußbodenheizung Aufbau leicht=1;mittel=2;schwer=3 | | | | Fb.-Aufbau= | | 3 | |
| Erhöhung der Gebäudekonstante dadurch auf | | | | $\tau=$ | | 77,46 | |
| Raumgruppen mit unterschiedlichen Betriebszeiten | | | | 1 | 2 | 3 | |
| Wärmebedarfsanteil bzw. Außenwandanteil der Raumgruppe | | | | 20 | 30 | 50 | % |
| Regelung: 1=Absenkung;2=Abschaltung;3=Optimierung | | | | 1 | 1 | 1 | |
| Dauer der Einschränkung werktags: 0...16h | | | | 8 | 8 | 0 | h |
| daraus der Bewertungsfaktor f_{ET} nach Tab. 2 Seite 8 | | | | 0,97 | 0,97 | 1 | |
| Dauer der Einschränkung Wochenende: 0...60h | | | | 0 | 0 | 60 | h |
| daraus der Bewertungsfaktor f_{bw} nach Tab. 2 Seite 8 | | | | 0 | 0 | 0,78 | |
| Bewertungsfaktor Raumgruppe f_E Gl.17 | | | | 0,55 | 0,55 | 0,91 | |
| Korrekturfaktor alle Zonen nach Gl.18 Seite 7 | | | | | | $f_{2=}$ | 0,73 |
| f ₃ =räumlich eingeschränkter Heizbetrieb | | | | | | | |
| Anteil der räumlich eingeschränkt beheizten Flächen | | | | $\alpha_r=$ | | 0,45 | |
| Korrekturfaktor räumlich eingeschränkter Heizbetrieb f_3 Gl. 19 bzw. Seite 8 | | | | | | $f_{3=}$ | 0,85 |
| f ₄ =Ausstattung mit Regelgeräten | | | | | | | |
| Ausstattung mit Regelgeräten gemäß Tab.4, Seite 9 | | | | | | n | |

| | | | | | | | |
|--|--|------------|-------------------|----------------------|------------------|--------|--|
| Gütefaktor nach f_R Tabelle 4, Seite 9 | | | $f_R=$ | 1,02 | | | |
| Korrekturfaktor für Ausstattung mit Regelgeräten | | | | | $f_d=$ | 1,03 | |
| | | | | | | | |
| $f_5=$ abweichende Raumtemperatur im Betrieb | | | | | | | |
| eingestellte Raumtemperatur im abweichenden Betrieb | | | $\vartheta_{iB}=$ | 22 °C | | | |
| Korrekturfaktor für abweichende Raumtemperatur im Betrieb Gl. 21, Seite 9 | | | | | $f_6=$ | 1,14 | |
| | | | | | | | |
| Jahres-Heizwärmebedarf ohne Fremdwärme | | | | | | | |
| $Q_{Ga}=f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot 24 \cdot z \cdot (\vartheta_{im} - \vartheta_{am}) / (\vartheta_{im} - \vartheta_a) \cdot Q_{N, Geb.}$ Gl.8, Seite 5 | | | $Q_{Ga}=$ | 125,17 | MWh | | |
| | | | | | | | |
| $f_6=$ Korrekturfaktor zur Ausnutzung der Fremdwärme | | | | | | | |
| Nutzung: Wohnung=1; Büro=2; Krankenhaus=3; Schule ein-/zweischichtig=4/5; sonstige=6 | | | | | 1,2,6 | | |
| Innerer Fremdwärmeanfall je m ² Nutzfläche und Jahr | | $q_{iB}=$ | 50 | kWh/m ² a | | | |
| Innerer Fremdwärmeanfall je Jahr Gl. 23 Seite 10 | | $Q_{iB}=$ | 82,7 | MWh/a | | | |
| Spezifischer Fremdwärmeanteil q_{Sa} durch Sonneneinstrahlung je m ² Fensterfläche Tab. A7 | | $q_{Sa}=$ | 206 | kWh/m ² a | | | |
| Äußerer Fremdwärmeanfall bei i.M. in kWh/m ² a Fe Tab. 7 Seite 21 | | $Q_{Sa}=$ | 92,44 | MWh/a | | | |
| Bewertungsfaktor Fremdwärmenutzung gemäß Tab. 4 Seite 9 | | $f_F=$ | 0,75 | | $Q_{Sa}/Q_{Ga}=$ | 0,7385 | |
| Fremdwärmenutzungsgrad $\eta_F=e^{-(0,5 \cdot Q_{Sa}/Q_{Ga})}$ Gl. 25 Seite 11 | | $\eta_F=$ | 0,691 | | | | |
| $f_6=$ Korrekturfaktor zur Ausnutzung der Fremdwärme Gl. 24 Seite 10 | | | | | $f_6=$ | 0,52 | |
| | | | | | | | |
| Jahres-Fremdwärmegegewinn $Q_{FG}=f_6 \cdot (Q_{Sa} + Q_{iB})$ Gl. 9 Seite 5 | | $Q_{FG}=$ | 90,80 | MWh | | | |
| Voraussichtl. Jahres-Heizwärmebedarf $Q_{HiB}=Q_{Ga} - Q_{FG}$ Gl.7 Seite 5 | | $Q_{HiB}=$ | 34,37 | MWh | | | |
| Voraussichtl. Jahres-Vollbenutzungsstunden $b_{VH}=Q_{HiB}/Q_{N, Geb.}$ Gl. 6 Seite 4 | | $b_{VH}=$ | 560,75 | h/a | | | |

8.2.2 Jährlicher Energiebedarf für Warmwasser $Q_{WE,a}$

8.2.2.1 Berechnung des Jahres-Nutzenergiebedarf Warmwasser Wohnbereich

$Q_{N,a1}$

| Ausstattungsvarianten: | Personenbezogener Nutzenergiebedarf in kWh/dP Maximalwert |
|--|--|
| Ganzreinigung des Körpers | |
| nur Dusche | 1,0 |
| nur Wanne klein | 1,4 |
| nur Wanne groß | 1,9 |
| Dusche und Wanne klein | 1,3 |
| Dusche und Wanne groß | 1,5 |
| | |
| Teilreinigung des Körpers | |
| Waschtisch | 0,6 |
| Bidet | 0,2 |
| | |
| Reinigung des Geschirrs | |
| nur von Hand | 0,2 |
| Maschine (TWK) rest Hand | 0,05 |
| Maschine (TWW) rest Hand | 0,25 |
| | |
| Reinigung der Wäsche | |
| Maschine (TWW) | 0,06 |
| Personenbezogener täglicher Nutzenergiebedarf im Hauptwohnbereich | 2,41 |

| Nutzenergiebedarf für die Warmwasserbereitung $Q_{N,a1}=n_P \cdot q_{N,ges,a}$ | | |
|--|-------------|--------------|
| Personenbezogener täglicher Nutzenergiebedarf im Hauptwohnbereich | 2,41 | kWh/dP |
| Anzahl der Personen im Hauptwohnbereich n_P | 8 | Personen |
| jährliche Nutzungszeit z | 345 | Tage |
| Personenbezogener jährlicher Nutzenergiebedarf $q_{N,ges,a}$ | 831,5 | kWh/a,P |
| jährliche Nutzenergiebedarf Warmwasser Hauptwohnbereich | 6652 | kWh/a |
| Nutzenergiebedarf für Warmwasser im Wohnbereich $Q_{N,a1}$ | 6652 | kWh/a |

8.2.2.2 Berechnung des Jahres-Nutzenergiebedarf Warmwasser Gastronomiebereich $Q_{N,a,2}$

| Gesamter Wärmebedarf für Warmwasser im Restaurantbereich | | |
|--|--------------|-------------|
| Personenbezogener Warmwasserbed. In Gaststätten | kWh/a | 1,2 |
| Durchschnittliche, tägliche Besucherzahl im Restaurant | Pers. | 20 |
| Durchschnittliche jährliche Öffnungszeit | Tage/a | 200 |
| Gesamter Wärmebedarf für Warmwasser im Restaurantbereich $Q_{N,a,2}$ | kWh/a | 4800 |

8.2.2.3 Berechnung des Jahres - Nutzenergiebedarf Warmwasser Büro- und Produktionsbereich $Q_{N,a,2}$

| 3 und 4 Büro- und Produktionsbereich | | | |
|---|------------------------------|---|-----------------------|
| | Liter/Tag,Person bei 45°C | Energiebedarf/Tag*Pers. bei TK = 10°C in kWh/d*Pers. | |
| Bürobereich | 10 | 0,41 | |
| Produktionsbereich | 40 | 1,63 | |
| tägliche Anwesenheit der Personen inkl. Gleichzeitigkeit Büro | | | Pers. 7 |
| tägliche Anwesenheit der Personen inkl. Gleichzeitigkeit Produktion | | | Pers. 10 |
| jährliche Arbeitstage | | | Tage/a 210 |
| Gesamter Wärmebedarf für Warmwasser im Büro | | | kWh/a 598,3635 |
| Gesamter Wärmebedarf für Warmwasser im Produktionsbereich | | | kWh/a 3419,22 |
| Gesamter Wärmebedarf | | | kWh/a 4017,58 |

8.2.2.4 Berechnung des Wärmearaufwand für die Nutzenübergabe und des Hilfsenergiebedarfs für die Warmwasserbereitung

| Zeile | | | | | | | | | |
|-------|---|---------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | Wohnbereich | Hauptwohnbereich | | | | | | | |
| 2 | Räume (Wohn-, Schlaf-, und Aufenthaltsräume) | 10 | | | | | | | |
| 3 | Personenzahl | 8 | | | | | | | |
| 4 | Warmwasserversorgung/-temperatur/ Durchlauferhitzer und oder Speicher | Zentral | | | | | | | |
| 5 | Wasserewärmer | Speicher, Durchlauf, 360l | | | | | | | |
| 6 | Warmwassertemperatur | 60°C | | | | | | | |
| 7 | Sanitäreinrichtung | SP | WT1 | WT2 | WT3 | BR1 | BR2 | NB | |
| 8 | Armaturen (E=Einhebel, Z=Zweigriff, T=Thermostat) | E | E | E | E | T | T | E | |
| 9 | Nutzungsfrequenz nach VDI 2067 Blatt12 | 1/d | 0,13 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| 10 | Nutzungsfrequenz*Personenzahl | 1/d | 1,04 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 1,6 | 1,6 | 0,8 |
| 11 | Laufzeit der Zirkulationspumpe | h/d | 12 | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|----|--|------|-----------------|----------------------------|-------|-------|------|---------|------|
| | Anzahl der Zirkulationsunterbrechungen | 1/d | 2 | | | | | | |
| 12 | Laufzeit der Speicherladung | h/d | 0 | | | | | | |
| 13 | Wärmeaufwand für die Ein- und Nachstellung und für die Stichleitung | | | | | | | | |
| 14 | Einregulierbedarf/Armaturen | Wh | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 4,7 | 4,7 | 0 |
| 15 | Einregulieraufwand | Wh/d | 12,168 | 65,52 | 65,52 | 65,52 | 7,52 | 7,52 | 0 |
| 17 | Rohrlänge DN 12 | m | | | | | | | |
| 18 | Spez. Wärmeaufwand/Nutzung nach Tab. A3 | Wh/m | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| 19 | Wärmeaufwand | Wh/d | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | Rohrlänge DN 15 | m | 0,5 | 3 | 3 | 2 | 1,5 | 1,5 | |
| 21 | Spez. Wärmeaufwand/Nutzung nach Tab. A3 | Wh/m | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 |
| 22 | Wärmeaufwand | Wh/d | 5,7 | 34,2 | 34,2 | | | | 0 |
| 23 | Rohrlänge DN 18 | m | 0 | 0 | 0 | | | | 2 |
| 24 | Spez. Wärmeaufwand/Nutzung nach Tab. A3 | Wh/m | 17,1 | 17,1 | 17,1 | 17,1 | 17,1 | 17,1 | 17,1 |
| 25 | Wärmeaufwand | Wh/d | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34,2 |
| 26 | Wärmeaufwand Stichleitungen | Wh/d | 5,7 | 34,2 | 34,2 | 0 | 0 | 0 | 34,2 |
| | Wärmeaufwand für Einregulierung | Wh/d | 223,77 | | | | | | |
| 27 | Wärmeaufwand Stichleitung | Wh/d | 108,3 | | | | | | |
| 28 | Wärmeaufwand für die Verteilung für das gesamte Gebäude | | | | | | | | |
| 29 | Zirkulation | | einzeln gedämmt | | | | | | |
| 30 | Unbeheizter Keller | m | 70 | | | | | | |
| | Wärmestrom | W/m | 11 | | | | | | |
| | Wärmeleistung Zirkulationsumlauf | W | 770 | | | | | | |
| 31 | Wärmeaufwand für die Verteilung | Wh/d | 9240 | | | | | | |
| | Wärmeaufwand für Speicherung | Wh/d | 0 | | | | | | |
| 32 | Hilfsenergiebedarf | | | | | | | | |
| 33 | Elektrische Leistung der Zirkulationspumpe | W | 25 | Leistung Zirkulationspumpe | | | 25 | | |
| 34 | Stromaufwand Zirkulationspumpe | Wh/d | 300 | | | | | | |
| | Wärmeaufwand für die Nutzenübergabe | Wh/d | 9572,07 | | | kWh/a | | 3487,16 | |
| 35 | Hilfsenergiebedarf | Wh/d | 300 | | | kWh/a | | 109,5 | |

8.2.2.5 Gesamtenergiebedarf für Heizung und Warmwasser Q_{ges}

| Jährlicher Brennstoffenergiebedarf Sonnenheizung | | | | |
|--|---|--------------------|----------|-------|
| Gesamter Wärmebedarf: | $Q_{ges}=(Q_{Ha}+Q_{N,a})$ | $Q_{ges}=\$ | 53330,62 | kWh/a |
| Solare Nutzenergie: | $Q_{solar}=\text{aus dynamischer Simulationsberechnung}$ | $Q_{solar}=\$ | 42991,1 | kWh/a |
| Solarer Deckungsanteil: | $\alpha_{Solar}=Q_{solar}/Q_{gesamt}$ | $\alpha_{Solar}=\$ | 0,81 | |
| Kesselnutzungsgrad | $\eta_{Kessel,a}=(\eta_K \cdot f_s)/((b_a/b_{VH}-1) \cdot q_B+1)$ | $\eta_{Kessel}=\$ | 0,85 | |
| Verteilnutzungsgrad | $\eta_V=\text{Pauschalwert VDI 2067}$ | $\eta_V=\$ | 0,98 | |
| Gesamt-Nutzungsgrad | $\eta_{ges}=\eta_{Kessel,a} \cdot \eta_V$ | $\eta_{ges}=\$ | 0,83 | |
| Gesamter Wärmebedarf | | | 64394,57 | |
| Brennstoffenergiebedarf: | $Q_{Brennstoff}=Q_{ges} \cdot (1-\alpha_{Solar})$ | $Q_{Brennstoff}=\$ | 12484,56 | kWh/a |

8.2.2.6 Hilfsenergiebedarf Heizung

| Pumpen | Anzahl | Betriebsstunden h/a | elektr. Leistung $P_{1,100\%}$ [kW] | elektr. Leistung $P_{1,75\%}$ [kW] | elektr. Leistung $P_{1,25\%}$ [kW] | elektr. Leistung $P_{1,50\%}$ [kW] | Jährliche elektr. Energie [kWh/a] |
|---|--------|------------------------|--|---|---|---|--------------------------------------|
| Heizkreis: | | | | | | | |
| HK-Ost | 1 | 5550 | 0,171 | 0,163 | 0,144 | 0,154 | 843,43 |
| HK-West | 1 | 5550 | 0,171 | 0,163 | 0,144 | 0,154 | 843,43 |
| Betonkern | 1 | 5550 | 0,171 | 0,163 | 0,144 | 0,154 | 843,43 |
| FBH-Terasse | 1 | pauschal | | | | | 88,67 |
| Lopper | 1 | 1100 | 0,171 | 0,163 | 0,144 | 0,154 | 167,17 |
| Solar | 1 | 6000 | 0,11 | 0,108 | 0,102 | 0 | 630,48 |
| Summe Hilfsenergiebedarf Heizung | | | | | | | 3416,62 |

8.3 Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten

$$A_{N,V} = A_{V1} \cdot b_{av}$$

$$A_{N,V} = 2.279,38 \text{€} / a$$

A_{V1} = verbrauchsgebundene Zahlungen im ersten Jahr

$$A_{V1} = Q_{\text{Restwärme}} \cdot K_{A, \text{Gas}} + \dot{Q}_{\text{GK}} \cdot K_{L, \text{Gas}} + K_{Z, \text{Gas}} + Q_{\text{Strom}} \cdot K_{\text{Strom}}$$

$$A_{V1} = 1.152,16 \text{€} / a$$

$Q_{\text{Restwärme}}$ = Energiebedarf für Heizung und Warmwasser / α_{Solar} = 12.448,56 kWh/a

Q_{Strom} = Hilfsenergiebedarf = 3.526,12 kWh/a

K_{Holz} = Holzkosten = 3,6 ct/kWh

K_{Strom} = Strompreis = 20ct/kWh [Standartwert]

$$K_{\text{Holz}} = 60 \text{€} / \text{rm} \cdot H_{u, \text{Holz}}$$

$H_{u, \text{Holz}}$ = Heizwert Laubholzmischung 15 % Wasser 1676 kWh/rm

rm = Raummeter (Volumenmaßeinheit Holz)

$$Q_{\text{Re stwärme}} = Q_{\text{Wärme}} \cdot \frac{1}{\alpha_{\text{Solar}}}$$

$\alpha_{\text{Solar}} =$ Solarer Deckungsanteil = 81 %

$$\alpha_{\text{Solar}} = \frac{Q_{\text{Solar}}}{Q_{\text{ges}}}$$

$$\alpha_{\text{Solar}} = 81\%$$

$Q_{\text{Solar}} =$ jährlicher solarer Ertrag aus Simulation DK-Solar = 42.991,1 kWh/a

$Q_{\text{ges}} =$ gesamter Energiebedarf für Heizung und Warmwasser = 53.330 kWh/a

8.4 Annuität der betriebsgebundenen Kosten

$$A_{N, B, ges} = (A_{B1, Koll} + A_{B1, Sp} + A_{B1, Kessel} + A_{B1, R, M, S, F} + A_{B1, R, M, Koll} + A_{B1, Fh} + A_{B1, Vent} + A_{B1, MAG} + A_{B1, Pumpe}) \cdot baB$$

$$A_{N, B, ges} = 1.161,04\text{€}/a$$

$A_{B1,i} =$ betriebsgebundene Zahlung der einzelnen Komponenten im ersten Jahr

$$A_{B1,i} = A_{0,i} \cdot f_{W,i}$$

$$A_{B1, ges} = \sum A_{B1,i} = 586,87\text{€}/a$$

$A_{0,i} =$ Investitionskosten der Komponente i der Anlage

$f_{W,i} =$ prozentualer Anteil für Wartung der Komponente i [VDI 2067 Blatt 1]

$$f_{W, Koll} = 1 \%$$

$$f_{W, Sp} = 0,3 \%$$

$$f_{W, Kessel} = 2,5 \%$$

$$f_{W, R, M, S, F} = 0 \%$$

$$f_{W, R, M, Koll} = 0 \%$$

$$f_{W, Fh} = 0 \%$$

$$f_{W, Vent} = 0,5 \%$$

$$f_{W,MAG} = 0,5 \%$$

$$f_{W,Pumpe} = 0 \%$$

8.5 Gesamt Annuität

$$A_{N, ges} = A_{N, K, ges} + A_{N, V, ges} + A_{N, B, ges}$$

$$A_{N, ges} = 19.597,18 \text{€} / a$$

8.6 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Variante Sonnenheizung im Sonnen-Zentrum mit staatlicher Förderung

| Kostengruppen und Kostenarten | Anschaffungs-kosten € | Jahres-kosten €/a | Bemerkungen |
|---|-----------------------|-------------------|-------------|
| A. Kapitalgebundene Kosten | | | |
| Gesamte kapitalgebundenen Kosten | 161.161,75 € | 16.156,75 € | |
| B. Verbrauchsgebundene Kosten | | | |
| B.1 Brennstoff- bzw. Energiekosten einschl. Zinskosten für Lagerung | | 446,94 € | |
| B.2 Kosten für elektrische Hilfsenergie | | 705,22 € | |
| B.3 Kosten für sonstige Betriebsstoffe | | - € | |
| B.4 Anfuhr- und Lagerkosten | | - € | |
| Gesamte Annuität Verbrauchsgebundene Kosten | | 2.279,38 € | |
| C. Betriebsgebundene Kosten | | | |
| C.1 Betätigung, Bedienung, Reinigung | | | |
| C.2 Kundendienst | | | |
| C.3 Schornsteinfegergebühr | | | |
| Gesamte Annuität Betriebsgebundene Kosten | | 1.161,04 € | |
| D. Sonstige Kosten | | | |
| | | | |
| | | | |
| Gesamte Sonstige Kosten | | - € | |
| Jahreskosten | | | |
| Gesamtannuität | | 19.597,18 € | |

8.7 Kosten Verlauf

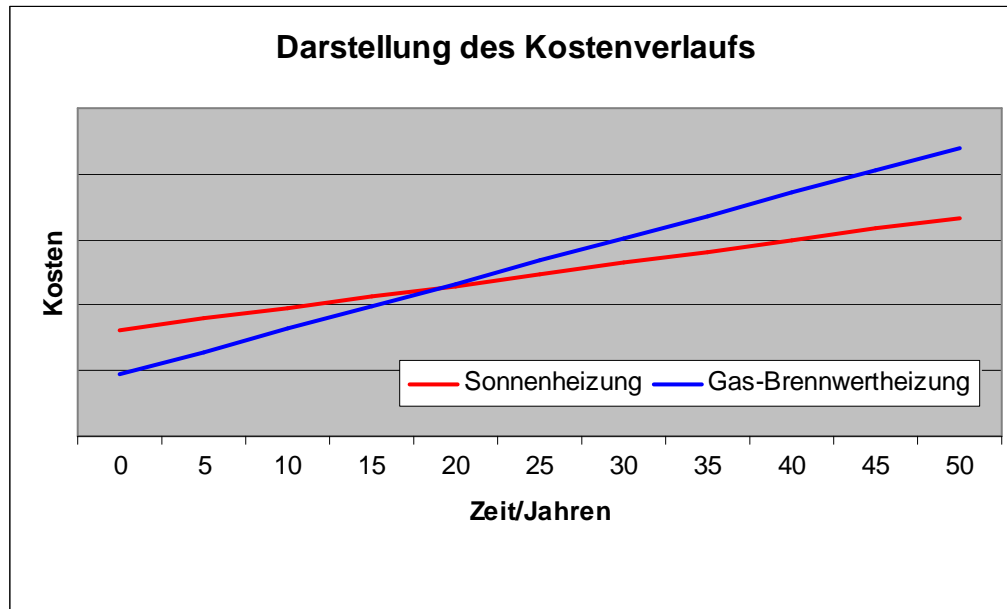


Abbildung 34: Darstellung des Verlaufs der jährlichen Kosten im Vergleich zur Investition

$$K(T) = [A_{N,V} + A_{N,B}] \cdot T + I$$

$K(T)$ = Kostenverlauf in Abhängigkeit der Zeit

$A_{N,V}$ = Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten

$A_{N,B}$ = Annuität der bedarfsgebundenen Kosten

T = Zeit in Jahren

I = Gesamtinvestition für die Wärmeerzeugungsanlage

Das oben dargestellte Diagramm stellt den Verlauf der betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten der beiden betrachteten Anlagenvarianten dar. Es zeigt deutlich, wie sich die anfangs hohen Investitionskosten der Sonnenheizung über einen längeren Zeitraum betrachtet durch die niedrigen jährlichen Kosten bezahlt macht.

In dieser Darstellung sind die Investitionskosten als Startpunkt und die Annuität der betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten als Steigung der Geraden eingesetzt. Es zeigt, dass sich die Mehrinvestition der Sonnenheizung durch die niedrigen betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten nach ca. 22 Jahren bezahlt macht.

Bei dieser Art der Betrachtungsweise kommt man anders als bei der Annuitätsrechnung zu dem Schluss, dass sich die höheren Anschaffungskosten der Sonnenheizung durch die geringen Nebenkosten über einen Zeitraum von 30 Jahren sehr wohl bezahlt machen. Bei der Berechnung für die Annuität der bedarfsgebundenen Kosten wird mit einer Preissteigerungsrate von 6 % gerechnet. Niemand kann genau vorhersagen, wie sich die Preise für Erdgas in den nächsten 30 Jahren entwickeln, jedoch kann eine klare Tendenz nach oben beobachtet werden. Diese Tendenz wird im Punkt 9 dargestellt.

9 Gaspreisentwicklung in der Zukunft

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Preise für Öl und Gas in den nächsten Jahren noch stärker ansteigen werden. Diese Annahme begründet sich durch den ständig steigenden Bedarf und die kostenintensiveren Bedingungen bei der Förderung. Es werden zwar auch heute noch ständig neue Öl- und Gasvorkommen entdeckt, jedoch handelt es sich hierbei oft um schwer zugängliche oder sogar momentan nicht wirtschaftlich förderbare Ressourcen.

In Deutschland werden über 80 % der fossilen Energieträger importiert. Der größte Anteil kommt dabei aus politisch instabilen Regionen, dies ist ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Entwicklung der Energiepreise.

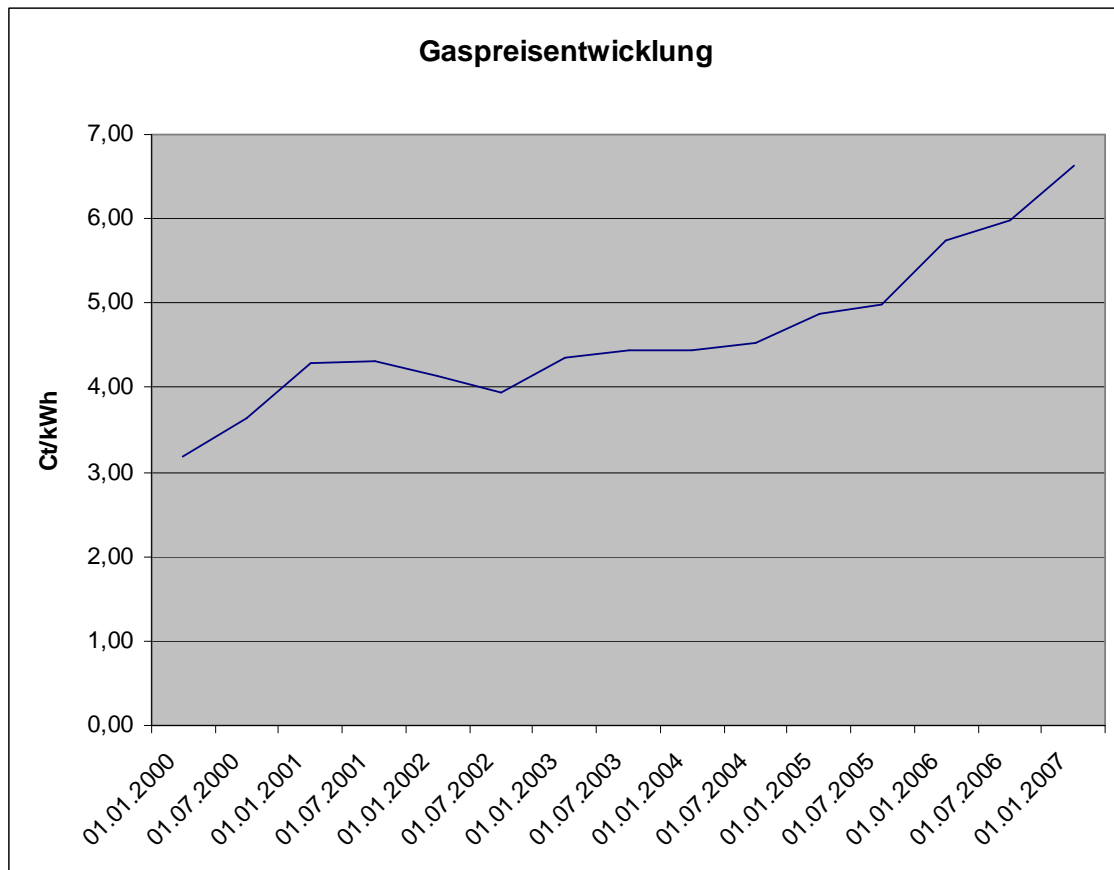


Abbildung 35: Gaspreisentwicklung /33/

Diese Entwicklung lässt sich bereits heute anhand des Diagramms eindeutig erkennen. Hier werden die Gaspreise ausgehend vom Jahr 2000 bis 2007 in Deutschland aufgezeigt. Für das Jahr 2008 wurden bereits weitere Preiserhöhungen angekündigt.

10 Bewertung der Umweltverträglichkeit

Um die beiden betrachteten Varianten bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit zu prüfen, wird ein Verfahren zur Ermittlung des CO₂-Ausstoßes mittels des spezifischen Emissionsfaktors CO₂-Äquivalent angewandt.

Der Emissionsfaktor stellt das Verhältnis der Masse des freigesetzten treibhausrelevanten Abgases zum Endenergieaufwand der betrachteten Anlage dar. Zusätzlich dazu wird der Primärenergiebedarf mittels Standardwerte für Primärenergiefaktoren des IWU der eingesetzten Energieträger ermittelt.

Durch den Primärenergiefaktor wird der Energieaufwand bei der Förderung und Herstellung von Endenergieträgern berücksichtigt. Hier hat der Endenergieträger Holz durch seine meist regionale Verfügbarkeit und die daraus resultierenden kurzen Wege vom Erzeuger bis zum Verbraucher klare Vorteile gegenüber Gas oder Öl.

$$Q_{\text{Primär}} = Q_{\text{Brennstoff}} \cdot f_{P, \text{Brennstoff}} + Q_{\text{Strom}} \cdot f_{P, \text{Strom}}$$

$$CO_2 = CO_{2\text{Äquivalent, Brennstoff}} \cdot Q_{\text{Brennstoff}} + CO_{2\text{Äquivalent, Strom}} \cdot Q_{\text{Strom}}$$

$Q_{\text{Primär}} =$ Primärenergiebedarf

$Q_{\text{Brennstoff}} =$ Energiebedarf zur Wärmeerzeugung

$Q_{\text{Strom}} =$ Hilfsenergiebedarf

$f_P =$ Primärenergiefaktor

$CO_{2\text{Äquivalent}} =$ CO_2 -Äquivalent

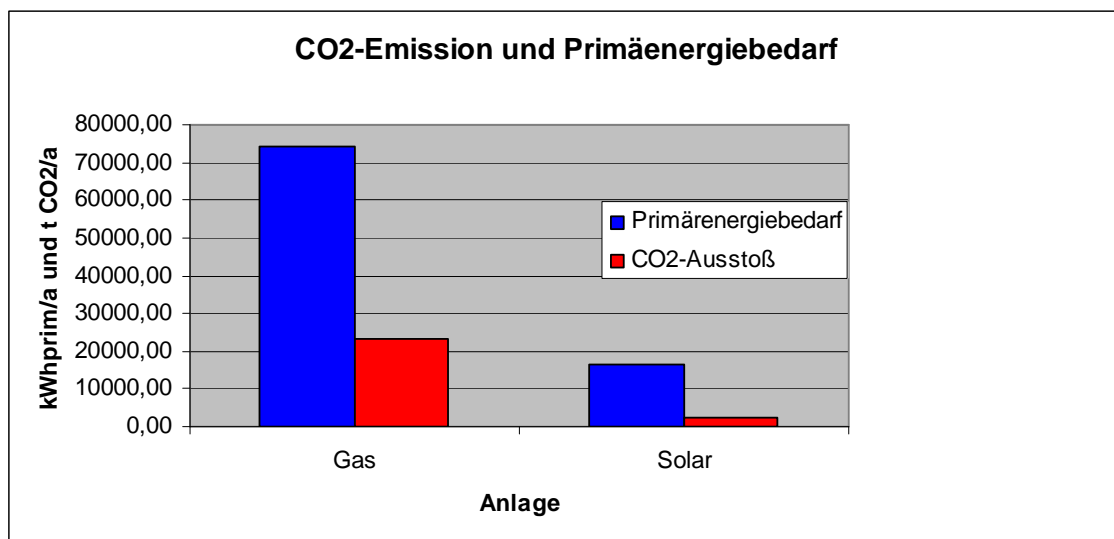


Abbildung 36: CO₂-Emission und Primärenergiebedarf

$$f_{P, \text{Gas}} = 1,14$$

$$f_{P, \text{Holz}} = 1,01$$

$$f_{P, \text{Strom}} = 2,99$$

$$CO_{2\text{Äquivalent, Gas}} = 0,249$$

$$CO_{2\text{Äquivalent, Strom}} = 0,683$$

$$CO_{2\text{Äquivalent, Holz}} = 0,006$$

11 Auswirkungen kleinerer solarer Deckungsanteile auf die Wirtschaftlichkeit

Einen Großteil der Investitionskosten im Sonnen-Zentrum werden von den Kollektoren verursacht. Darum wurde anhand der Ergebnisse im Sonnen-Zentrum unter linearisierten Bedingungen ein Zusammenhang zwischen dem solaren Deckungsanteil und der eingesetzten Kollektorfläche bei gleich bleibender Speichergröße ermittelt.

Im Allgemeinen ist es eher sinnvoll die Kollektorfläche zu vergrößern, da eine verhältnismäßig gleiche Änderung der Speichergröße eine geringere Auswirkung auf den Deckungsanteil hat. Mit diesem Diagramm kann nun die Änderung der Wirtschaftlichkeit bei Veränderung der Kollektorfläche ermittelt werden. Dazu wird zunächst ein Zusammenhang zwischen der Kollektorgröße und dem solaren Deckungsanteil hergestellt. Dies wird anhand der gegebenen Bedingungen linear ermittelt.

Deckungsanteil α bei 150 m² Kollektorfläche entspricht 81%

$$\alpha_{xm^2} = \frac{\alpha_{150m^2}}{150m^2} \cdot A_x$$

A_x = jeweilige Kollektorgröße (40....200 m²)

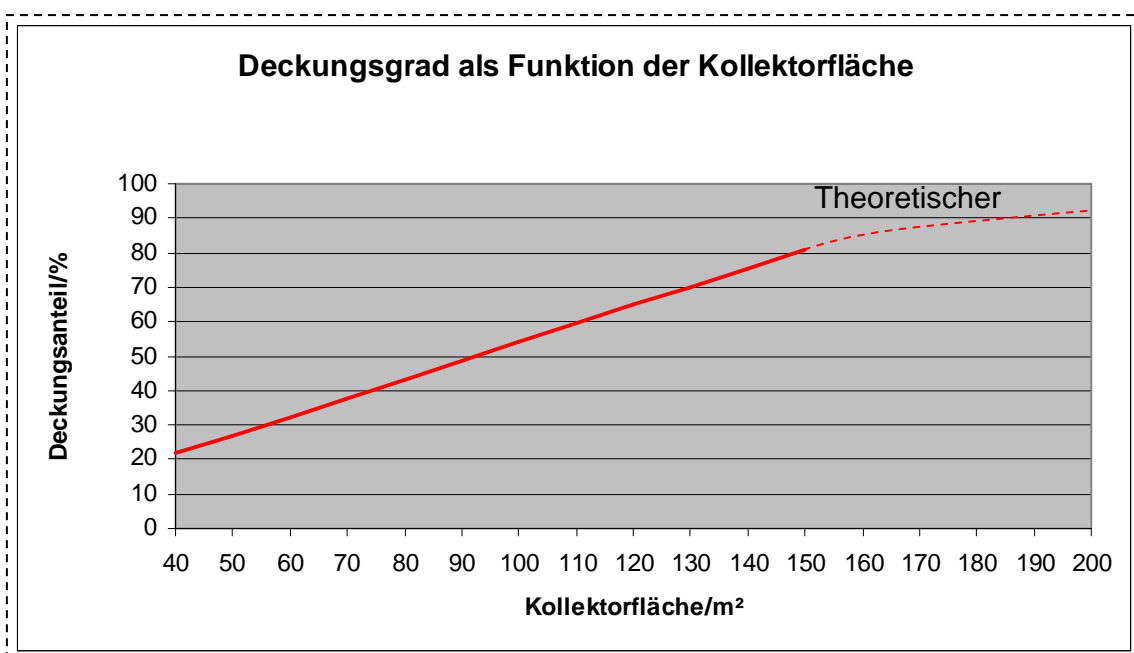


Abbildung 37: Deckungsgrad als Funktion der Kollektorfläche

Hierzu werden die Kosten bei einer stufenweisen Änderung des Deckungsanteils betrachtet.

Die auf den Quadratmeter bezogenen Kosten für die Kollektoren werden für diesen Fall vereinfacht anhand der Kosten des gegebenen Kollektors ermittelt. Diese Annahme ist zwar in der Realität nicht so gegeben, da die spezifischen Kosten mit der Größe des Kollektors abnehmen. Für diesen Fall kann vereinfachend von einer linearen Abnahme der Kosten mit der Größe ausgegangen werden. Aus den Kosten für den gegebenen Kollektor ergibt sich somit ein spezifischer Kollektorpreis von 280,50 €/m². Die Änderung des Deckungsanteils wurde in 10 % Schritten durchgeführt, die dadurch verursachte Veränderung der gesamten jährlichen Kosten ist im nachfolgenden Diagramm dargestellt.

$$K_{ges} = K_{ges, o, Kollektor} + k_{Kollektor} \cdot A_{Kollektor}$$

| | |
|---------------------------|----------------------------------|
| $K_{ges} =$ | gesamt Investition |
| $K_{ges, o, Kollektor} =$ | Gesamtinvestition ohne Kollektor |
| $k_{Kollektor} =$ | spezifischer Kollektorpreis |
| $A_{Kollektor} =$ | Kollektorgröße |

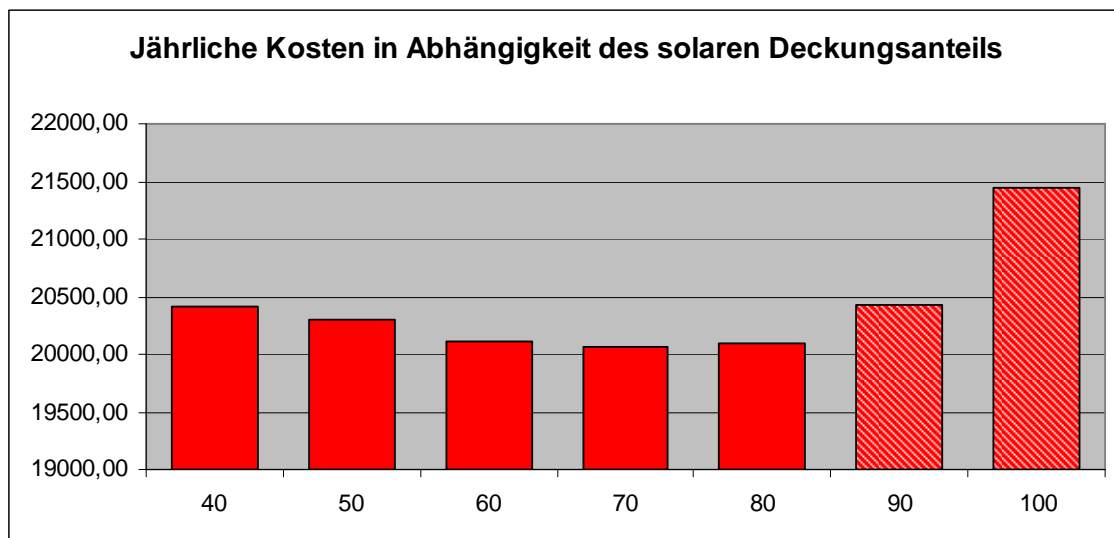


Abbildung 38: Jährliche Kosten in Abhängigkeit des solaren Deckungsanteils

Ab einem solaren Deckungsanteil von 40 % werden die jährlichen Kosten zunächst stark sinken, da dann auch eine Verringerung des Speichervolumens aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll ist. Dies würde dann zu einer zusätzlichen Senkung der Kosten führen.

12 Betriebsverhalten der Anlage

Um eine Bewertung der Funktionsweise der Solaranlage im Sonnen-Zentrum vornehmen zu können wurde das Betriebsverhalten der Anlage in mehreren Tagen mit verschiedenen Gegebenheiten untersucht. Das Verhalten der Anlage wurde über den Zeitraum vom 21.01. bis 24.01. 2008 untersucht. In diesem Zeitraum waren unterschiedliche klimatische Rahmenbedingungen gegeben, die eine aussagekräftige Untersuchung des Verhaltens im Winter zulassen. Dennoch lassen sich aufgrund der kurzen Zeit keine genauen Aussagen treffen.

Im Folgenden werden die klimatischen Rahmenbedingungen der untersuchten Tage beschrieben.

21. Januar 2008:

- Sonnenaufgang: 8.06 Uhr
- Sonnenuntergang: 17.04 Uhr
- Tageshöchsttemperatur: 8,5 °C
- Tagestiefsttemperatur: 5,0°C
- Allgemeine Wetterlage: starke - lockere Bewölkung
- Maximale mittlere Kollektortemperatur: 37,13 °C

22. Januar 2008:

- Sonnenaufgang: 8.05 Uhr
- Sonnenuntergang: 17.05 Uhr
- Tageshöchsttemperatur: 7,5 °C
- Tagestiefsttemperatur: 6,0 °C
- Allgemeine Wetterlage: starke Bewölkung

- Maximale mittlere Kollektortemperatur: 55,94 °C

23. Januar 2008:

- Sonnenaufgang: 8.04 Uhr
- Sonnenuntergang: 17.07 Uhr
- Tageshöchsttemperatur: 7,0 °C
- Tagestiefsttemperatur: -2,2 °C
- Allgemeine Wetterlage: heiter - wolkig
- Maximale mittlere Kollektortemperatur: 65,78 °C

24. Januar 2008:

- Sonnenaufgang: 8.03 Uhr
- Sonnenuntergang: 17.08 Uhr
- Tageshöchsttemperatur: 9,0 °C
- Tagestiefsttemperatur: -2,0 °C
- Allgemeine Wetterlage: sonnig
- Maximale mittlere Kollektortemperatur: 62,34 °C

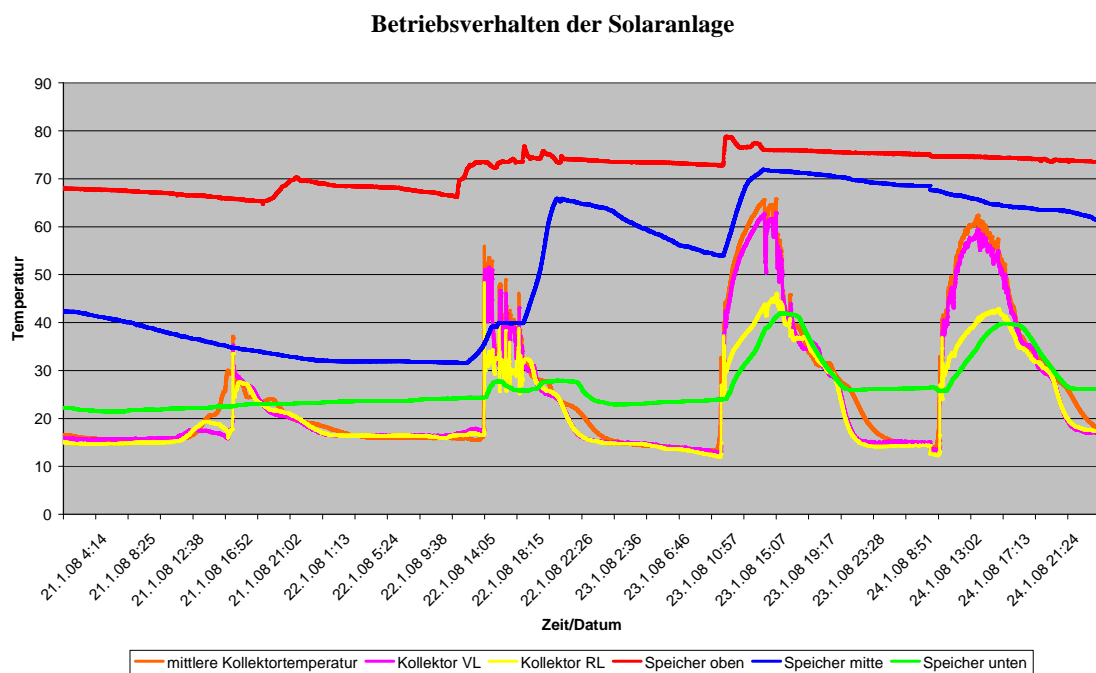


Abbildung 39: Betriebsverhalten der Solaranlage /34/

Im dargestellten Diagramm lässt sich deutlich erkennen, dass im oberen und mittleren Bereich des Speichers trotz des hohen Bedarfs im Winter nur sehr langsam entladen wird.

Im unteren Bereich sind dagegen an den sonnigen Tagen starke Temperaturänderungen zu erkennen. Die starken Anstiege im mittleren und oberen Temperaturbereich sind auf den Einsatz der Zusatzheizung zurück zu führen.

13 Optimierung der Anlage

13.1 Vorüberlegung

Bei der Optimierung solarthermischer Anlagen gibt es mehrere verschiedene Ansatzpunkte. Zum einen kann sie durch eine Ertragssteigerung, zum Beispiel durch eine Optimierung der Ausrichtung oder durch verbesserte Materialien erzielt werden und zum anderen kann durch eine Verbesserung der Ausnutzung des Ertrags eine Optimierung verwirklicht werden. Ein weiterer Schritt bei der Optimierung ist eine Verbesserung der gesamten Energiebilanz der Wärmeerzeugungsanlage des Gebäudes. Aus der Energiebedarfsberechnung für Heizung und Warmwasser geht hervor, dass im Bereich der elektrischen Hilfsenergie ein weiteres Potential zur Einsparung von Energie liegt.

Im folgenden Abschnitt werden Maßnahmen zur Verbesserung der Solarnutzung, sowie Energiesparpotentiale und ihre Wirkung im Sonnen-Zentrum dargestellt.

13.1.1 Optimierung durch Ertragssteigerung

Ein Solarkollektor hat bei einer im rechten Winkel zur Absorberfläche auftreffenden Sonneneinstrahlung seinen höchsten optischen Wirkungsgrad. Um einen optimalen Ertrag zu erzielen, bedarf es einer Nachführung des Kollektors mit der Position der Sonne. Die Technik wird bereits heute im Bereich der Photovoltaik angewandt.

Untersuchungen auf diesem Gebiet haben ergeben, dass sich durch den Einsatz von solchen „Solar Trackern“ in unseren Breiten ein Mehrertrag von 25 - 40 % ergibt. /35/

Eine Untersuchung auf diesem Gebiet für die Solarthermie konnte nicht ausfindig gemacht werden. Die Untersuchungen in dieser Arbeit beziehen sich auf gemessene Werte für die Kollektoranlage im Sonnen-Zentrum vom 26.01.2008. Für die Bewertung der Nachführung wird auf Messwerte für die Globalstrahlung des „Deutschen Wetterdienstes vom 26.01.2008 der Messstation Stuttgart zurückgegriffen. Anhand des Diagramms wurden stündliche Mittelwerte für die Globalstrahlung abgelesen. Im oberen Bereich sind die tatsächlich erwirtschafteten Werte höher als die angegebene Globalstrahlung die in Stuttgart gemessen wurde, hier wurden die Werte für die Globalstrahlung dem Maximalwert im Sonnen-Zentrum angeglichen und für die Dauer der Spitzenwerte in Stuttgart übernommen.

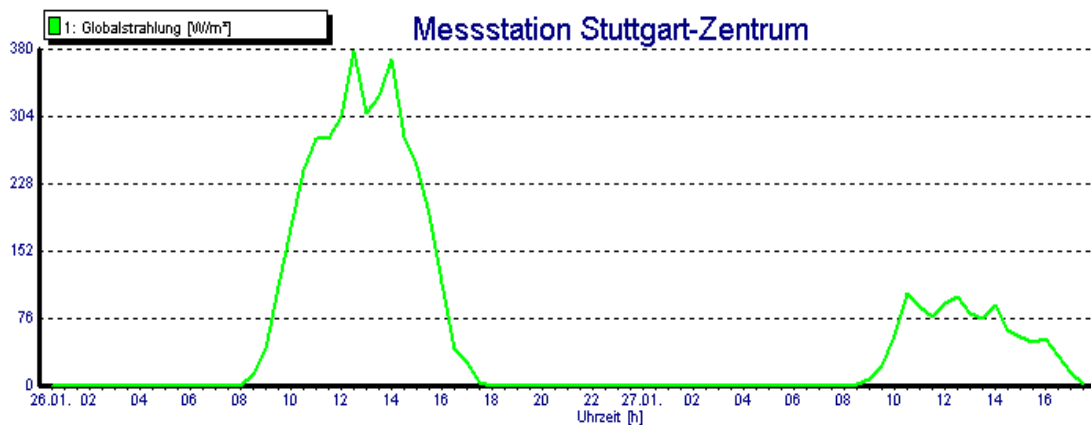


Abbildung 40: Globalstrahlung Messstation Stuttgart /36/

Das folgende Diagramm zeigt die Erhöhung des Ertrags durch die Nachführung im Vergleich zum feststehenden Kollektor im Sonnen-Zentrum. Dabei wird nicht nur der aktuelle Ertrag erhöht, sondern es kann auch bereits früher ein Ertrag erzielt werden. Dabei ergibt sich folgender stündlicher Verlauf für den Quadratmeter bezogenen Ertrag. Die Werte für den feststehenden Kollektor werden aus der Datenerfassung des Sonnen-Zentrums für den 26.01.2008 entnommen.

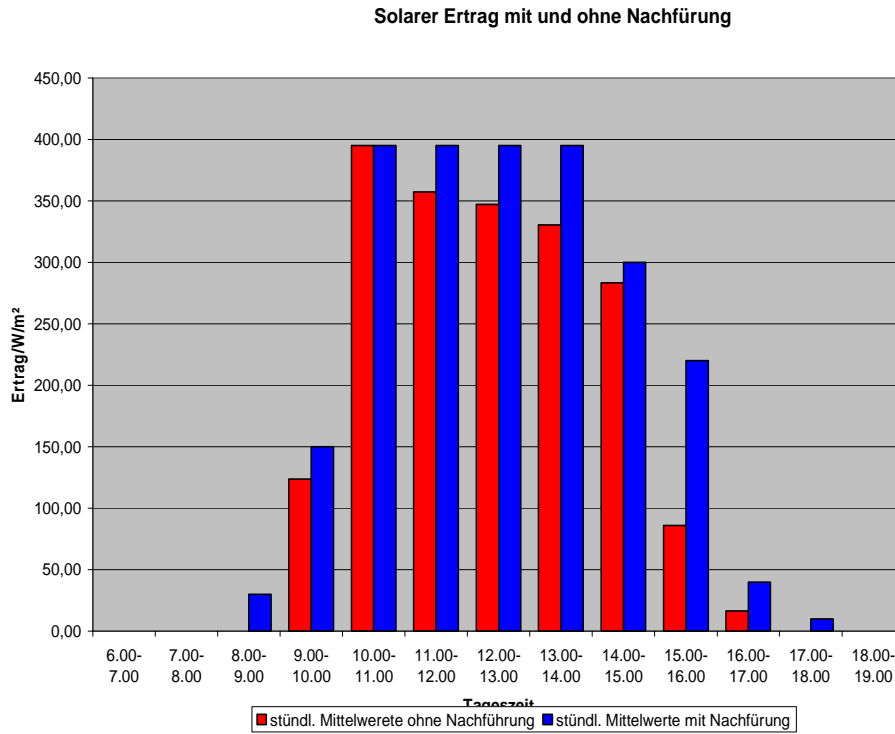


Abbildung 41: Ertragssteigerung bei Nachführung /37/

Im Winter können die daraus resultierenden höheren Wärmeleistungen durch den hohen Bedarf direkt ohne eine Vergrößerung des Pufferspeichervolumens genutzt werden, so dass außer dem „Tracker“ keine zusätzlichen Kosten entstehen würden. Im Sommer können durch Eingreifen in die Ausrichtung des Kollektors Temperaturspitzen vermieden werden. Die Nachführung des Kollektors kann über einen Elektromotor, der mit Strom aus einer Solarzelle versorgt werden kann, realisiert werden.



Abbildung 42: Zweiachsig nachführbarer Heliostat /38/

13.1.2 Verbesserung der Ausnutzung des Ertrags

Ein wichtiger Punkt bei der Sonnenheizung ist der zeitliche Unterschied zwischen dem solaren Gewinn im Sommer und dem maximalen Wärmebedarf im Winter. Ein Ansatzpunkt zur Verbesserung des Nutzungsgrades von solarbeheizten Gebäuden ist es deshalb, auf der Bedarfsseite im ertragreichen Sommer und in der Übergangszeit eine größtmögliche Nutzung zu erreichen. Dies könnte mit der Errichtung eines Nahwärmenetzes, das mit Solarwärme gespeist wird, verwirklicht werden.

Für eine zusätzliche Heizungsunterstützung im solaren Nahwärmenetz ist es erforderlich, dass alle Abnehmer ein Heizsystem mit niedrigen Systemtemperaturen besitzen, da sonst eine wesentliche Verschlechterung des Nutzungsgrad für die Solarwärme entsteht. Ein weiterer wesentlicher Vorteil bei der solaren Nahwärme ist, dass für die zusätzlichen Abnehmer keine eigene Solaranlage mit Kollektor und Pufferspeicher nötig ist. Eine große zentrale Anlage hat vor allem aber auch durch geringere spezifische Wärmeverluste und eine Verringerung der spezifischen Kosten bei größerem Speicher und größeren Kollektoranlagen erhebliche Vorteile gegenüber kleineren Einzelanlagen.

Der Vorteil der geringeren spezifischen Wärmeverluste und Kosten von größeren Speichern begründet sich hauptsächlich auf der Tatsache, dass mit dem Größerwerden des Wärmespeichers die spezifische Oberfläche pro Speichervolumen kleiner wird und

somit geringere spezifische Verluste und Materialkosten entstehen. Auch bei einer Vergrößerung der Kollektoranlage werden diese geringer. Bei einer zentralen Versorgung über ein Nahwärmenetz kann also neben der Verbesserung des Nutzens auch eine Verringerung der Wärmeverluste und der Kosten im Vergleich zur Einzelinstallation erreicht werden.

Eine weitere Möglichkeit bei der Optimierung solar beheizter Gebäude ist eine Minimierung der Wärmeverluste des Gebäudes. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass sich die Maßnahmen hinsichtlich des Wärmeschutzes auf ein vernünftiges Maß bezieht, da durch eine übermäßige Isolation des Gebäudes große Kosten im Vergleich zum Nutzen entstehen. Die spezifische Heizlast eines Sonnenhauses sollte sich in der Regel je nach Nutzungsart auf Werte zwischen 35 und 45 W/m² belaufen, um gute Deckungsgrade mit angemessenem Materialaufwand zu erreichen.

Dennoch können im Sonnen-Zentrum durch weitere Wärmeschutzmaßnahmen vor allem in der Produktionshalle weitere Verbesserungen erzielt werden. In der Halle entstehen vor allem durch die großen ungedämmten Rolltore erhebliche Wärmeverluste, hier könnten durch eine Dämmung der Tore Verbesserungen erzielt werden.

13.1.3 Optimierung der Energiebilanz des Gebäudes

Die Anlage im Sonnen-Zentrum ist bisher mit dreistufig schaltbaren Standard-Umwälzpumpen ausgestattet. Diese sind so eingestellt, dass sie im Heizlastfall den dafür benötigten Volumenstrom fördern und die vom Rohrnetz verursachten Druckverluste überwinden können.

Da der maximale Heizlastfall nur wenige Stunden im Jahr eintritt, befindet sich die gesamte Heizungsanlage die meiste Zeit der Heizperiode im Teillastfall. Das bedeutet, dass wenn keine Handeinstellung der Drehzahl stattfindet, die unregelte Umwälzpumpen 96 % der Betriebszeit mit zu hohen Drehzahlen arbeiten. Dabei verschlechtert sich der Wirkungsgrad der Pumpen. Durch den Einsatz von hocheffizienten Pumpen mit einem Permanentmagnetantrieb und einer stufenlosen Drehzahlregelung kann der Energiebedarf für Hilfsenergie um bis zu 80 % reduziert werden.

Zur Verdeutlichung des Einsparpotentials beim Einsatz solcher hocheffizienter Pumpentechnik, wird der Energiebedarf der bisherigen Standardpumpen im Vergleich zu den Permanentmagnet-Pumpen über ein Jahr ermittelt. Der Energiebedarf der Standardpumpen wird dabei aus der Energiebedarfsberechnung der VDI 2067 zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung übernommen.

Zur Ermittlung des jährlichen Hilfsenergiebedarfs für die geregelten Pumpen werden zunächst mit Hilfe eines entsprechenden Auslegungsprogramms die geeigneten Pumpen ermittelt und anhand des dazugehörigen Kennlinienfelds der Energiebedarf nach denselben Vorgaben wie bereits bei der Energiebedarfsberechnung ermittelt.

$$Q_{Pumpe} = \sum(T_{Last,i} \cdot P_{Last,i})$$

$T_{Last,i}$ = Dauer des Lastfalles i in [h/a]

$P_{last,i}$ = Leistungsaufnahme der Pumpe des Lastfalls i

Die Anschaffungskosten wurden anhand von aktuellen Herstellerpreisen (2007) ermittelt

$$K_{Betrieb,a} = Q_{Pumpe} \cdot K_{Strom}$$

$K_{Betrieb,a}$ = jährliche Betriebskosten

K_{Strom} = Preis pro kWh Strom (20 Ct/kWh)

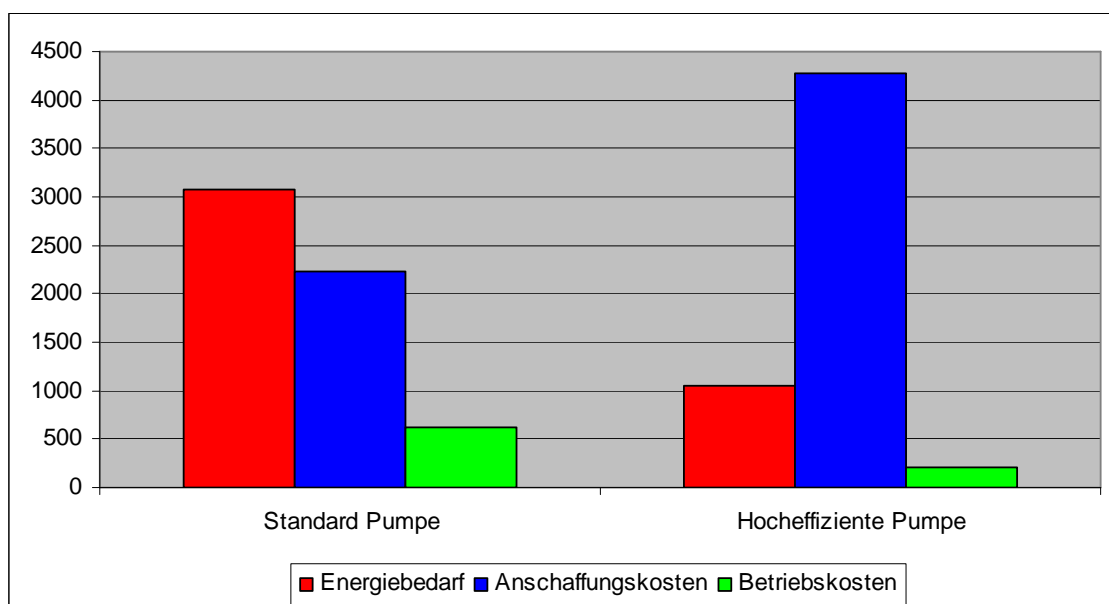


Abbildung 43: Kosten und Energiebedarf beim Einsatz „Hocheffizienter Pumpen“

Im dargestellten Diagramm werden die Änderungen des Energiebedarfs und den Anschaffungs- und Energiekosten bei einem kompletten Austausch der unregulierten durch geregelte hocheffiziente Pumpen dargestellt. Dabei geht hervor, dass sich dabei die gesamten Anschaffungskosten für die effizienteren Pumpen auf das Doppelte belaufen. Diese Werte können dabei auch für einzelne Pumpen angesetzt werden. Verrechnet man die höheren Investitionskosten mit der deutlichen Verringerung der Betriebskosten kann, festgestellt werden, dass sich die Mehrinvestition in je nach Betriebsweise der Pumpe in zwei bis drei Jahren mit den Energieeinsparungen rechnet. Geht man von einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von zehn Jahren aus, würde sich die Investition in jedem Fall lohnen.

Trotzdem sollte grundsätzlich jede Umwälzpumpe für sich allein betrachtet werden, da bei Pumpen mit einer geringen jährlichen Laufleistung der Energiespareffekt sinkt und sich damit eine Mehrinvestition möglicherweise nicht mehr lohnt.

14 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die niedrigen Nebenkosten eines Sonnenhauses und die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern bei der Heizung und Warmwasserbereitung ist für den Markt der Gebäudetechnik ein erstrebenswertes und technisch mögliches Ziel. Dabei kann auch verstärkt auf Biomasseheizungen gesetzt werden. Durch ihre regionale Verfügbarkeit lassen sich Transportkosten und CO₂-Emissionen sparen. Die Kombination zwischen Solar- und Biomasseheizung ist bei überwiegend solar beheizten Gebäuden äußerst sinnvoll, da beide Heizungsarten Pufferspeicher benötigen.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der für eine Sonnenheizung spricht, ist die robuste und Fehler unanfällige Technik des Sonnenhauses. Dies führt zu langen Lebenszeiten und spielt damit eine entscheidende Rolle bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Nach der Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit der Annuitätsmethode kann zwar im Sonnen-Zentrum noch keine Wirtschaftlichkeit erreicht werden, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass dies bei weiter steigenden Rohstoffpreisen in naher Zukunft der Fall sein wird. Der Unterschied zwischen Sonnenheizung und der Gasheizung bei der Gesamtannuität ist bereits heute im Vergleich zu den höheren Investitionskosten nur

sehr gering. Dies wird vor allem durch die sehr niedrigen verbrauchsgebundenen Kosten der Solarheizung erreicht.

Für eine Optimierung gibt es hauptsächlich in den Bereichen der Verbesserung von Wärmeschutzmaßnahmen, sowie beim Einsatz hocheffizienter Umwälzpumpen Möglichkeiten zu Verbesserungen im Sonnen-Zentrum. Hier können mit meist kleineren Maßnahmen und Investitionen Verbesserungen erzielt werden. Der Einsatz von hocheffizienten Pumpen ist gerade im Bereich der Sonnenheizung eine lohnende Investition, da es mehrere Umwälzpumpen mit zum Teil langen Laufzeiten gibt.

Durch weitere Isoliermaßnahmen im Bereich der Produktionshalle an den großen Rolltoren kann eine Erhöhung des solaren Deckungsanteils eine Heizlastverringerung erzielt werden.

Die Errichtung eines Nahwärmenetzes, das mit Solarwärme gespeist wird, würde ebenfalls zu einer verbesserten Ausnutzung des solaren Angebots führen. Die höhere Grundlast im Sommer und in der Übergangszeit durch den erhöhten Bedarf an Warmwasser und Heizwärme bei gleichzeitig hohem solarem Angebot, führt zu einer Verbesserung des Nutzungsgrades. Auch im Winter führt der erhöhte Bedarf an Niedertemperaturheizwärme zu einer verbesserten Nutzung. Die Untersuchungen im Januar haben gezeigt, dass es nur langsam zu einer Entladung im mittleren und oberen Bereich des Speichers kommt. Eine höhere Grundlast kann so zu einem verbesserten Be- und Endladeverhalten des Speichers führen. Die kleineren spezifischen Wärmeverluste an großen Speichern und Kollektoren und die geringeren spezifischen Kosten einer Großanlage im Vergleich zu mehreren Kleinanlagen sind ein zusätzlicher positiver Effekt bei der Nahwärmenutzung.

Die Nachführung von Kollektoren kann bei kleineren Anlagen zur Warmwasserbereitung eine interessante Alternative sein, da sie ihren größten Nutzen im Sommer haben. Bei großen Anlagen zur Heizungsunterstützung mit einer guten Ausrichtung nach der Wintersonne ist der Nutzen einer Nachführung im Vergleich zu den Kosten jedoch zu gering.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Solarheizungen mit hohen Deckungsgraden, bei einer richtigen Auslegung nicht nur in kleinen Einfamilienhäusern, sondern auch in großen Mehrfamilien- und gewerblich genutzten Gebäuden, wie dem Sonnen-Zentrum eine gute und in naher Zukunft auch wirtschaftlich sinnvolle Alternative zur konventionellen Beheizung sind.

15 Literaturüberblick

- Tabellenbuch Sanitär Heizung Klima/ Lüftung
- Taschenbuch Heizung und Klimatechnik
- Dubbel Taschenbuch für Maschinenbau
- Sonnenenergieanlagen mit hohem solaren Deckungsgrad für Warmwasser und Heizung
- Speicher in Theorie und Praxis
- Graue Energie und Umweltbelastungen von Heizungssystemen
- Der Unterschied zwischen Temperatur und Energie Teil 1 und 2
- Das Solarbuch Fakten, Argumente und Strategien für den Klimaschutz
- Jahrbuch Erneuerbare Energien 2007
- Wilo Pumpen Intelligenz
- Das Sonnenhaus

16 Quellenverzeichnis

- /1/ Energiedaten, BMWi 2006
- /2/ Skript Solarenergienutzung HS - Esslingen; Drück
- /3/ ITW Universität Stuttgart
- /4/ Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft, Statistische Zahlen der deutschen Solarwirtschaft
- /5/ ITW Universität Stuttgart, Drück
- /6/ ITW Universität Stuttgart, Drück
- /7/ ITW Universität Stuttgart, Drück
- /8/ Institut für Solarenergieforschung GmbH
- /9/ ITW Universität Stuttgart, Drück
- /10/ Institut für Solartechnik SPF
- /11/ ITW Universität Stuttgart, Drück
- /12/ ITW Universität Stuttgart, Drück
- /13/ ITW Universität Stuttgart, Drück
- /14/ ITW Universität Stuttgart, Drück
- /15/ ITW Universität Stuttgart, Drück
- /16/ Regenerative Energiequellen; Kleemann, M
- /17/ IWO Taschenbuch Heizung und Klimatechnik
- /18/ Prof. Dr. Ernst Ulrich von Weizsäcker; MdB bis 2005
- /19/ Heidt 1994
- /20/ Jenni Energietechnik AG
- /21/ Sonnen-Zentrum
- /22/ Sonnen-Zentrum
- /23/ Sonnen-Zentrum
- /24/ Sonnen-Zentrum
- /25/ ITW Universität Stuttgart
- /26/ Firma. Lopper Kesselbau GmbH
- /27/ Wodtke GmbH
- /28/ Jenni Energietechnik AG
- /29/ Jenni Energietechnik AG
- /30/ Sonnen-Zentrum

- /31/ Sonnen-Zentrum
- /32/ Wilo AG
- /33/ Statistisches Bundesamt
- /34/ IWU 09.01.06
- /35/ Datenerfassung Sonnen-Zentrum
- /36/ Firma Lorenz GmbH & Co KG
- /37/ Deutscher Wetterdienst Stuttgart
- /38/ Datenerfassung Sonnen-Zentrum
- /39/ Technische Universität München