

# Strategieentwicklung für energieautarke Gebäude

Robert Wimmer, Hannes Hohensinner,  
Werner Schmid, Magret Schwarz

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**00/2008**

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter

<http://www.nachhaltigwirtschaften.at> oder unter:

Projektfabrik Waldhör

Währingerstraße 121/3, 1180 Wien

Email: [versand@projektfabrik.at](mailto:versand@projektfabrik.at)

# Strategieentwicklung für energieautarke Gebäude

Dr. Robert Wimmer, DI Hannes Hohensinner

Gruppe Angepasste Technologie an der TU Wien

Mag. Arch. Werner Schmid, HTW Chur (CH)

Dr. Arch. Magret Schwarz, freischaffende Architektin (I)

Wien, Mai 2009

**Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie**



**Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften**

**Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und  
Technologie**

## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines beauftragten Projekts aus der Programmlinie *Haus der Zukunft* im Rahmen des Impulsprogramms *Nachhaltig Wirtschaften*, welches 1999 als mehrjähriges Forschungs- und Technologieprogramm vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie gestartet wurde.

Die Programmlinie *Haus der Zukunft* intendiert, konkrete Wege für innovatives Bauen zu entwickeln und einzuleiten. Aufbauend auf der solaren Niedrigenergiebauweise und dem Passivhaus-Konzept sollen im Vergleich zu konventionellen Bauweisen eine bessere Energieeffizienz, ein verstärkter Einsatz erneuerbarer Energieträger und nachwachsender bzw. ökologischer Rohstoffe sowie eine stärkere Berücksichtigung von Nutzungsaspekten und Nutzerakzeptanz bei vergleichbaren Kosten erreicht werden. Damit werden für die Planung und Realisierung von Wohn- und Bürogebäuden richtungsweisende Schritte hinsichtlich ökoeffizienten Bauens und einer nachhaltigen Wirtschaftsweise in Österreich demonstriert.

Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt dank des überdurchschnittlichen Engagements und der übergreifenden Kooperationen der Auftragnehmer, des aktiven Einsatzes des begleitenden Schirmmanagements durch die Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik und der guten Kooperation mit der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft bei der Projektabwicklung über unseren Erwartungen und führt bereits jetzt zu konkreten Umsetzungsstrategien von modellhaften Pilotprojekten.

Das Impulsprogramm *Nachhaltig Wirtschaften* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden diese in der Schriftenreihe publiziert, aber auch elektronisch über das Internet unter der Webadresse <http://www.HAUSderZukunft.at> Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

## **Projekttitlel**

Untersuchung der technischen / wirtschaftlichen Machbarkeit energieautarker Gebäude

Fokus auf Bereitstellung und Wandlung solarthermischer Energie

## **Synopsis**

Entwicklung einer Strategie für energieautarke Haustechniksysteme durch direkte Abdeckung der thermischen Nutzenwendungen mit möglichst geringen Umwandlungsverlusten und einfachen angepassten Technologielösungen.

Development of a strategy for energy self sufficient buildings with direct supply of thermal users with low transmission losses and with appropriate technological solutions.

## **Projektleiter**

Dr. Robert Wimmer, Gruppe Angepasste Technologie (GrAT) an der TU Wien

## **Projektteam**

DI Hannes Hohensinner, GrAT

Mag. Arch. Werner Schmid, HTW Chur (CH)

Dr. Arch. Magret Schwarz, freischaffende Architektin (I)

Wien, Mai 2009

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1.</b>	<b>KURZFASSUNG UND SUMMARY .....</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>PROJEKTABRISS.....</b>	<b>9</b>
<b>3.</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>12</b>
<b>4.</b>	<b>ZIELE DES PROJEKTS .....</b>	<b>15</b>
<b>5.</b>	<b>VERWENDETE METHODEN UND DATEN .....</b>	<b>16</b>
<b>6.</b>	<b>IST-STAND IN DER ENERGIEBEREITSTELLUNG FÜR GEBÄUDE .....</b>	<b>18</b>
6.1	KOMPONENTEN ZUR UMWANDLUNG THERMISCHER ENERGIE.....	18
6.1.1.	<i>Solarkonzentratoren</i> .....	18
6.1.2.	<i>Biomassenspeicheröfen</i> .....	19
6.2	SPEICHERSYSTEME .....	20
6.2.1.	<i>Mitteltemperatur- (MT-)Speichersysteme</i> .....	20
6.2.2.	<i>Niedertemperatur- (NT-)Speichersysteme</i> .....	23
6.2.3.	<i>Kältekollektor und Kältespeicher</i> .....	24
6.2.4.	<i>Sonstige Speichersysteme</i> .....	24
6.3	KOMPONENTEN ZUR ERZEUGUNG ELEKTRISCHER ENERGIE .....	25
6.4	OUTPUT-KOMPONENTEN.....	27
6.4.1.	<i>Kälte aus Wärme</i> .....	27
6.4.2.	<i>Herd und Backofen</i> .....	28
6.4.3.	<i>Anschluss-Systeme</i> .....	28
6.5	ZUSAMMENFASSUNG.....	29
<b>7.</b>	<b>INNOVATIONSGEHALT DES PROJEKTES .....</b>	<b>31</b>
<b>8.</b>	<b>SYSTEMLAYOUT UND MODELLVARIANTEN .....</b>	<b>33</b>
8.1	BERECHNUNG DES THERMISCHEN UND ELEKTRISCHEN ENERGIEBEDARFS UND STROMVERBRAUCHSHIERARCHIE.....	33
8.2	DAS „SCHWERKRAFTHAUS“ .....	37
8.3	DAS „DAMPFHAUS“ .....	38
8.4	DAS „LUFTHAUS“ .....	38
8.5	BEWERTUNG UND ZUSAMMENFASSUNG.....	40
8.6	GRUNDLEGENDE STRATEGISCHE, TECHNISCHE UND SICHERHEITSRECHTLICHE ASPEKTE.....	41
8.7	SYSTEMLAYOUT „WIRELESS HOUSE“ .....	42
<b>9.</b>	<b>KOMPONENTENENTWICKLUNG.....</b>	<b>44</b>
9.1	KOMPONENTEN ZUR ERZEUGUNG THERMISCHER ENERGIE .....	44
9.1.1.	<i>Solarkonzentratoren</i> .....	44
9.1.2.	<i>Biomasse-Backup-System</i> .....	57
9.2	SPEICHERSYSTEME .....	63
9.2.1.	<i>Mitteltemperaturspeicher</i> .....	64
9.2.2.	<i>Niedertemperaturspeicher</i> .....	73
9.2.3.	<i>Kältekollektor und Kältespeicher</i> .....	74
9.2.4.	<i>Sonstige Speicher</i> .....	78
9.3	KOMPONENTEN ZUR ERZEUGUNG ELEKTRISCHER ENERGIE .....	79
9.3.1.	<i>Elektrischer Restbedarf</i> .....	79
9.3.2.	<i>Thermoelektrische Generatoren</i> .....	81
9.3.3.	<i>Stirlingmotor</i> .....	88
9.4	OUTPUT-KOMPONENTEN.....	95
9.4.1.	<i>Kälte aus Wärme</i> .....	95
9.4.2.	<i>Herd und Backofen</i> .....	98
9.4.3.	<i>Anschlüsse</i> .....	100
<b>10.</b>	<b>DIMENSIONIERUNG UND SYSTEMINTEGRATION .....</b>	<b>102</b>

10.1	BERECHNUNGEN FÜR DIE DIMENSIONIERUNG .....	102
10.1.1.	<i>Berechnung des Versorgungssystems</i> .....	102
10.1.2.	<i>Berechnung der Speicheranlage</i> .....	109
10.2	ARCHITEKTONISCHE LÖSUNGEN .....	112
<b>11.</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN .....</b>	<b>116</b>
11.1	ERKENNTNISSE .....	116
11.2	DEMONSTRATIONSPROJEKT .....	117
11.3	ZIELGRUPPEN DES PROJEKTS .....	117
11.4	MARKTPOTENTIAL UND WIRTSCHAFTLICHE MACHBARKEIT .....	118
11.5	EMPFEHLUNGEN .....	120
<b>12.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>122</b>
<b>13.</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>126</b>
<b>14.</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>131</b>
<b>15.</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>132</b>

# 1. Kurzfassung und Summary

## Kurzfassung

In diesem Projekt wird eine radikal neue Strategie für die Energieversorgung von Gebäuden entwickelt und deren Machbarkeit überprüft. Ausgehend von der Passivhaustechnologie mit einem minimalen Heizenergiebedarf war das Ziel die Entwicklung eines Gebäudekonzeptes, das ohne Netzanschluss und Versorgungsleitungen auskommt. Dieses als „Wireless House“ oder „Energieautarkes Haus“ bezeichnete Gebäude benötigt im Vergleich zu herkömmlichen energieautarken Konzepten weder einen Anschluss an das Stromnetz, noch sind große elektrische Speicher erforderlich. Der Betrieb erfolgt über die Nutzung thermischer Energie, die mit geringen Transport- und Umwandlungsverlusten alle thermischen Verbraucher (z. B. Herd, Backofen, Kühlschrank), die derzeit den größten Anteil am Stromverbrauch im Haushalt verursachen, versorgt. Dadurch verringert sich der Verbrauch an elektrischer Energie drastisch. Durch die Umwandlung von thermischer in elektrische Energie mittels Stirlingmotor werden die elektrischen Komponenten (z. B. Computer, Motor und Pumpe für Waschmaschine, Beleuchtung, Elektrokleingeräte) betrieben.

Unter Berücksichtigung der Kriterien der Angepassten Technologie, die mit jenen der nachhaltigen Entwicklung korrespondieren, wurde bei der Strategieentwicklung auf einfache, selbstregulierende, effiziente, risikominimierte und nutzenmaximierte Lösungen unter Verwendung lokal verfügbarer Energieträger geachtet. Daraus resultiert der Fokus auf die maximale Nutzung von Solarenergie. Durch die Verwendung eines Solarkonzentrators mit einem einfachen Nachführungssystem wird das notwendige Temperaturniveau von 300 °C für den thermischen Betrieb der Haushaltsgeräte inklusive des Backrohrs mit Pizzastufe (280 °C) erreicht. Für die Überbrückung der Zeiten ohne solare Einstrahlung übernimmt ein Biomasse-Backup-System die Bereitstellung der thermischen Energie. Als Wärmeträgermittel dient Thermoöl, das den Vorteil eines drucklosen Betriebs bei diesen hohen Temperaturen aufweist.

Ausgehend von den Ergebnissen der Recherchen und Bewertungen relevanter Technologien und Komponenten wurden in einem detaillierten

Entwicklungsprogramm für die Inputseite (Solarkonzentrator, Biomasse-Backup-System, Umwandlung thermischer in elektrische Energie) und die Outputseite (Haushaltsgeräte) sowie für die Wärmespeicherung Prototypen entwickelt und Versuche zur Überprüfung ihrer Einsatztauglichkeit durchgeführt. Die Synthese der einzelnen am besten geeigneten technischen Lösungen zu einem Gesamtsystem und die Berechnungen für die Grobdimensionierung der Komponenten zeigen anschaulich die Machbarkeit der Strategie des „Wireless House“ auf und bilden gleichzeitig die Grundlage für die weiterführende Umsetzung im Rahmen eines Demonstrationsobjektes.

## Summary

With this project a radical new strategy for energy supply of buildings has been developed and verified. Enabled by the minimised heating demand of passive houses the goal was to develop an off grid energy supply concept. This so called "wireless house" can be operated without grid connection and without a storage system for electric energy. The key is direct utilisation of thermal energy for thermal household appliances (e.g. kitchen stove, refrigerator) avoiding conversion losses. This remarkably reduces the electric energy demand. Remaining electric and electronic devices (such as computer, motor and pump for washing machine, lighting, small electric devices) are supplied by a stirling engine generating a share of electricity from the thermal sources.

Simple, self regulating and efficient solutions for utilising locally available energy sources have been favoured taking into consideration appropriate technology principles which are well corresponding with sustainable development. Consequently the focus lies on solar energy use. By utilising solar concentrators with a simplified tracking system the necessary temperature level of 300°C is provided for the operation of thermally driven household appliances including the kitchen stove. In periods of insufficient solar gains a biomass-backup-system provides the necessary heat. Thermal oil is used a heat transport media which allows for a low pressure operation system.

Based on investigation results of relevant technologies and components, prototyping and testing has been carried out both for supply components (such as solar concentrator, biomass-backup-system, conversion of thermal to electric energy) and for energy using household appliances. Furthermore storage systems have been considered as well. Integration of system components and calculation results demonstrate the feasibility of the "wireless house" concept and provide a basis for its further development.

## 2. Projektabriss

Das Energieeinsparungspotential in Gebäuden wurde durch die Entwicklung und Verbreitung der Passivhaustechnologie wesentlich vergrößert, und auch der ökologische Materialeinsatz wird neben der Minimierung des Energieverbrauchs während der Nutzung des Gebäudes immer stärker berücksichtigt. Jedoch muss eine strategische Weiterentwicklung nicht nur den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes und der verwendeten Baumaterialien berücksichtigen, sondern auch die erforderlichen Leitungsinfrastrukturen. Daher legt dieses Projekt den Entwicklungsschwerpunkt auf energieautarke Gebäude, die ohne Netzanbindung und damit ohne Versorgungsleitungen auskommen. Dafür wurde der Begriff „Wireless House“ eingeführt. Energieautarke Insellösungen für einzelne Gebäude gibt es zwar prinzipiell, die meisten setzen aber auf eine Speicherung der elektrischen Energie in Batterien, die Versorgung erfolgt mittels Windkraftanlagen, PV-Modulen oder mit Generatoren. Derartige Systeme sind nur dann rentabel, wenn durch die weite Entfernung des Stromnetzes der Anschluss an das Netz zu teuer wäre und/oder der Stromverbrauch sehr gering ist.

Ziel des vorliegenden Projektes war die Entwicklung einer Strategie für energieautarke Haustechniksysteme durch direkte Abdeckung der thermischen Nutzenanwendungen mit möglichst geringen Umwandlungsverlusten und einfachen angepassten Technologielösungen. Dabei wird der Fokus auf die maximale Verwendung von Solarenergie gelegt, und zwar in der Form, dass damit nicht nur, wie üblich, Warmwasser produziert und Heizenergie zur Verfügung gestellt wird, sondern dass alle im Haushalt befindlichen thermischen Verbraucher (z. B. Herd, Backrohr, Kühlschrank) thermisch versorgt werden können. Darüber hinaus wird auch die notwendige elektrische Energie aus der solar erzeugten thermischen Energie gewonnen, wodurch der Verbrauch auch hier drastisch gesenkt wird. Für die Zeiten ohne solare Einstrahlung wurde ein Biomasse-Backup-System entwickelt. Die thermische Energie wird auf zwei Temperaturniveaus (300 °C und 100 °C) gespeichert und ist über das gesamte Jahr ausreichend vorhanden.

Viele der derzeitigen Forschungsanstrengungen im Bereich alternativer Energie richten sich auf eine Verbesserung der Effizienz und Rentabilität der Stromproduktion

aus erneuerbaren Quellen. Dennoch sind die Konversionsverluste nach wie vor sehr hoch, und nicht alle Energieanwendungen benötigen tatsächlich Strom. Viele der großen Stromverbraucher im Haushalt sind vielmehr thermische Anwendungen, die Wärme oder Kälte benötigen. Daher wurde im gegenständlichen Projekt die Verbraucherseite genauer untersucht, mit dem Ziel, den Stromverbrauch und die Umwandlungsverluste zu minimieren.

Dafür wurde der Bedarf an thermischer sowie an elektrischer Energie für Haushaltsgeräte je nach Temperaturniveau ermittelt. Nachdem für die Deckung dieses Bedarfs vorrangig auf solare Energie zurückgegriffen werden soll, wurde über verschiedene Zeiträume die Solarstrahlung am Standort Böheimkirchen gemessen und der solare Deckungsgrad berechnet. Für die Dimensionierung der notwendigen Speicher wurden Energieverbrauch und Verhalten der „Nutzer“ im Tages-, Monats- und Jahresverlauf ermittelt.

Um für die einzelnen benötigten Komponenten die besten technischen Lösungen zu entwickeln, wurden Literatur- und Internetrecherchen sowie Expertengespräche durchgeführt, mögliche Materialien und am Markt vorhandene Produkte nach bestimmten Kriterien ausgewählt und auf ihre technische und wirtschaftliche Eignung hin analysiert. Zahlreiche Versuche und Prototypenentwicklungen dienten der Prüfung der technischen Machbarkeit von Erzeugungs-, Speicher- und Betriebskomponenten. In einer Synthese der am besten geeigneten Einzellösungen wurde schließlich ein Gesamtkonzept für die Entwicklung energieautarker Gebäude erstellt und Modellstudien für die architektonische Gestaltung durchgeführt.

Die entwickelte Strategie beinhaltet eine radikale Neuerung in der Energieversorgung von Gebäuden. Alle thermischen Verbraucher im Gebäude werden mit thermischer Energie betrieben. Das detaillierte Entwicklungskonzept ist in der untenstehenden Graphik dargestellt. Es enthält die Komponenten für Energieversorgung, Speicherung und Verbrauch. Der Solarkonzentrator und das Biomasse-Backup-System stellen die thermische Energie mit bis zu 300 °C zur Verfügung. Die elektrische Energie wird mit Hilfe des Stirlinggenerators erzeugt. Dieser wird thermisch betrieben und vom Mitteltemperaturspeicher angespeist. Alle weiteren Komponenten sind thermisch betriebene Verbraucher, die Mitteltemperaturen von 300 °C (Backrohr und Herdplatten) bis Niedertemperaturen von 60 °C benötigen.

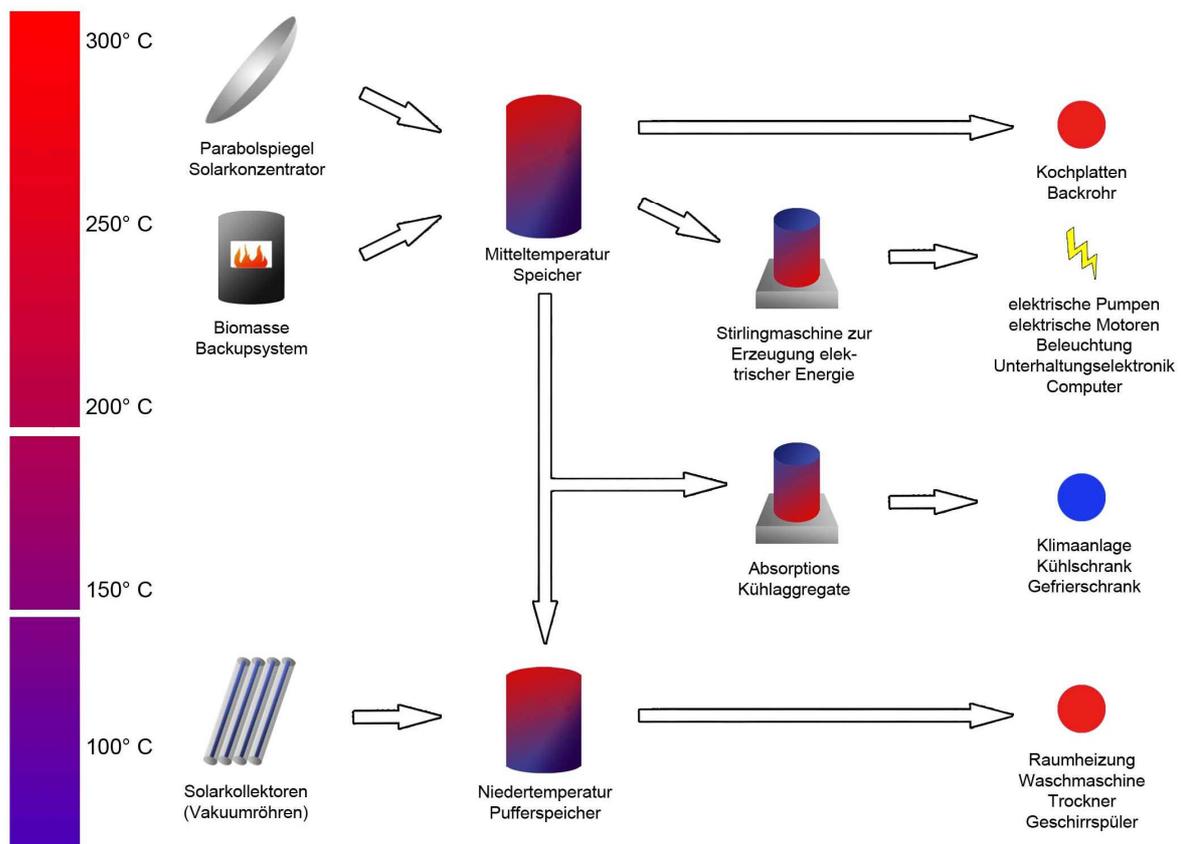


Abbildung 1: Gesamtsystem „Energieautarkes Haus“ („Wireless House“) – Überblick über die Zusammenhänge der verschiedenen Komponenten nach Temperaturniveaus und thermischem und elektrischem Betrieb<sup>1</sup>

Das Systemlayout wurde nach den Prinzipien der Angepassten Technologie entwickelt und beinhaltet einfache, verlässliche und selbstregulierende Technologien. Für den Nachweis der technischen Machbarkeit des Konzeptes wurden Versuchsmodelle für die Schlüsselkomponenten im Bereich Energieerzeugung und -verbrauch entwickelt und getestet. Auf der Inputseite konnte mit einfachen Rinnenkonzentratoren der Betrieb eines thermisch betriebenen Ofens realisiert werden. Für die Verbraucherseite wurden ein thermisch betriebener Ofen und ein Kühlschrank realisiert. In weiterer Folge sollen die Komponenten weiterentwickelt und anhand eines Gesamtprototyps in einem Demonstrationsprojekt umgesetzt und erprobt werden.

<sup>1</sup> GrAT (2008).

### **3. Einleitung**

Nachhaltige Entwicklung und eine sichere Energieversorgung in der Zukunft hängen in hohem Maße davon ab, wie rasch, effizient und vollständig der Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energiequellen und eine massive Reduktion des Energieverbrauchs gelingen und in welchem Ausmaß dabei ein unvermindert hoher Lebensstandard aufrechterhalten werden kann.

Die Entwicklung eines „Wireless House“, also eines energieautarken Gebäudes, das netzunabhängig funktionieren kann, spricht das individuelle Bedürfnis nach Krisenunabhängigkeit und Sicherheit an und trägt gleichzeitig zur Entlastung der Infrastrukturproblematik bei.

Derzeit verfügbare technische Lösungen für energieautarke Gebäude (z. B. auf der Basis von PV-Modulen und Bleiakkus) sind einerseits sehr teuer und weisen darüber hinaus eine problematische Lebenszyklusperformance auf. Für eine realistische Marktchance von Gebäudeeinheiten, die sich selbst mit Energie versorgen können, sind daher neue Strategien nötig.

Vorarbeiten der Projektpartner sind die Entwicklung und Errichtung von Passivhäusern in Strohbauweise, wärmedämmende Strohbauten mit minimalem Heizenergiebedarf in der Schweiz und in Südtirol sowie Arbeiten zu energieautarken Gebäuden an der HTW Chur in der Schweiz.

Der Fokus der Studie liegt auf Untersuchungen zur technischen Machbarkeit eines modernen energieautarken Hauses, das die konsequente Weiterentwicklung der Passiv- & Plusenergiehaus-Bauweise darstellt.

Das radikal neue Konzept geht von einer detaillierten Analyse der benötigten Energiedienstleistungen und der möglichst direkten Bereitstellung der jeweils erforderlichen Energieform aus. Konsequenterweise wird dabei die Strategie eines auf thermischer Energie basierenden Energiesystems entwickelt.

Mittels Berechnungen und praktischen Versuchsaufbauten werden wesentliche Grundlagen sowohl für die solare Versorgung auf den unterschiedlichen erforderlichen Temperaturniveaus als auch für das Biomasse-Backup-System entwickelt und verifiziert.

Die Entwicklung umfasst Konzepte für neue, angepasste Energiespeichersysteme ebenso wie für ein neu konzipiertes Verbrauchsmanagement und einen Mix unterschiedlicher Energieformen (Wärme, Kälte, Strom). Bestandteile sind dabei unter anderem längerfristige Energiespeicher, der konzentrierende Sonnenkollektor, der Biomasseofen sowie die Verbrauchskomponenten (Küchengeräte, Warmwasser).

Durch einen modularen Aufbau der wichtigsten Schlüsselkomponenten wird eine Anpassung an den konkreten Nutzenergiebedarf und an das lokale Angebot von Energiequellen ermöglicht, zusätzlich können die Teile durch die Modularisierung vorgefertigt werden und die (De-)Montage erleichtert werden.

### **Einpassung in die Programmlinie**

Das Projekt verfolgte die Ziele einer erhöhten Energieeffizienz hinsichtlich des gesamten Lebenszyklus und eines verstärkten Einsatzes erneuerbarer Energieträger, insbesondere von Solarenergie. Auch die Zielsetzungen des Impulsprogramms „Nachhaltig Wirtschaften“ wurden in das Projekt integriert, insbesondere wurde auf eine nachhaltige Technologieentwicklung sowie die Nutzung erneuerbarer Ressourcen und Ressourceneffizienz Bedacht genommen. Einen weiteren Schwerpunkt in der Strategieentwicklung stellte die Orientierung an der Nutzerseite bzw. am tatsächlichen Bedarf dar. Recyclingfähigkeit, Flexibilität und Adaptionfähigkeit sowie Fehlertoleranz und Risikoversorgung sind zusätzliche Eigenschaften des entwickelten Systems, die darüber hinaus zur Sicherung von Lebensqualität beträchtlich beitragen.

### **Aufbau des Endberichts**

Nach einer Darstellung der Ziele (Kapitel 4) sowie der verwendeten Methoden und Daten (Kapitel 5) werden die Ergebnisse der Studie präsentiert. Der recherchierte Ist-Stand relevanter Technologien (Kapitel 6) wird dem Innovationsgehalt des gegenständlichen Projekts (Kapitel 7) gegenübergestellt. Als Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung wird ein grundlegendes Systemlayout anhand von technischen, strategischen und sicherheitsrechtlichen Aspekten entworfen (Kapitel 8). In einem detaillierten Entwicklungsprogramm, dem Hauptteil des Berichts (Kapitel 9), werden daraufhin die einzelnen Komponenten des Systems (Komponenten zur Erzeugung

thermischer Energie, Speichersysteme, Komponenten zur Erzeugung elektrischer Energie und Outputkomponenten) genauer dargestellt.

Wie die Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem integriert werden, ist Gegenstand von Kapitel 10, in dem auf der Grundlage von Berechnungen die notwendigen Dimensionierungen des Energieautarken Hauses ermittelt und Beispiele für mögliche architektonische Lösungen dargestellt werden.

Das Abschlusskapitel (Kapitel 11) enthält eine Darstellung der wesentlichen Erkenntnisse aus dem Projektergebnissen, zeigt die Chancen und (wirtschaftlichen wie technischen) Potentiale für Demonstrationsvorhaben auf und geht auf die weitere Nutzung der Projektergebnisse und weiterführende Forschungsfragen ein.

## 4. Ziele des Projekts

Ziel des Projekts war die Entwicklung einer Strategie zur weitestgehenden Deckung des Gesamtenergiebedarfs eines Passivhauses mit thermischen Energiequellen (Solarenergie/Biomasse). Dazu sollte einerseits die Substitution von stromverbrauchenden durch thermische Aggregate (z. B. Sorptionskühlung, warmwassergespeiste Waschmaschinen) beitragen, andererseits die größtmögliche Effizienzsteigerung auf der Verbraucherseite (Wärmedämmung, LED, Flachbildschirme usw.) zur Minimierung des Reststromverbrauchs. Damit werden Alternativen für den derzeitigen Trend des steigenden Energieverbrauchs, insbesondere der steigenden Nachfrage an elektrischer Energie im Haushalt, aufgezeigt.

Im Unterschied zu den bestehenden Plusenergiehäusern, die im Wesentlichen auf die Bereitstellung der derzeit erforderlichen elektrischen Energie setzen, zielt die Strategie des „Wireless House“ auf die Entwicklung eines neuen Energieversorgungssystems ab, das von den nachgefragten Energiedienstleistungen ausgeht und diese durch Innovationen sowohl auf der Verbrauchs- als auch auf der Versorgungsseite abdeckt.

In einem weiterführenden Demonstrationsprojekt soll ein modernes, energieautarkes Haus, das die konsequente Weiterentwicklung der Passiv- & Plusenergiehausbauweise darstellt, ohne Verzicht auf Nutzerkomfort und Lebensqualität umgesetzt werden und als praktisches Beispiel dienen.

## 5. Verwendete Methoden und Daten

Relevante Arbeiten aus dem Programm „Haus der Zukunft“ wurden insbesondere für die Analyse des Ist-Standes herangezogen. Außerdem wurde auf den Erfahrungen und Ergebnissen des S-HOUSE-Demonstrationsgebäudes aufgebaut. Vorarbeiten und Teilergebnisse wurden im Rahmen der internationalen Konferenz CSP in Sevilla (Wimmer et al., 2006) und im Rahmen der World Sustainable Building Conference in Melbourne (Wimmer et al., 2008) präsentiert und mit internationalen Experten diskutiert.

Den Teilzielen des Projekts entsprechend kam ein breites Portfolio unterschiedlicher Methoden zum Einsatz. Ein Überblick über die jeweiligen Methoden findet sich in der folgenden Tabelle.

Ziel	Methoden
Entwicklung strategischer Lösungen für die Abdeckung des gesamten Energiebedarfes durch Solarenergie und Biomasse	Recherche, Auswertung der Rechercheergebnisse, Messungen des Solarenergieertrages, des Energieverbrauchs im Haushalt und Berechnungen der verschiedenen Komponenten, Durchführung praktischer Versuche
Technische und wirtschaftliche Machbarkeit des „Wireless House“-Konzepts. Angepasste Technologien für die Haustechnik	Entwicklung und Bau von Versuchsmodellen nach Kriterien der Angepassten Technologie sowie Testläufe und Auswertung der Ergebnisse
Länderübergreifende Forschungsk Kooperation	Kooperation mit Projektpartnern aus Italien und der Schweiz im Rahmen des Projektes, Konferenzbeiträge und internationale Präsentationen
Grundlagen für Demonstrationsprojekte	Vorbereitung für mögliche Demonstrationsprojekte mit Partnern aus den Bereichen Wohnbau, Immobilienentwicklung und -vermarktung, öffentliche Gebietskörperschaft, Land und Bund

Tabelle 1: Projektziele und Methoden zu ihrer Erreichung

Für die Entwicklung des „Wireless House“ wurde das Potential der Energiebereitstellung und der Energiebedarf für die Haushaltsanwendungen nach

thermischer und elektrischer Energie und nach Temperaturniveau ermittelt. Die Versorgungsseite basiert auf der maximalen Nutzung von Solarenergie. Dazu wurde als Grundlage für die Dimensionierung des Systems der solare Ertrag am Standort Böheimkirchen über unterschiedliche Zeiträume gemessen und der solare Deckungsgrad berechnet. Das Verhalten der Nutzer und der Verlauf des Energieverbrauchs über den Tages-, Monats- und Jahresverlauf wurden ermittelt und die erhaltenen Daten zur Berechnung der notwendigen Speicher verwendet.

Um geeignete technische Lösungen für die einzelnen Komponenten zu entwickeln, wurden zunächst Recherchen (Literatur, Internet) und Expertengespräche durchgeführt. Auswahlkriterien entsprechend den Anforderungen der Angepassten Technologie wurden festgelegt und in Frage kommende Werkstoffe und Materialien sowie am Markt befindliche Produkte auf ihre technische Eignung und Wirtschaftlichkeit hin analysiert und bewertet. Die detaillierte Entwicklungsstrategie wurde auf der Basis von Berechnungen und praktischen Versuchen erarbeitet, dabei wurden Komponenten zur Energieumwandlung, -speicherung und -verteilung sowie Endgeräte auf ihre technische Machbarkeit hin untersucht. Die am besten geeigneten technischen Lösungen wurden zu einem Konzept für die Entwicklung energieautarker Gebäude zusammengeführt. Für die anschauliche Darstellung der Ergebnisse wurden zusätzlich Modelle gefertigt.

## **6. Ist-Stand in der Energiebereitstellung für Gebäude**

Die bestehenden Komponenten und Lösungen für gebäudeintegrierte Energieerzeugungssysteme stellen zumeist Einzellösungen dar, die entweder thermische Energie im Niedertemperaturbereich ( $< 100\text{ °C}$ ) oder elektrische Energie durch (erneuerbare) Energieträger bereitstellen. In den meisten Fällen kommen Photovoltaik-Paneele zum Einsatz, die auch mit anderen Technologien, wie zum Beispiel Windkraft, kombiniert werden können. Eine rechnerische Energieautarkie erreichen die meisten netzgekoppelten Systeme nur bei einer ganzjährigen Betrachtung, wobei die Überschüsse im Sommer die Defizite im Winter rechnerisch kompensieren. Überschussenergie wird ins Netz eingespeist bzw. wird in Zeiten solarer Unterversorgung vom Netz bezogen.

Beim sogenannten „Inselbetrieb“ ersetzen Speichersysteme, zumeist Bleiakkumulatoren, den Netzanschluss. Die Wirtschaftlichkeit solcher Lösungen ist derzeit nur bei sehr entlegenen Gebäuden mit fehlendem Netzanschluss gegeben.

Für das gegenständliche Projekt wurde zunächst der Ist-Stand projektrelevanter Technologien ausgewertet. Potentielle Anwendungen und Komponenten wie Solarkonzentratoren, thermische Speicherung im Mitteltemperaturbereich (bis  $300\text{ °C}$ ), Umwandlung von thermischer in elektrische Energie und thermisch betriebene Endgeräte (Haushaltsgeräte) wurden recherchiert und ihre Eignung für den Einsatz im „Wireless House“ analysiert.

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die recherchierten Komponenten und Lösungen, die teils am Markt erhältlich, teils in Entwicklung sind. Außerdem werden die Komponenten nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien verglichen, um ihre Relevanz für das zu entwickelnde System bewerten zu können.

### **6.1 Komponenten zur Umwandlung thermischer Energie**

#### **6.1.1. Solarkonzentratoren**

Der Fokus bei den untersuchten Kollektoren liegt auf dem Mitteltemperaturbereich um  $300\text{ °C}$ , da dieser wesentlich für die Strategie des „Wireless House“ ist. In der Zusammenstellung wurden deshalb vor allem Rinnenkollektoren und Paraboloidkonzentratoren sowie Fresnell-Linsensysteme berücksichtigt. Es handelt

sich größtenteils noch um vorwettbewerbliche Entwicklungen. Vom Temperaturniveau her weisen Paraboloidkonzentratoren klare Vorteile gegenüber Rinnenkollektoren auf.

Kategorie/ Modell	Beschreibung	Entwicklungs- stand	Preis	Kontakt
PTC 1800	Temperatur bis 200°C	am Markt	~150 €/ m <sup>2</sup>	SOLITEM GmbH
PTC 1000	Temperatur bis 300°C	marktnahe Prototypen	400 €/ m <sup>2</sup>	SOLITEM GmbH
FASOL	Temperatur bis 300°C	Proof of Concept	150 €/ m <sup>2</sup>	CIEMAT - PSA
Fresnell Focus	Temperatur bis 200°C	Proof of Concept	200 €/ m <sup>2</sup>	DLR
CHAPS Kollektor (gekühlte C-PV)	Temperatur bis 150°C	Prototyp	660 €/ m <sup>2</sup>	Nat. Univ. Australia
Scheffler- Kollektor	Temperatur bis 1.200°C	Spezialanfertigung	Materialkosten gering, Arbeitskosten hoch	Solare Brücke

Tabelle 2: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Solarkollektoren

### 6.1.2. Biomassespeicheröfen

Speicheröfen im Kleinleistungsbereich für Raumwärme in Kombination mit Warmwasserbereitung sind am Markt erhältlich. Der Prototyp des Passivhaus-Speicherofens arbeitet nur mit Luft als Wärmeträgermedium und soll in Folge für die Anwendung mit Thermoöl weiterentwickelt werden.

Kategorie/ Modell	Beschreibung	Entwicklungs- stand	Preis	Kontakt
Kachelofen inkl. Warmwasser	Niedertemperaturbetrieb	am Markt	ca. 3.000 € Anschaffungskosten, abhängig von Leistung und Ausführungsstandard	HafnerTec

Visio Aqua	Heizleistung 9kW, Luft - Wasserleistungsverhältnis: 30% / 70%	am Markt	N/A	RIKA
Pellematic Mini	Leistungsbereich zw. 2 u. 8 kW	am Markt	N/A	Ökofen
FireWin	3,8-12 kW, Warmwasserbereitung	am Markt	N/A	Windhager
SimplyFire	Warmluft	Prototyp	N/A	GrAT

Tabelle 3: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Biomassespeicheröfen

## 6.2 Speichersysteme

### 6.2.1. Mitteltemperatur- (MT-)Speichersysteme

Direkte Speicher sind kommerziell erhältlich und haben daher den Vorteil, dass bereits langjährige Erfahrungen und Wissen im Umgang damit vorhanden sind. Derselbe Vorteil besteht bei sensiblen Wärmespeichern. Latentwärmespeicher sind zum Teil noch im Entwicklungsstadium, besitzen aber den großen Vorteil, dass Energie bei konstanter Temperatur gespeichert wird.

Sorptionsspeicher sind mit Temperaturen größer als 150 °C noch nicht kommerziell erhältlich. Ebenso existieren nur wenige aussagekräftige Forschungsergebnisse bezüglich des Einsatzes von chemisch reversiblen Speichern (Müller-Steinhagen, Drück, Tamme, 2007).

Kategorie/ Modell	Beschreibung	Entwicklungs- stand	Preis	Kontakt
Wärmeträger als Speicher	einfache Technik, aber groß	am Markt	ab ~ 300 € (Mineralöl)	Fragol, Sasol
Feste Speicher (Beton/ Gießkeramik etc.)	minimales Risiko	Proof of Concept	ab ~ 200 € (Beton)	divers

PCM (div. Salze)	konstante Temperatur, Produkte derzeit nur bis 100 °C. Anwendung als Klima-, Kälte- und Pufferspeicher.	am Markt	ab 300 € (KOH)	Rubitherm
Thermochemischer Speicher	Zeolith 100–300°C, Metallhydrid 280–500°C	Versuchsstadium	Zeolith 25 €/kWh	Aee Intech, Kleinwächter

Tabelle 4: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von MT-Speichersystemen

Der Zusammenhang zwischen Energiedichte und Entwicklungsstand (siehe Abbildung 2) sieht derzeit folgendermaßen aus: Je höher die Speicherdichte, desto niedriger ist der Entwicklungsstand; jedoch wird den Systemen basierend auf Sorptions- und Reaktionswärme in Zukunft großes Potential eingeräumt.

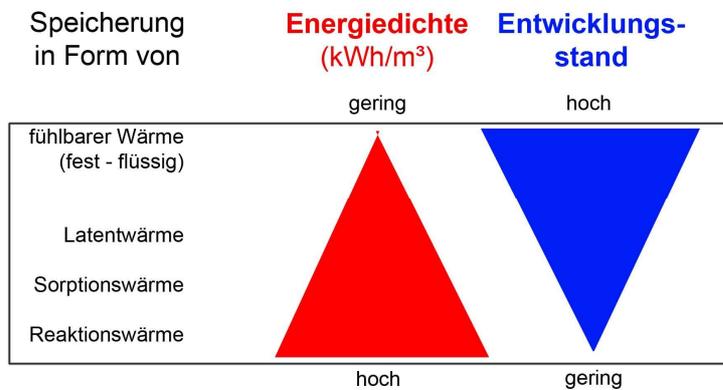


Abbildung 2: Entwicklungsbedarf zum Erreichen höherer Energiedichten (Müller-Steinhagen, Drück, Tamme, 2007)

Ein interessantes Beispiel in diesem Zusammenhang stellt das sogenannte „24h-Sonnenkraftwerk“ dar (Kleinwächter, 2003). Bei diesem System, welches in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt ist, handelt es sich um einen Solarkonzentrator mit Stirlingmotor und thermochemischem (Magnesium-Hydrid-Alanat-)Speicher. Der Speicher ist so ausgelegt, dass er lediglich die Nachtstunden überbrückt und somit einen 24h-Betrieb des Stirlingmotors ermöglicht. Die

Speichergröße kann jedoch verändert werden, sodass auch längere Zeitspannen überbrückt werden können.

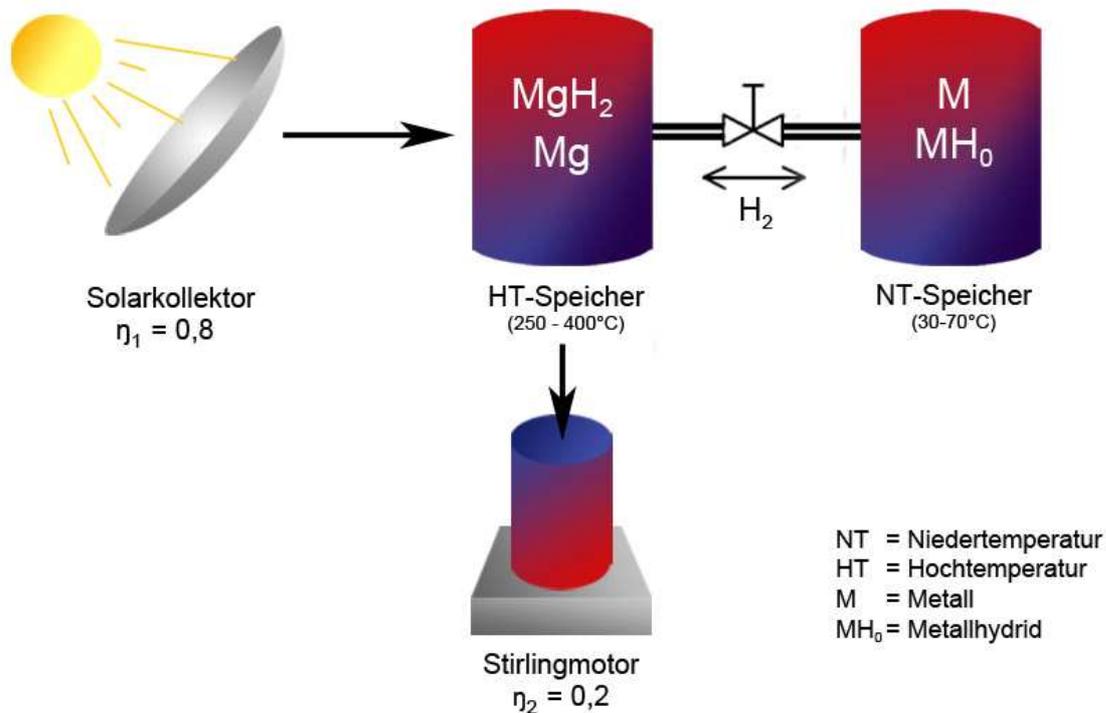


Abbildung 3: Grundstruktur des Systems „24h-Sonnenkraftwerk“<sup>2</sup>

Beim „24h-Sonnenkraftwerk“ reflektiert ein Solarkonzentrator Sonnenstrahlung auf einen Empfänger, wodurch Temperaturen bis 450 °C entstehen. Diese Energie wird einerseits für den Betrieb eines Mitteltemperatur-Stirlingmotors und andererseits als Aktivierungsenergie für den Magnesium-Hydrid-Speicher verwendet. Durch die Aktivierung wird H<sub>2</sub> ausgetrieben und über ein Ventil an den Alanat-Speicher abgegeben. Wird die Temperatur auf der Konzentratorseite verringert (Wolken, Nacht), sinkt die Temperatur und damit auch der Partialdruck des Wasserstoffs, und die Reaktionsrichtung wird umgekehrt. H<sub>2</sub> läuft vom Metall/Metallhydrid-Speicher in den Magnesium/Magnesiumhydrid-Speicher zurück. Dieser nimmt den Wasserstoff wieder auf. Dabei wird Reaktionswärme erzeugt. Das System funktioniert

<sup>2</sup> GrAT (2008).

selbstregulierend und reversibel. Auf der Seite des Metallhydrid-Speichers können verschiedene zusätzliche Installationen (z. B. Kühlung) realisiert werden.

Die bisherigen Ergebnisse der Entwicklung zeigen ein hohes Potential dieses Systems. Vorteile sind vor allem in der Reversibilität und der hohen Energiedichte des Speichers (1 kWh/kg) zu sehen. Jedoch erfordert dieses System noch umfangreichere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Vergleich zum oben beschriebenen Stein-Öl-Speicher.<sup>3</sup>

### 6.2.2. Niedertemperatur- (NT-)Speichersysteme

Am weitesten verbreitet ist der Wasserspeicher. Je nach Dimensionierung lassen sich damit Systeme für Warmwasseraufbereitung und Niedertemperaturheizung realisieren. Schüttgutspeicher werden vor allem für saisonale Speichersysteme verwendet. PCM-Speicher sind noch teuer, und thermochemische Speicher befinden sich noch im Entwicklungsstadium.

Kategorie/ Modell	Beschreibung	Entwicklungsstand	Preis	Kontakt
Warmwasser-Schichtenspeicher	bis 100 °C	am Markt	günstig	z. B. Vaillant
Schüttgutspeicher	unter 100 °C	am Markt	günstig, aber teurer als Wasserspeicher	Bine, Solarsiedlung Steinfurt-Borghorst
PCM-Speicher	höhere Wärmespeicherung als Wasser	Glasfassadensysteme von Dörken am Markt, Putze von Maxit	teuer	Dörken, Maxit
Thermochemischer Speicher	Silikagel 40–100 °C	Versuchsstadium	teuer	Aee Intech

Tabelle 5: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von NT-Speichersystemen

<sup>3</sup> Jürgen Kleinwächter (2003).

### 6.2.3. Kältekollektor und Kältespeicher

Auch bei der Kältespeicherung bietet die Verwendung von Wasser aufgrund der hohen Wärmespeicherkapazität und der hohen Schmelzenergie sowie der geringen Kosten Vorteile. Zur Reduktion bzw. Abdeckung von Lastspitzen bei der Gebäudekühlung kommt in einigen Hochhäusern in den USA das von der Firma Calmac entwickelte System zum Einsatz.<sup>4</sup> Paraffine als Kältespeicher sind derzeit noch teuer und werden daher vor allem für Spezialanwendungen (z. B. Transportkühlung medizinischer Produkte) verwendet.<sup>5</sup>

Kategorie/ Modell	Beschreibung	Entwicklungs- stand	Preis	Kontakt
Herkömmlicher Heizkörper <i>Kältekollektor</i>	Betrieb unter 0°C	In vielfältigen Formen am Markt verfügbar, ältere Ausführungen aus Gusseisen sind gut geeignet	gering	–
Wassereis (als PCM) <i>Kältespeicher</i>	kompakt, aber H <sub>2</sub> O- Anomalie (Volumens- ausdehnung)	Am Markt	N/A	Calmac
Paraffine (als PCM: -30°C bis +50°C) <i>Kältespeicher</i>	schlechte Wärmeleiter	z. T. am Markt	derzeit noch teuer	Rubitherm

Tabelle 6: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Kältekollektoren und -speichern

### 6.2.4. Sonstige Speichersysteme

Die Speicherung von Energie kann auch über Bewegungsspeicher oder in Form von komprimierter Luft erfolgen. Die Eignung dieser Systeme wird im Kapitel 9, „Komponentenentwicklung“ untersucht.

<sup>4</sup> [www.calmac.com](http://www.calmac.com)

<sup>5</sup> [www.rubitherm.com](http://www.rubitherm.com)

Kategorie/ Modell	Beschreibung	Entwicklungs- stand	Preis	Kontakt
MDS K3, Schwung- radspeicher	verliert ca. 20 % pro h	erste Produkte am Markt	1.000–3.000 US\$/kW	Magnet Motor
Druckluft- speicher	hohe Energiedichten erzielbar, keine ladezyklenabhängige Qualitätsvermindung	am Markt, gängige Systeme bis 300 bar	N/A	Air Car Factories S.A.

Tabelle 7: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften sonstiger Speichersysteme

### 6.3 Komponenten zur Erzeugung elektrischer Energie

Die Bereitstellung elektrischer Energie über das gesamte Jahr spielt eine wichtige Rolle. Technische Lösungen sind verfügbar, jedoch zeigen hier vor allem die Kosten die Grenzen der Einsatztauglichkeit auf. Ein weiterer Aspekt für die Anwendbarkeit im gegenständlichen Projekt ist die Größenordnung. So sind Dampfturbinen erst ab einer Leistung von 2 MW wirtschaftlich sinnvoll, hingegen liegen die üblichen Leistungen thermoelektrischer Generatoren unter einem Kilowatt. Andere am Markt erhältliche Komponenten sind z. B. Solarzellen, Kleinwindräder oder der gasbetriebene Lineator. Die Verbreitung der angeführten Technologien sowie die jeweils erzeugte Gesamtleistung sind aber sehr unterschiedlich. Solarzellen weisen eine exponentielle Steigerung in der Verbreitung auf, während thermoelektrische Generatoren vorerst nur in Spezialanwendungen Einsatz finden. Generell ist der Anteil dieser Technologien am gesamten „Energimix“ noch sehr gering, er wächst jedoch kontinuierlich.

Kategorie/ Modell	Beschreibung	Entwicklungs- stand	Preis	Kontakt
Thermo- elektrisches Element	elektrische Spannung im mV-Bereich	am Markt	ca. 10.000 €/ kWel	Austrian Biomass Center, TermoGen AB, Hi-Z

				Technology Inc.
Solarzellen flexibel	ca. 60 W/m <sup>2</sup>	am Markt	ca. 6.000 €/kW <sub>el</sub>	EVALON solar, alwitra, unisolar
Stirlingmotor	< 100 kW <sub>el</sub> , Dish-Stirling mit Solarenergie durch Parabolspiegel 10kW <sub>el</sub>	am Markt	3.500 €/kW <sub>el</sub>	Solo, Dish Stirling, Schlaich Bergemann und Partner, KWB, Sunmaschine
ORC-Turbine	(4 kW) 200 kW <sub>el</sub> –2 MW <sub>el</sub>	am Markt	1.500–2.000€/kW <sub>el</sub>	BBS GmbH & BAY Engineering, Turboden, GMK, ergion, Köhler und Ziegler
Windturbine	<1 kW <sub>el</sub> bis mehrere MW <sub>el</sub>	am Markt	> 1.000 €/kW <sub>el</sub>	www.kleinwindanlagen.de, z. B. SIRENA GmbH
Dampfturbine	> 2 MW wirtschaftlich	am Markt	1.700–2.300 €/kW <sub>el</sub>	Alstom, MAN Turbo
Lineator (Freikolbendampfmaschine mit integriertem Linear-generator)	0,2 kW bis 2,2 kW <sub>el</sub> ; Arbeitstemp.: > 500 °C	am Markt	1.000–1.500 €/kW <sub>el</sub>	OTAGOTAG GmbH & CO KG

Tabelle 8: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Komponenten zur Erzeugung elektrischer Energie

## 6.4 Output-Komponenten

### 6.4.1. Kälte aus Wärme

Im Gebäudebereich hat die Bereitstellung von Kälte in weiten Teilen der Erde eine höhere Priorität als die Versorgung mit Wärme. Kälte wird fast zur Gänze von elektrisch betriebenen Kälteanlagen erzeugt. Dadurch kommt es zu hohen Verbräuchen von elektrischer Energie. Alternative Lösungen, die thermisch betrieben werden, sind Absorptions- bzw. Adsorptions-Kühlmaschinen. Dabei handelt es sich vor allem um größere Anlagen für industrielle Anwendungen. Klein- und Kleinstkühlanlagen sind ebenfalls bereits am Markt. Aufgrund vielversprechender Forschungsergebnisse ist davon auszugehen, dass in der nächsten Zeit weitere solcher Produkte am Markt reüssieren werden.

Kategorie/Modell	Beschreibung	Entwicklungsstand	Preis	Kontakt
Absorptionskälte	80 kW bis mehrere MW Kühlleistung, Ammoniak- Absorptions-Kälteanlagen, flüssige Kältemittel	am Markt	teuer	Mattes Engineering
WFC SC5	Absorption, H <sub>2</sub> O, LiBr, 17,6kW	am Markt	N/A	Yazaki
Wegracal SE15	Absorption, H <sub>2</sub> O, LiBr, 15 kW	Am Markt	N/A	EAW
Suniverse	Absorption, H <sub>2</sub> O, LiBr, 10 kW	Am Markt	N/A	Sonnenklima
Solar 045	Absorption, H <sub>2</sub> O, LiBr, 4,5kW	Am Markt	N/A	Rotortica
Climatewell 10	Absorption, H <sub>2</sub> O/LiCl, 10kW	Am Markt	N/A	Climatewell
PSC10	Absorption, H <sub>2</sub> O/LiCl, 10kW	Am Markt	N/A	SolarNext
ACS 08	Adsorption, H <sub>2</sub> O/Silica gel, 7,5 kW	Am Markt	N/A	SorTech

Adsorptionskälte	feste Kältemittel	am Markt	teuer	Nishyodo, Maekawa, Sortech
SWAC-10	Adsorption, H2O/Silica gel	Prototyp	N/A	SJTU

Tabelle 9: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Komponenten zur Erzeugung von Kälte aus Wärme

### 6.4.2. Herd und Backofen

Auf der Verbraucherseite müssen neben den technischen Anforderungen an Haushaltsgeräte auch ästhetische und funktionelle Ansprüche der NutzerInnen berücksichtigt werden. Traditionelle Systeme wie beispielsweise der Scheitholzküchenofen vermitteln kein modernes Bild. Das bedeutet, dass bei Neuentwicklungen von Geräten deren Image ebenso berücksichtigt werden muss wie die Technik und sie denselben Komfort wie herkömmliche, elektrisch betriebene Geräte bieten müssen. Die bestehenden technischen Lösungen werden im Bereich der Bäckereien bereits angewandt, entsprechende Geräte für Haushalte sind jedoch noch nicht am Markt.

Kategorie/Modell	Beschreibung	Entwicklungsstand	Preis	Kontakt
Scheitholzküchenofen	Direktbetrieb mit Scheitholz	traditionelle Lösung	günstig	diverse Anbieter
Industriebacköfen	Thermoöl	am Markt	teuer	Berief Industrieküchen, BBS GmbH

Tabelle 10: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Herd und Backofen

### 6.4.3. Anschluss-Systeme

Die Verteilung der thermischen Energie im Gebäude bedarf einer praktikablen und sicheren Lösung. Verteilungssysteme von Wärmeträgern im Mittel- und Hochtemperaturbereich werden in der Industrie bereits eingesetzt, für die Haustechnik hingegen existieren noch keine ausgereiften Lösungen.

Kategorie/Modell	Beschreibung	Entwicklungsstand	Preis	Kontakt
Standardisierter Hochtemperatur-(HT)-Anschluss	Temperaturstabilität über 300 °C	noch nicht verfügbar	N/A	Steyr Werner, Angst + Pfister GesmbH

Tabelle 11: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Anschluss-Systemen

## 6.5 Zusammenfassung

Die Untersuchung des Ist-Stands zeigt, dass die derzeit am Markt verbreiteten Produkte vor allem technische Lösungen sind, die thermische Energie für die Erwärmung von Wasser oder zu Heizzwecken bereitstellen. Dabei wird als Wärmeträgermedium ausschließlich Wasser bzw. ein Gemisch aus Wasser, Frostschutz und Korrosionsschutz eingesetzt. Temperaturen bis 100 °C können damit ohne Druck erzeugt werden, die Speicherung der thermischen Energie erfolgt in Pufferspeichern. Die Energieträger sind zum einen Biomasse und zum anderen Solarenergie. Diese Systeme (Biomasseheizung und Solarkollektoren) werden meist kombiniert und ermöglichen je nach Auslegung der Anlagen eine solare Deckung des Warmwasserverbrauchs von bis zu 75 Prozent, über das gesamte Jahr gesehen. Ebenso ist eine Integration in das Heizsystem (Niedertemperatur-Wand- oder Fußbodenheizung) möglich. Damit kann die Betriebsdauer der Heizung (Biomasseheizung) innerhalb der Heizperiode verkürzt werden.

Die Lösungen für höhere Temperaturniveaus (Erzeugung und Speicherung) befinden sich großteils noch im Entwicklungsstadium.

Für die Erzeugung elektrischer Energie wird derzeit vor allem Photovoltaik eingesetzt. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten ist die Verbreitung dieser Produkte sehr stark von den Förderrahmenbedingungen abhängig. Während in Österreich die Zunahme an Photovoltaikflächen gering ist, verzeichnet Deutschland hohe Zuwächse, was durch höhere Einspeisetarife sowie längere Garantie der Einspeisetarife erklärbar ist. Ein Inselbetrieb ist derzeit nur in entlegenen Gebieten (z. B. Schutzhütten im Gebirge) wirtschaftlich sinnvoll.

Einige Produkte sollen Kraft-Wärme-Kopplung im kleinen Leistungsbereich realisieren, z.B. durch einen Stirlingmotor, der in einen Biomasseheizkessel integriert

ist. Dadurch sollen sowohl der Bedarf an Raumwärme und Warmwasser als auch der Bedarf an elektrischer Energie gedeckt werden. Die Firmen KWB und Sunmachine haben solche Lösungen entwickelt, die sich derzeit in der Markteinführungsphase befinden.

Die Analyse der recherchierten und bewerteten Komponenten zeigt, dass verschiedene Lösungen existieren, die für das zu entwickelnde Konzept des Energieautarken Hauses anwendbar sind. Jedoch befinden sich viele Entwicklungen noch im vorwettbewerblichen Stadium (z. B. Solarkonzentratoren), und oft sind die marktgängigen Produkte für den industriellen Einsatz konzipiert und in kleinerem Maßstab nicht erhältlich. So werden z. B. mit Thermoöl betriebene Backöfen für die Backindustrie angeboten; diese müssen erst für den Einsatz im Haushalt adaptiert werden. Ähnliches gilt für die Absorptions- oder Adsorptionskühlaggregate auch hier werden noch die meisten Produkte für Industrieanwendungen konzipiert. Erste Kleingeräte, z. B. für solar betriebene Klimaanlage, sind hier jedoch bereits erhältlich.

In den nachfolgenden Kapiteln wird genauer auf die potentiell einsetzbaren Lösungen eingegangen, um deren Tauglichkeit und die notwendigen Adaptionen bzw. den Weiterentwicklungsbedarf zu ermitteln.

## 7. Innovationsgehalt des Projektes

Wie im vorigen Kapitel bereits beschrieben, werden derzeit vorwiegend Einzellösungen für die Energieerzeugung (v. a. elektrische Energie) in Gebäuden angeboten. Außerdem lässt sich die ständig steigende Nachfrage nach elektrischer Energie im Haushalt versorgungsseitig nicht in den Griff bekommen. Derzeit steigt der Strombedarf in Europa um durchschnittlich zwei Prozent pro Jahr an. In anderen Regionen der Welt werden Steigerungsraten von bis zu acht Prozent pro Jahr prognostiziert (Priddel, 2006). Hohe Investitions- und Betriebskosten sowie hohe Transportverluste entstehen durch den notwendigen Netzausbau und die Instandhaltung und Erneuerung des bestehenden Netzes. Alleine in Österreich sind zur Absicherung der Versorgung mit elektrischer Energie mehr als 23 Kraftwerke bis zum Jahr 2016 mit einer Leistung von über 7.600 MW zu installieren (Boltz, 2007). Der Bedarf an Erdgas wird sich im Zeitraum von 2003 bis 2016 aufgrund der enormen Steigerung der Anzahl von Gaskraftwerken annähernd verdoppeln. Damit müssen auch die Gasleitungen und die Gasspeicher entsprechend ausgebaut werden (Boltz, 2007).

Mit dem „Wireless House“ wird daher eine radikal neue Strategie verfolgt, die eine unabhängige Energieversorgung von Gebäuden ermöglichen soll. Das Ziel ist es, durch eine Systemintegration, die auch die Haushaltsgeräte umfasst, die Abhängigkeit von elektrischer Energie deutlich zu reduzieren. Die Strategie sieht, ausgehend von den Nutzeranforderungen, den verstärkten Einsatz thermischer Energie vor und damit verbunden eine massive Reduktion des Verbrauchs von elektrischer Energie.

Durch die Verwendung von thermischer Energie im Mitteltemperaturbereich (bis 300 °C) können auch thermische Verbraucher wie Herd und Backrohr versorgt werden, neben den üblichen thermischen Anwendungen wie Heizung und Warmwasser, welches auch für Waschmaschine und Geschirrspüler verwendet wird. Auch die Kühlung soll durch thermisch betriebene Aggregate gelöst werden, und schließlich soll thermische Energie in elektrische Energie umgewandelt werden und so den verbleibenden Strombedarf decken.

Die Komponenten für die Bereitstellung der thermischen Energie sind Solarkonzentratoren, die Speicherung erfolgt in Mitteltemperaturspeichern. Für die Zeiten, in denen ein Defizit an Solarstrahlung herrscht, wird ein mit Biomasse betriebenes Backup-System die Bereitstellung der thermischen Energie übernehmen.

## 8. Systemlayout und Modellvarianten

### 8.1 Berechnung des thermischen und elektrischen Energiebedarfs und Stromverbrauchshierarchie

Als wesentliche Grundlage für die Entwicklungen wurden ausgehend von den Verbrauchsdaten für Haushalte (siehe Tabelle 12) Berechnungen durchgeführt, die das Reduktionspotential der notwendigen elektrischen Energie bei einem Wechsel zu thermischer Energie quantifizieren.

**Durchschnittsverbrauch an elektrischer Energie in kWh pro Jahr**

Haushaltsgeräte	1 Personenhaushalt	2 Personenhaushalt	3 Personenhaushalt	4 Personenhaushalt	jede zusätzliche Person
Herd, inkl. Backrohr	360-720	480-840	600-960	720-1080	120
Waschmaschine	90-140	170-230	250-300	320-360	70
Trockner	140-180	240-280	330-380	450-500	100
Geschirrspüler	150-180	220-250	350-400	390-430	70
Kühlschrank (180l)	250-350	250-350	250-350	250-350	je 10l Kühlvolumen, +15-20kWh
Gefrierschrank (200-250l)	270-370	270-370	270-370	270-370	je 10l Kühlvolumen, +15-20kWh
Kleingeräte	110	130	150	170	20
TV- /HiFi System	250	250	250	250	
PC	70	70	70	70	
Beleuchtung	230	340	400	470	50
Warmwasser	720	1080	1450	1830	380

Tabelle 12: Durchschnittsverbrauch an elektrischer Energie in kWh pro Jahr für Haushalte mit unterschiedlicher Personenanzahl<sup>6</sup>

Die von der Vereinigung österreichischer Energieunternehmen (VEÖ) ermittelten Verbrauchswerte zeigen die unterschiedlichen Verbrauchsdaten für die Elektrogeräte eines Haushalts. Dabei ist gut ersichtlich, dass die größten Verbraucher Herd, Backrohr sowie die Warmwasseraufbereitung sind. Diese können zu 100 % auch mit thermischer Energie betrieben werden. Für die Warmwasserbereitstellung kann hierbei auf bewährte Systeme zurückgegriffen werden. Herd und Backrohr bedürfen jedoch eines höheren Temperaturniveaus und müssen separat versorgt werden. Auch bei anderen Verbrauchern wie Waschmaschine, Geschirrspüler und Trockner stellt die thermische Energie den Hauptanteil am Energieverbrauch dar. Ebenso

<sup>6</sup> VEÖ, [www.veoe.at](http://www.veoe.at).

können Gefriergeräte und Kühlgeräte zur Gänze mit Wärmeenergie betrieben werden.

Wie sich diese Änderung der Energieform auf den Verbrauch auswirkt, ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

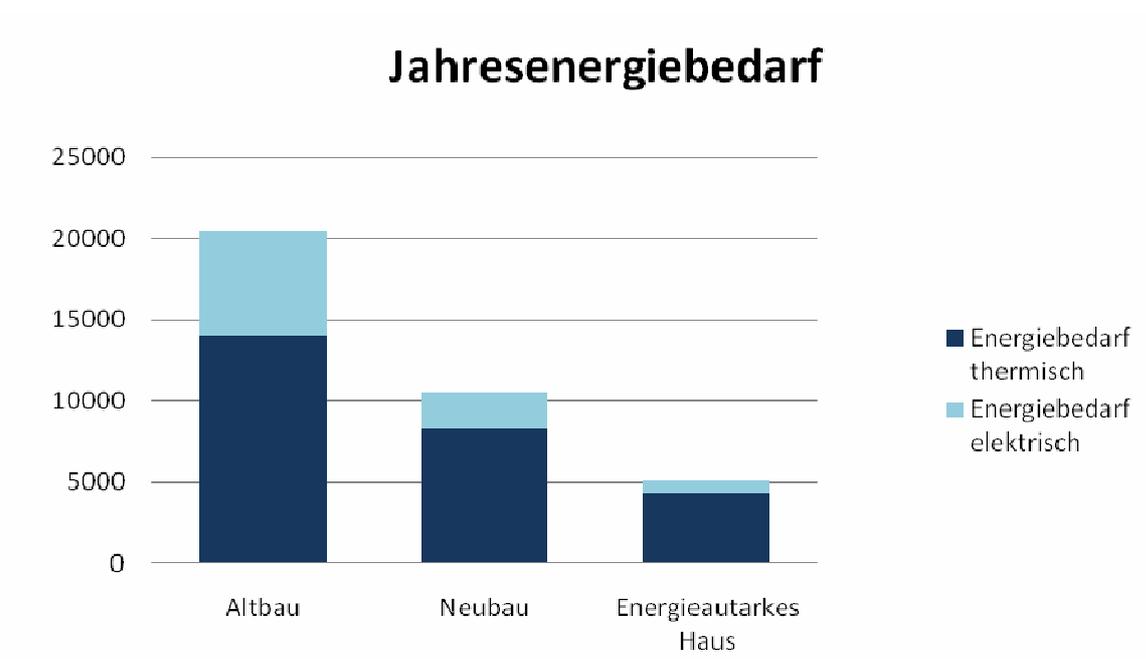


Abbildung 4: Berechnungen des Energieverbrauchs für einen Haushalt unter Berücksichtigung der verwendeten Haushaltsgeräte mit konventioneller Energieversorgung (Altbau, Neubau) und im Konzept des Energieautarken Hauses (der Heizenergiebedarf orientiert sich an der im S-HOUSE berechneten Energiekennzahl von 6kWh/m<sup>2</sup>a)<sup>7</sup>

Wie der obigen Darstellung zu entnehmen ist, sinken für einen durchschnittlichen Haushalt (vier Personen) die elektrischen Energieverbräuche von ursprünglich knapp 6.500 kWh/Jahr (Altbau) bzw. 2.150 kWh/Jahr (Neubau) auf nur 665 kWh/Jahr im Energieautarken Haus.

Die nutzungsbezogene Gliederung des Verbrauchs nach Energieformen zeigt die folgende Tabelle.

---

<sup>7</sup> GrAT (2008).

<b>Energieform</b>	<b>Verbraucher</b>	<b>kWh/a</b>
thermische Energie 300°C	Herdplatten	500
	Backrohr	39
		<b>539</b>
thermische Energie < 100°C	Geschirrspüler	118
	Waschmaschine	174
	Trockner	264
	Kühlschrank	167
	Gefriertruhe	189
	Warmwasser	2.373
	Heizung	600
		<b>3.874</b>
elektrische Energie	Waschmaschine	15
	Geschirrspüler	110
	Kleingeräte	170
	TV/HiFi-Systeme	250
	Computer	70
	Beleuchtung	50
		<b>665</b>
<b>Gesamtbedarf / Jahr</b>		<b>5.078</b>

Tabelle 13: Energiebedarf gegliedert nach Energieformen

Diese Informationen dienen als Basis für den Abgleich von Bedarfs- und Angebotsseite, müssen jedoch noch weiter differenziert werden, um die lückenlose Versorgung des Energieautarken Hauses zu gewährleisten. Daher wird im nächsten Schritt als kleinstes ausschlaggebendes Intervall das Lastprofil eines typischen Tagesverlaufs dargestellt, um in weiterer Folge dem Versorgerprofil gegenübergestellt zu werden (siehe auch Kapitel 10).

Der Bedarf an konventioneller elektrischer Energie schlüsselt sich folgendermaßen für einen typischen Tagesverlauf auf (Quelle: Vereinigung der Deutschen Elektrizitätswerke, VDEW):

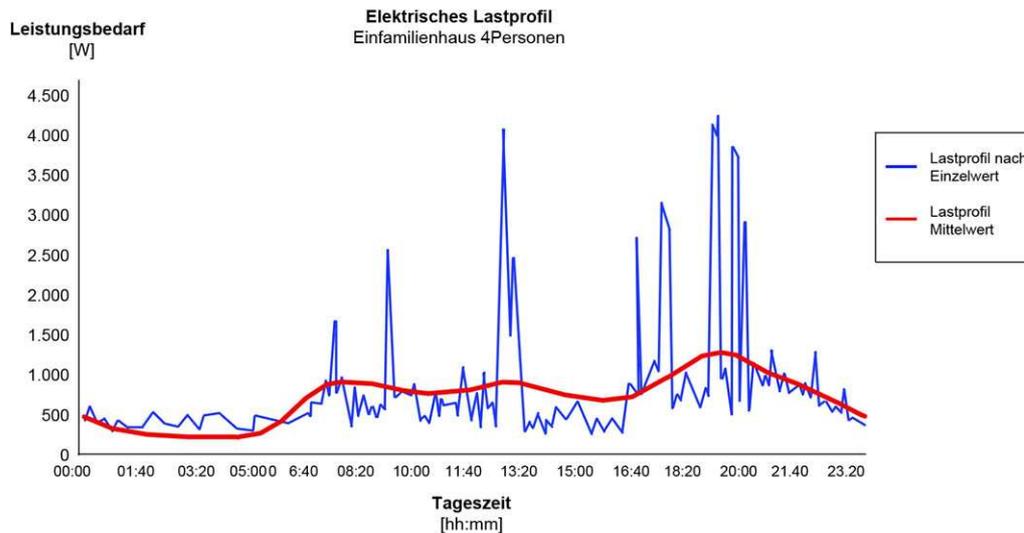


Abbildung 5: Durchschnittlicher elektrischer Nutzenergiebedarf im Tagesverlauf<sup>8</sup>

Von Bedeutung ist neben den kurzzeitigen Spitzen auch der über die Nacht konstante Minimalenergiebedarf von etwa 400 W, welcher durch Standby-Betrieb von Elektrogeräten, Restbeleuchtung sowie Heiz- oder Kühllast entsteht.

Saisonal bedingt steigt im Winter der Energiebedarf deutlich an, weshalb stets das winterliche Lastprofil besonders beachtet werden muss. Da aber auch die Energiebereitstellung in Form von solarer Strahlungsenergie gerade in den Wintermonaten Einbußen erzielt, gilt es die Grobauslegung des Versorgungssystems (Kollektorfläche, Speichervolumen) diesem Bedarf anzupassen, was im Kapitel 10.1.1 erfolgt.

Als Basis für die Strategieentwicklung zum „Wireless House“ wurden drei Modellsysteme entwickelt, welche die verschiedenen Technologien für Energiegewinnung und -speicherung sowie für die Nutzung im Haushalt (z. B. Haushaltsgeräte, Heizung, Warmwasser) integrieren.

Diese Modellsysteme unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich Wärmeträgermedium und Speichereinheiten. Funktionsschemata veranschaulichen die einzelnen Systemvarianten und zeigen die Lage des Kollektors in Relation zum Speicher sowie das Konzept der Energieverteilung und den Anschluss der einzelnen Verbraucher. Jedes System wird anhand eines architektonischen Modells dargestellt

<sup>8</sup> GrAT (2008).

und kurz beschrieben. Abschließend werden die drei Systeme bewertet und das am besten geeignete System für die Weiterentwicklung ausgewählt. Dazu wurden technische und sicherheitsrelevante Aspekte sowie das Verbesserungspotential des ausgewählten Systems analysiert.

## 8.2 Das „Schwerkrafthaus“

Im ersten Energiekonzept, dem „Schwerkrafthaus“, wird die Energie in Form von Wärme bei Temperaturen zwischen 150 °C und 300 °C über ein flüssiges Wärmeträgermedium mittels des Thermosyphon-Prinzips (Schwerkraftprinzips) transportiert und gespeichert. Die Wärmeenergie wird für das Kochen, Backen, die Produktion von Warmwasser und das Kühlen verwendet. Aus der Temperaturdifferenz wird über einen zwischengeschalteten Stirlingmotor elektrische Energie für den Betrieb von elektrischen Geräten wie PC, Stereoanlage, TV, Licht etc. gewonnen.

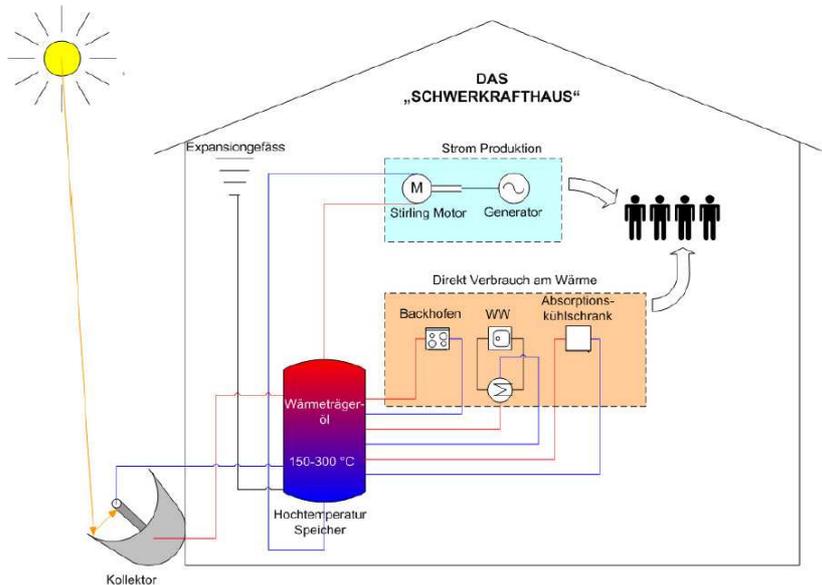


Abbildung 6: Funktionsschema „Schwerkrafthaus“ mit Darstellung von Kollektor, Speicher und Stromerzeuger<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Atelier Werner Schmidt.

### 8.3 Das „Dampfhaus“

Im Vergleich zum Konzept des „Schwerkrafthauses“ wird die Kollektoranlage beim „Dampfhaus“ mit einem wesentlich höheren Arbeitsdruck betrieben. Um die Effizienz der eingesetzten Kollektoren zu erhöhen, kann bei diesem Modell statt des Rinnenkollektors auch ein Paraboloidspiegel verwendet werden. Der Einsatz eines Kondensators beim Modell des Dampfhauses erhöht die Effektivität zusätzlich, jedoch sind durch den hohen Arbeitsdruck des Wärmeträgermediums besondere Sicherheitsmaßnahmen zu beachten (siehe Kapitel 8.6), die für den Einsatz im Privathaushalt recht aufwendig sind.

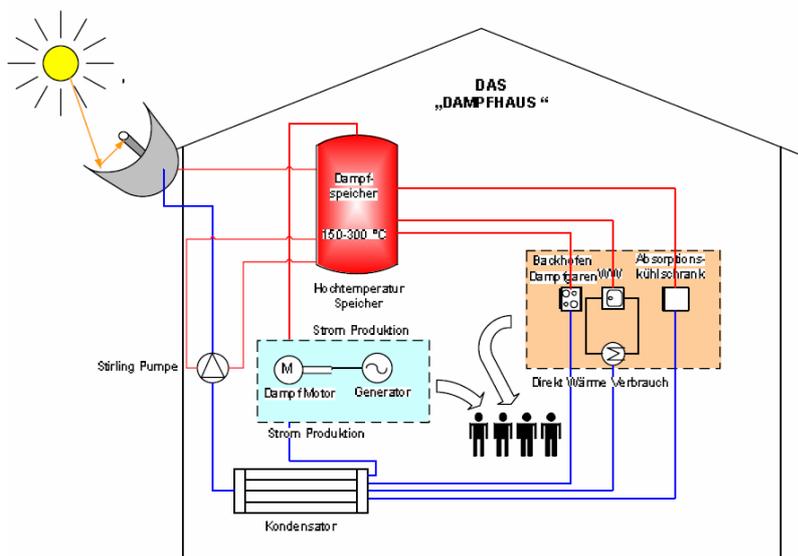


Abbildung 7: Funktionsschema „Dampfhaus“ mit Darstellung von Kollektor, Speicher, Kondensator und Stromerzeuger<sup>10</sup>

### 8.4 Das „Lufthaus“

Das „Lufthaus“ speichert die zuvor thermisch gewonnene Energie unter Verwendung einer Stirlingpumpe in Form von komprimierter Luft mit hohem Druck in speziellen Lufttanks. Ein kleiner an die Kollektoranlage angeschlossener Wärmespeicher dient zur Warmwasserbereitstellung sowie für das Kochen und Backen bei Temperaturen bis 200 °C, die von der Kollektoranlage und dem Mitteltemperaturspeicher

<sup>10</sup> Atelier Werner Schmidt.

bereitgestellt werden. Für diesen Wärmespeicher wird ein kleineres Kollektormodul als in den zwei vorherigen Varianten benötigt.

Das „Lufthaus“ bietet mehrere und komplexere Schaltungsmöglichkeiten zwischen den verschiedenen Komponenten. Zur Erzeugung elektrischen Stroms kann sowohl ein Stirlingmotor als auch eine Photovoltaikanlage zum Einsatz gelangen. Dies erlaubt mehr Flexibilität, um auf das stark variierende Sonnenangebot unserer Breitengrade zu reagieren. Überschüsse können über einen Kompressor wieder im Druckluftspeicher gespeichert werden. Der Stirlingmotor kann im Winter thermisch durch ein Backup-System gespeist werden (z. B. mittels Biomasseofen).

Die mittel- bis langfristige Energiespeicherung in entsprechenden Drucklufttanks, kann im Vergleich zur Speicherung thermischer Energie über längere Zeiträume mit wesentlich geringen Verlusten erfolgen. Zu beachten ist jedoch der stark verminderte Gesamtwirkungsgrad durch die für die Speicherung erforderliche Energieumwandlung.

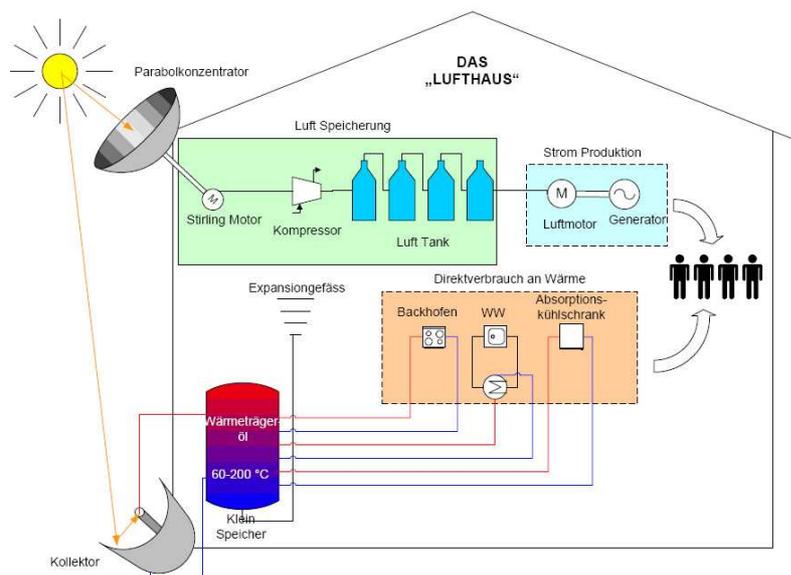


Abbildung 8: Funktionsschema des „Lufthauses“ mit Darstellung von Kollektoren, Speicher und Stromerzeuger<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Atelier Werner Schmidt.

## 8.5 Bewertung und Zusammenfassung

In Anlehnung an die Prinzipien der Angepassten Technologie wurden für die Bewertung der beschriebenen Modelltypen folgende Kriterien definiert.

- Risikominimierung
- Einfachheit im Aufbau und im Betrieb
- Verwendung handelsüblicher Materialien
- hohe Verlässlichkeit
- Selbstregulierung

Das Modell des „Schwerkrafthauses“ erfüllt die Kriterien am besten, bedarf aber einer Reihe von Weiterentwicklungen, um das Energieversorgungssystem möglichst einfach zu gestalten. Dieses System arbeitet druckfrei mit Thermoöl, welches nicht korrosiv wirkt und dessen Kreislauf im Idealfall mittels Zwangsumlauf ohne Pumpe betrieben werden kann. Ein einfacher Aufbau und die Verwendungsmöglichkeit von handelsüblichen Materialien sprechen ebenfalls für das Schwerkrafthaus. Optimierungsbedarf für dieses Modell betreffen die Verringerung der Solarkollektorfläche, also der Gesamtfläche der benötigten konzentrierenden Solarkollektoren. Dies lässt sich durch folgende Maßnahmen erreichen:

- Trennung der Versorgung von Endgeräten mit Bedarf an hoher Temperatur und solchen, bei denen ein geringeres Temperaturniveau ausreicht (zwei unabhängige Speichersysteme);
- Anwendung eines konventionellen Flachkollektors für Warmwasser und Heizung (Temperaturen 80–100 °C);
- Hochtemperatur-Kreislauf wird ergänzt durch Biomasseofen (Backup-System), der im Bedarfsfall die Temperatur im Speicher aufrechterhält.

Bei den durchgeführten Berechnungen für den Beispielstandort Böheimkirchen wurden diese Adaptionen unter Verwendung der am Standort gemessenen Daten berücksichtigt (siehe dazu Kapitel 10.1, „Berechnungen für die Dimensionierung“).

## **8.6 Grundlegende strategische, technische und sicherheitsrechtliche Aspekte**

Wesentlichen Einfluss auf das Systemdesign des „Wireless House“ haben sowohl die Kombination der Einzelkomponenten als auch spezifische sicherheitstechnische und rechtliche Aspekte, die im Folgenden näher analysiert werden.

### Kollektorsysteme

Die Verwendung von Flachkollektoren in Kombination mit Solarkonzentratoren ermöglicht die Bereitstellung unterschiedlicher Temperaturniveaus entsprechend den Nutzungsanforderungen. Das hohe Temperaturniveau von 300 °C soll nur die entsprechenden Nutzer (Backrohr und Herdplatten) und den Stirlingmotor zur Erzeugung der elektrischen Energie betreiben. Damit können zum einen bereits am Markt befindliche Produkte für das Temperaturniveau unter 100 °C verwendet werden, zum anderen lassen sich Solarkonzentrator und Mitteltemperaturspeicher wesentlich kleiner dimensionieren.

Bei der Verwendung von konzentrierenden Solarsystemen ist der Schutz von Personen im direkten Nahbereich des Fokus sicherheitstechnisch relevant. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Positionierung des Konzentrators und die Einhaltung von Sicherheitsabständen. Die Anwendung von Konzentrator (Rinnen- oder Paraboloidspiegeln) erfolgt derzeit nur in Solarkraftwerken im industriellen Maßstab. Dafür bestehen auch entsprechende Vorschriften für den sicheren Umgang. Für den Einsatz in und auf Gebäuden müssen noch entsprechende Sicherheitsrichtlinien erstellt werden, die sich aber an bestehenden Vorgaben orientieren können.

### Speicherkonzept

Je nach regionalem Temperaturunterschied im Jahres- und Tagesverlauf sind unterschiedliche Speicherkonzepte sinnvoll. Im Konzept wurde aufgrund der Verfügbarkeit eines Backup-Systems und der wesentlich geringeren Kosten einem Pufferspeicher für eine Woche der Vorzug gegenüber einem saisonalen Speicher gegeben. Lediglich bei der Speicherung von Kälte ist aufgrund der hohen spezifischen Wärme von Wasser mit Hilfe von Eisspeichern grundsätzlich ein längerer Speicherzeitraum möglich.

## Wärmeträgermedium

Auf der Erzeugungsseite (Solarkonzentrator, Flachkollektor, Biomasse-Backup-System) ist ein flüssiger Wärmeträger vorzuziehen, um den Pumpenergieaufwand und die Absorberrohrdurchmesser (Abstrahlungsverluste) klein zu halten. Für die Versorgung der Verbraucher im Niedertemperaturbereich (z. B. Warmwasser, Waschmaschine) können marktübliche Komponenten verwendet werden. Als Wärmeträgermedium im Temperaturbereich bis 100 °C stellt Wasser bzw. ein Gemisch aus Wasser, Frostschutz und Korrosionsschutz die am weitesten verbreitete Lösung mit der höchsten spezifischen Wärmespeicherkapazität (ca. 4 kJ/KgK) dar. Zur Erreichung höherer Temperaturen (> 100 °C) ist für die im Projekt geplanten Anwendungen Wasser als Wärmeträgermedium nicht geeignet.

Für die Verbraucher im Mitteltemperaturbereich sind daher neue Lösungen auf Basis flüssiger Wärmeträger zu entwickeln. Die erfolgversprechendste technische Möglichkeit, Energie bei Temperaturen bis 300 °C ohne Druck vom Entstehungsort bis zum Verbraucher zu leiten, ist der Einsatz von Thermoöl anstelle von Wasser. Für solche Wärmeträgeranlagen gilt die DIN 4754. Es ist daher notwendig, die Anlagen an diese sicherheitsrechtlichen Bestimmungen anzupassen (siehe auch Kapitel 9.2).

Gasförmige Wärmeträger werden nur bei der Verwendung einer Lüftungsanlage im niedrigen Temperaturbereich in Betracht gezogen.

## **8.7 Systemlayout „Wireless House“**

Aufbauend auf den Recherchen und dem Systemlayout des Energieautarken Hauses wird im folgenden energetischen Funktionsschema das Zusammenspiel der ausgewählten Komponenten für die Energieversorgung dargestellt.

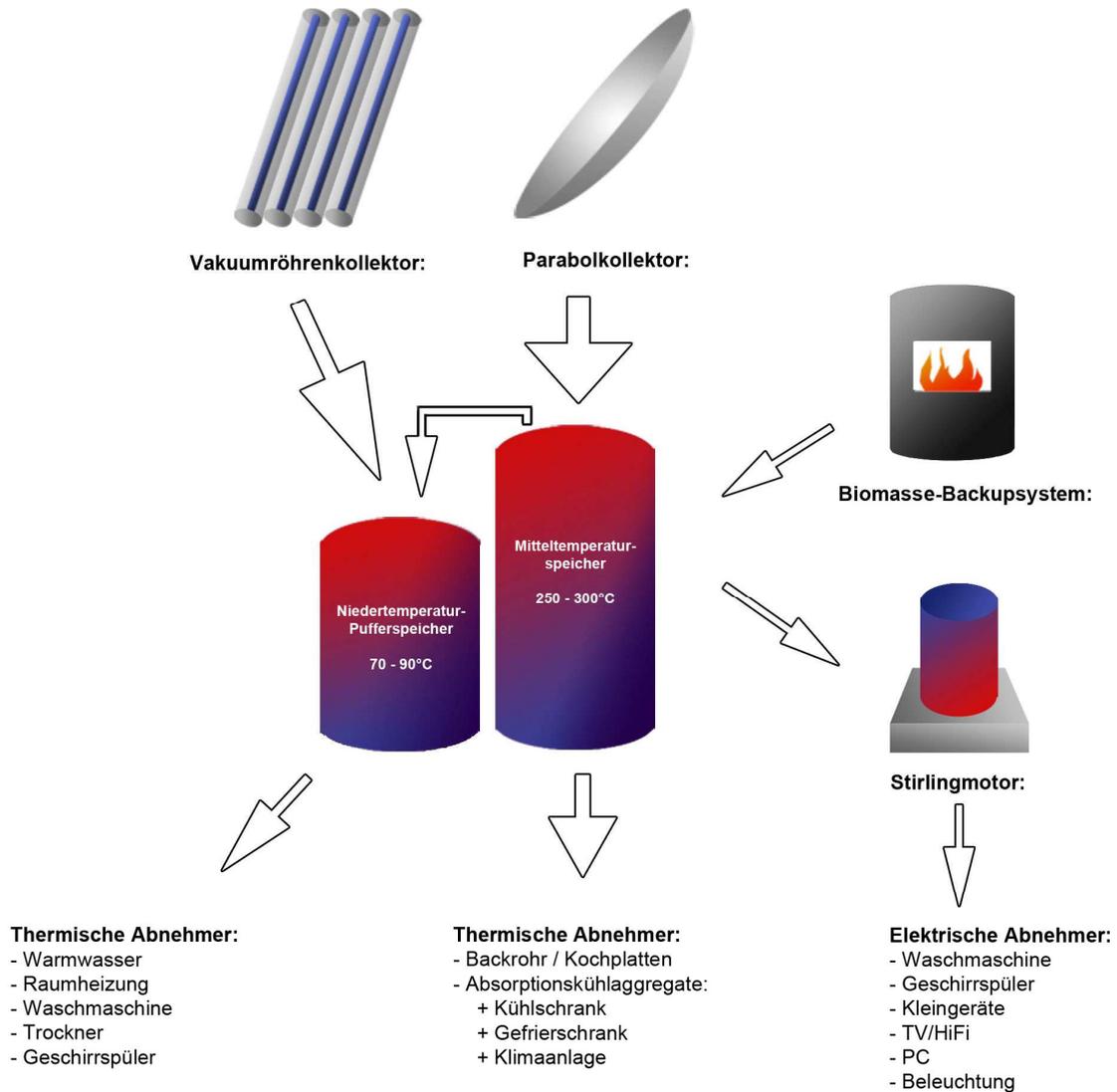


Abbildung 9: Energetisches Funktionsschema „Energieautarkes Haus“, System „Wireless House“<sup>12</sup>

Wie die einzelnen Komponenten des „Wireless House“ genau beschaffen sein müssen, wird im Folgenden anhand der Analyse technischer Anforderungen und der dafür entwickelten Funktionsmodelle und -prototypen dargestellt.

<sup>12</sup> GrAT (2008).

## **9. Komponentenentwicklung**

Auf der Grundlage der getroffenen Systemauswahl und der Ergebnisse der vorherigen Kapitel werden die wichtigsten Komponenten detailliert und in Bezug auf das „Wireless House“-System weiterentwickelt. Die betrifft insbesondere Komponenten zur Erzeugung thermischer Energie, Speichersysteme, Komponenten zur Erzeugung elektrischer Energie und Output-Komponenten. In praktischen Versuchen mit Funktionsmodellen und (Vor-)Prototypen werden Fragen der technischen Machbarkeit beantwortet und der weitere Entwicklungsbedarf ermittelt.

### **9.1 Komponenten zur Erzeugung thermischer Energie**

Die Nutzung der Solarstrahlung für die Erzeugung thermischer Energie stellt die Hauptenergiequelle im Konzept dar und soll für die Nutzung in Gebäuden optimiert werden, wobei Temperaturen bis 300 °C notwendig sind. Mit Flachkollektoren können solche Temperaturen nicht erreicht werden, vielmehr ist für eine effiziente Nutzung eine entsprechende Konzentration nötig. Konzentrierende Solarsysteme werden auf ihre Tauglichkeit hin untersucht und an den Bedarf angepasst. Eine detaillierte Analyse der Reflektortypen, der Reflexionsmaterialien und Entwicklungen zum Nachführungssystem werden im Folgenden dargestellt.

Die konstante Verfügbarkeit der erforderlichen thermischen Energie soll durch ein Back-up-System, das mit Biomasse betrieben wird, erfolgen. Die Entwicklung basiert auf einem Scheitholzofen mit Naturzug, welcher in das Gesamtsystem integriert wird.

#### **9.1.1. Solarkonzentratoren**

Bei den Solarkonzentratoren unterscheidet man grundsätzlich zwischen Parabolrinnen- und Paraboloidkonzentratoren. Rinnenkollektoren sind leichter zu fertigen und zu steuern, aber Paraboloidsysteme erreichen höhere Temperaturen und Wirkungsgrade. Die derzeit angebotenen Systeme im kleinen Leistungsbereich arbeiten hauptsächlich mit Rinnenkonzentratoren, eine Übersicht über diese

Systeme mit einer Bewertung der Eignung für das Konzept des Energieautarken Hauses bietet die folgende Tabelle.<sup>13</sup>

Kategorie/Modell	PTC 1800	PTC 1000	FASOL	Fresnell Fix Focus	CHAPS-Kollektor (gekühlte C-PV)	Scheffler-Kollektor
Bewertung	Temperatur zu niedrig	geeignet*	geeignet*	Temperatur zu niedrig	nicht geeignet	geeignet *

\* Systeme unterlaufen einer genaueren Untersuchung

Tabelle 14: Solarkonzentratoren

Aufgrund der benötigten Temperaturen von ~ 300 °C sind die Systeme PTC100 und FASOL grundsätzlich einsetzbar. Besser würde sich der Einsatz eines Scheffler-Kollektors eignen, dessen Fertigung jedoch sehr arbeitsaufwendig ist.

- Bei dem Kollektor *SOLITEM PTC1000* handelt es sich um einen Rinnenkonzentrator mit einachsiger Sonnennachführung. Die Aperturfläche des Kollektors beträgt 1x2 m und ist somit auch für Dachinstallationen geeignet. Die Hersteller geben einen Kollektorwirkungsgrad von 60 % und eine Kapazität von rund 1 kW an.<sup>14</sup>
- Der Kollektor *FASOL*, eine Entwicklung der Plataforma Solar de Almeria (PSA) ist ein horizontaler Wannenkollektor mit einer Aperturfläche von 2,62 m<sup>2</sup> bei einer Länge von 6 m. Der Wirkungsgrad ist theoretisch ermittelt und wird mit 70–75 % angegeben.<sup>15</sup>

<sup>13</sup> Detaillierte Angaben zu Leistungsparametern, Entwicklungsstand, Preis und Herstellern dieser Systeme wurden bereits in der Analyse des Ist-Standes dargestellt (siehe Tabelle 2).

<sup>14</sup> IEA-SHC; State of the Art within Task 33/ IV, Subtask C; „Medium Temperatur Collectors“; May 2005.

<sup>15</sup> IEA-SHC; State of the Art within Task 33/ IV, Subtask C; „Medium Temperatur Collectors“; May 2005.



Abbildung 10: links: SOLITEM PTC1000<sup>16</sup>; rechts: PSA FASOL<sup>17</sup>

- *Scheffler-Kollektor*

Dieser Kollektor wurde in erster Linie zum solaren Kochen entwickelt. Um den Kollektor auch in weniger entwickelten Ländern verwenden und herstellen zu können, wurde darauf geachtet, dass die verwendeten Materialien gut verfügbar sind. Der Reflektor kann aus einfachen Materialien wie z. B. silberbelegten Glasspiegeln (Badezimmerspiegeln) realisiert werden.

Heute werden diese Kollektoren in Größen von 2 m<sup>2</sup> bis 50 m<sup>2</sup> hergestellt.<sup>18</sup>



Abbildung 11: Links: 2m<sup>2</sup>-Scheffler-Kollektor, rechts: 50m<sup>2</sup>-Kollektor in Indien<sup>19</sup>

<sup>16</sup> IEA-SHC; State of the Art within Task 33/ IV, Subtask C; „Medium Temperatur Collectors“; May 2005.

<sup>17</sup> Plataforma Solar de Almeria (PSA) (2004).

<sup>18</sup> <http://www.solare-bruecke.org>, 26.11.08.

<sup>19</sup> <http://www.ecozen.com/scook1.htm>;  
[http://icneer.gadhiasolarenergy.com/cms/index.php?option=com\\_content&task=view&id=146&Itemid=53](http://icneer.gadhiasolarenergy.com/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=146&Itemid=53),  
 18.12.2008.

## Prototypentwicklung Solarkonzentrator

Bei dem entwickelten Prototyp wurde versucht, auf möglichst einfache Weise einen Parabolrinnenkollektor herzustellen, der das benötigte Temperaturniveau von 300 °C erreicht.



Abbildung 12: Bau eines Prototyps (Rinnenkollektor)<sup>20</sup>

Der Versuchsaufbau wurde folgendermaßen realisiert: Der Thermoölspeicher wurde oberhalb des Rinnenkonzentrators montiert. Als Wärmeträgermedium wurde Thermoöl verwendet. Durch die Anordnung der Komponenten konnte der Aufbau ohne Pumpe nach dem Thermosyphon-Prinzip betrieben werden. Die Nachführung des Kollektors erfolgte manuell. Die Temperatur des Thermoöls wurde mittels Temperatursensor gemessen. Obwohl die Tests vielversprechend waren, blieben die gemessenen Temperaturen unter 300 °C.

Die Erfahrungen aus den Versuchen und die Analysen der Studien zeigten, dass in unserem Klimabereich das System für die Erreichung des Temperaturniveaus von mindestens 300 °C optimiert werden muss. Daher werden statt Rinnenkollektoren Paraboloidkonzentratoren eingesetzt. Letztere erreichen Leistungen über 900 W/m<sup>2</sup> und Temperaturen von mehr als 600 °C. Sie sind somit für die gestellten Anforderungen besser geeignet, weil sie einen gewissen Spielraum bieten, etwa bei durchziehender Bewölkung. Für die Verwendung in energieautarken Gebäuden muss je nach Größe, Anzahl der Nutzer und Nutzungsart (Büro, Wohngebäude) eine

---

<sup>20</sup> Atelier Werner Schmidt.

entsprechend große Kollektorfläche vorgesehen werden. Im Kapitel 10.1 finden sich die erforderlichen Durchmesser des Kollektors für das „Wireless House“.

Für die Weiterentwicklung des Prototyps sind folgende Fragen zu beachten:

- Welches Reflektormaterial ist am besten geeignet?
- Welche Spiegelgeometrie soll verwendet werden?
- Welche Nachführung ist geeignet?

### Reflektormaterial

Insbesondere für die Reflektoren lassen sich in internationalen Recherchen eine Reihe geeigneter Materialien finden. Für die Informationsrecherche wurden wissenschaftliche Studien, industrielle Entwicklungen und Erkenntnisse aus der Entwicklungszusammenarbeit (vor allem aus dem Bereich Solares Kochen) herangezogen. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Recherchen zusammengestellt, zusätzlich werden die technischen Lösungen bewertet und daraus die vielversprechendsten Materialien für die Weiterentwicklung ausgewählt.

In Bezug auf das Reflektormaterial für den Bau eines Prototyps wurden folgende Auswahlkriterien definiert:

- kostengünstig
- leicht
- langlebig
- witterungsbeständig
- hoher Reflexionsgrad
- umweltfreundliches Material

Zu den bekanntesten Materialien zählen die Entwicklungen des National Renewable Energy Laboratory (NREL) in den USA. NREL entwickelt und testet Reflexionsmaterialien für den Einsatz in Solarkonzentratoren (= Concentrated Solar Panels, CSP), die einen Reflexionsgrad von mehr als 90 % erreichen und eine Mindestlebensdauer von zehn Jahren aufweisen. Die Kosten pro Quadratmeter liegen bei ca. \$ 15,46 (Dollarkurs von 2006). An einer weiteren Steigerung des Reflexionsgrades auf 95 % und der Verlängerung der Lebensdauer auf bis zu 30 Jahre wird derzeit gearbeitet. NREL führt derzeit Entwicklungen mit drei

verschiedenen Reflektormaterialien durch. Alle drei Entwicklungen – Dick- und Dünnglas-Spiegel, Aluminium (Miro-Sun) und Polymere mit versilberter Reflexionsschicht („ReflecTech“) – sind bereits am Markt erhältlich.

Andere Materialien sind zwar ebenfalls geeignet, aber nicht mehr am Markt erhältlich (3M SA-85, Polyesterfolien mit metallischer Reflexionsschicht), oder sie sind noch im Entwicklungsstadium.

Derzeit laufen Langzeittests von speziell entwickelten und industriell gefertigten Solarreflektoren bezüglich Haltbarkeit und Witterungsstabilität (z. B. bei Niederschlag oder UV-Strahlung). Glas, ReflecTech und Alanod Spiegel weisen laut Herstellerangaben eine Lebensdauer von zehn Jahren auf.

Die untenstehende Tabelle führt alle relevanten Reflexionsmaterialien an und beinhaltet technische und wirtschaftliche Informationen, die als Grundlage für die Auswahl des am besten geeigneten Materials dienen. Dabei schneiden die beiden Produkte „MiroSun“ und „ReflechTech“ am besten ab. „MiroSun“ wird von Alanod (Deutschland) hergestellt und wurde für die Herstellung von Rinnenkollektoren im Rahmen eines Projektes des Solar-Institutes Jülich in Aachen verwendet. Das Produkt „ReflecTech“ wurde in Zusammenarbeit mit NREL entwickelt und bereits für die Herstellung von 685 Spiegelmodulen für ein 100-kW-Solarkraftwerk in China und für die Herstellung neuer Solarkonzentratoren verwendet.

Produkt und Hersteller, Webinfo	Bild	Technische Eigenschaften	Material	Verfügbarkeit am Markt und Kosten
<i>Miro-Sun KKS Alanod</i> <a href="http://tinyurl.com/ys2j2z">http://tinyurl.com/ys2j2z</a>		bis 1.250 mm Breite Dicke: 0,3–0,8 mm	Aluminiumreflektor	verfügbar, ~ € 50 / m <sup>2</sup>
<i>ReflecTech ReflecTech Solar</i> <a href="http://tinyurl.com/2acvfx">http://tinyurl.com/2acvfx</a>		120–150 cm breite Rollen Dicke: 3,8 mm	versilberter Polymerreflektor	verfügbar, ~ \$ 30 / m <sup>2</sup>
<i>Solar-Spiegel Naugatuck Glass</i> <a href="http://tinyurl.com/2t63x2">http://tinyurl.com/2t63x2</a>		je nach Kundenwunsch Dicke: 1 mm und mehr	Dünnglasspiegel mit geringem Eisenanteil	verfügbar, teuer
<i>SA-85 3M</i>		mindestens 9 Jahre Lebensdauer; Dicke: 2 mm	aluminiumbeschichtete Polyester-Folie mit Acrylbeschichtung	nicht verfügbar, Produktion eingestellt
<i>Front-Surface-Spiegel</i>		effizient, haltbar	Silberschicht mit Aluminiumoxid oder Siliziumoxidschutzschicht	nicht verfügbar, noch in Entwicklung, kostengünstig
<i>SolaReflex AA Spiegeloberfläche ClearDome</i> <a href="http://tinyurl.com/2hbrgy">http://tinyurl.com/2hbrgy</a>		bis 60 x 120 cm Dicke: 0,5 mm	beschichtetes eloxiertes Aluminium	verfügbar, sehr teuer
<i>SolaReflex Diffuse Reflexionsfolie ClearDome</i> <a href="http://tinyurl.com/354h58">http://tinyurl.com/354h58</a>		120 cm breite Rolle	Aluminium	verfügbar
<i>Silver-Brite Aluminum Farbe</i> <a href="http://tinyurl.com/27oh5j">http://tinyurl.com/27oh5j</a>		nicht geeignet für Solarkonzentratoren, (siehe <a href="http://tinyurl.com/34wvnd">http://tinyurl.com/34wvnd</a> )	Aluminiumfarbe	verfügbar
<i>Mylar-Folie</i> <a href="http://www.mirrorssheeting.com/">http://www.mirrorssheeting.com/</a>		120 cm breite Rollen Dicke: 1–10 mm	Polyethylenterephthalat-Polyesterfolie	verfügbar, ~ \$ 10 / m <sup>2</sup>
<i>HiFi-Folie</i> <a href="http://www.hififilm.com">http://www.hififilm.com</a>		Dicke: 20–170 mm	PET-Folie mit aufgedampfter Metallschicht	verfügbar, ~ € 2 / m <sup>2</sup>

Tabelle 15: Überblick über Reflektormaterialien für den Bau eines Parabolkonzentrator-Prototypen

### Spiegelgeometrie und Nachführungssystem

Bei Parabolrinnenkollektoren ist eine einachsige, bei Paraboloidkonzentratoren eine zweiachsige Nachführung erforderlich, um dem Sonnenstand folgend den Fokus der reflektierten Solarstrahlung präzise auf dem Receiver zu halten.

Grundsätzlich kommen bei der Verwendung von Paraboloidkonzentratoren zwei unterschiedliche Systeme in Frage:

#### *Fix-Fokus-System:*

Das Fix-Fokus-System könnte für den im Projekt definierten Leistungsbereich mit einem Scheffler-Kollektor realisiert werden. Der Scheffler-Kollektor wurde für die Anwendung in sogenannten Entwicklungsländern entwickelt und wird aus einfachen Komponenten gefertigt.

Bei diesem System wird nur der Kollektor der Sonne nachgeführt, der Receiver verändert seine Position nicht.<sup>21</sup> Verschiedene Anwendungen wurden bereits entwickelt und erfolgreich in der Praxis getestet. Dabei zeigten sich jedoch neben den unbestreitbaren Vorteilen des Fix-Fokus-Systems zwei wesentliche Nachteile, nämlich dass die Fokussierung etwas zu ungenau ist und dass die Anordnung des Receivers zu hohen Konvektions- und Abstrahlungsverlusten führt,<sup>22</sup>. Außerdem ist trotz eines kleinen Brennflecks des Schefflerspiegels aufgrund der übers Jahr veränderten Spiegelform und der damit verbundenen Abweichungen von der idealen Paraboloidform ein recht großer Empfänger nötig. Dieser Umstand erhöht folglich auch die Strahlungsverluste.<sup>23</sup>

---

<sup>21</sup> Eine Bauanleitung für die Nachführung ist im Internet unter <http://www.solare-bruecke.org/Bauanleitungen/indexmanuals.html> zu finden.

<sup>22</sup> Tyroller, M., 2004, Solarsterilisator für Entwicklungsländer, Fachhochschule München, München.

<sup>23</sup> Müller, H. Ch., 1995, Anbindung eines Steinöl-Wärmespeichers an einen Fix-Fokus-Parabolspiegel, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.



Abbildung 13: Fix-Fokus-Scheffler-Kollektoren<sup>24</sup>

- *System mit beweglichem Fokus:*

Bei diesem System ist der Receiver direkt mit dem Parabolkonzentrator verbunden und wird somit gleichzeitig mit dem Spiegel der Sonne nachgeführt. Dieses Prinzip wird vor allem bei den Parabolspiegelkollektoren mit Stirlingmotor im Brennpunkt, sogenannten Dish-Stirling-Anlagen, verwendet.



Abbildung 14: System mit mitbewegtem Receiver, der gleichzeitig den Stirlingmotor beinhaltet<sup>25</sup>

---

<sup>24</sup> [www.charity-india.de/](http://www.charity-india.de/), 29. April 2009.

<sup>25</sup> GrAT; 13th CSP Symposium.

Durch die exaktere und unveränderliche Form des Parabols erfolgt eine bessere Fokussierung des Spiegels und wird eine kleinere Receiveröffnung mit minimierten Verlusten ermöglicht. Ein weiterer Vorteil ist die erhöhte Flexibilität des Systems, da Reflektor und Receiver direkt miteinander verbunden sind und keine zusätzliche Aufstellkonstruktion für den Receiver notwendig ist. Nachteilig ist die Beschattung durch den Receiver und die erforderliche flexible Anschlusslösung.

### **Prototypenentwicklung des Nachführungssystems**

Aus Gründen der Flexibilität (mögliche Änderungen des Aufstellungsortes) und der geringeren Wärmeverluste am Receiver wurde in diesem Projekt das Nachführungsprinzip mit mitbewegtem Receiver gewählt. Als Grundlagen für die Entwicklung der Nachführung dienten folgende Anforderungen:

- einfache Steuerung mittels Zeittaktung
- nur ein Antriebsmotor mit kleiner Leistung
- kostengünstige Materialien und leicht verfügbare Komponenten

Die folgenden Abbildungen zeigen das Funktionsmodell einer zweiachsigen Nachführung mit vertikaler Drehachse und kinematischer Zwangsführung der Spiegelneigung, welches im Wesentlichen aus handelsüblichen Rohren aufgebaut ist.



Abbildung 15: Arbeitsweise des Nachführungssystems über den Tagesverlauf<sup>26</sup>



Abbildung 16: Arbeitsweise des Nachführungssystems über den Tagesverlauf (südseitig)<sup>27</sup>

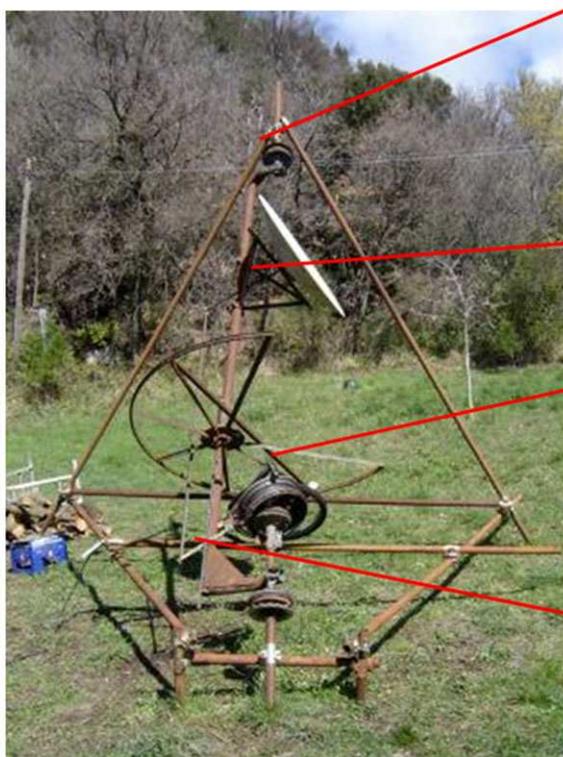
Durch die Zwangsführung muss vom Stellmotor nur die vertikale Rotationsachse angetrieben werden. Der Tagesverlauf der Sonne wird vom Spiegel (im Modell eine Holzplatte, die senkrecht zur Paraboloidachse steht) nachgefahren. Das System funktioniert prinzipiell und ist relativ kostengünstig zu realisieren, es hat aber zwei

<sup>26</sup> Peter Baudenbacher (2008).

<sup>27</sup> Peter Baudenbacher (2008).

Nachteile: Erstens entsprach die erreichte Präzision nicht ganz den Erwartungen, und zweitens ist die jahreszeitliche Neigungskorrektur relativ aufwendig.

Für das zweite Funktionsmodell wurde daher statt der vertikalen Drehachse eine erdachsen-parallele Drehachse gewählt, wodurch die Präzision wesentlich verbessert wird. In der folgenden Abbildung ist der Prototyp zu erkennen, welcher während der Entwicklungsphase und zur Überprüfung der Funktionalität des Systems mit einem kleinen Paraboloidspiegel aus der Nachrichtentechnik bestückt wurde.



Drehachse: parallel zur Erdachse → abhängig von Aufstellungsort → hier exakt für Böheimkirchen eingestellt (Breitengrad:  $48^{\circ}11'52''$ )

Halterung für Parabolspiegel (mit Stoßstange verbunden)

Taumelscheibe: Kompensiert die Schrägstellung der Erdachse und jahreszeitliche Änderung des Sonnenstandes (eine Umdrehung im Jahr)

Stoßstange: fährt die Taumelscheibe ab und kippt den Parabolspiegel. Je nach Jahreszeit wird die Tageslaufbahn verändert.

Abbildung 17: Prototyp der Nachführung für den Parabolkollektor<sup>28</sup>

Bei dieser Prototyp-Entwicklung wurde darauf geachtet, nur handelsübliche und gut verfügbare Materialien und Komponenten zu verwenden. Es kommen Fahrzeuglager aus PKWs und Fahrrädern zum Einsatz. Das Traggerüst ist aus handelsüblichen Gerüststangen konstruiert. Außerdem ist die Steuerung einfach aufgebaut und besteht aus wenigen elektronischen Steuerelementen (zwei Zeitschaltuhren und mehreren Schaltrelais). Im Folgenden ist eine schematische Darstellung des von

<sup>28</sup> GrAT (2008). Peter Baudenbacher (2009)





Abbildung 19: Steuerung der Nachführeinheit<sup>30</sup>

Die Funktionalität des Nachführungssystems wurde bei den durchgeführten Tests überprüft. Sowohl das Nachführungssystem selbst als auch die Steuerung sind einfach aufgebaut und relativ kostengünstig zu realisieren.

### 9.1.2. Biomasse-Backup-System

Die dynamischen Entwicklungen von Öfen im Klein- und Kleinstleistungsbereich resultieren derzeit in vielen neuen Produkten am Markt. Mit dem stetig sinkenden Heizwärmebedarf in Neubauten bildet sich ein neues Marktsegment im Bereich unter 10 kW Heizleistung. Diese Entwicklungen zielen vorwiegend auf die Bereitstellung von Raumwärme ab. Zur Steigerung des Nutzerkomforts sind Biomassespeicheröfen am Markt verfügbar, die ihre Wärme entweder an einen Wärmeträger (Wasser/Luft) übertragen oder speichern und kontrolliert abgeben, um die Überhitzung eines gut gedämmten Gebäudes zu vermeiden.

Für das geplante System wird jedoch eine Wärmeabführung über einen Wärmeträger gefordert, der ein Temperaturniveau von 300 °C erreichen soll. Die Funktionen des Backup-Systems sind weniger die Wärmebereitstellung für Heizzwecke und Warmwasser, sondern vielmehr die Ladung des Mitteltemperaturspeichers, damit der

---

<sup>30</sup> Peter Baudenbacher (2008).

Betrieb der thermischen Verbraucher und des Stirlingmotors auch in Zeiten ungenügender solarer Einstrahlung durchgehend möglich ist.

In Tabelle 14 werden mögliche Biomasseöfen in Bezug auf ihre Eignung für das Konzept des Energieautarken Hauses bewertet.<sup>31</sup>

Kategorie/Modell	Kachelofen inkl. Warmwasser	SimplyFire
Bewertung	Temperatur zu niedrig	geeignet*

*\* Systeme unterlaufen einer genaueren Untersuchung*

Tabelle 16: Biomasseöfen

Im Folgenden wird der Aufbau eines derartigen Prototyps dokumentiert und die technische Lösung des Wärmetauschers (Material, Form, Berechnung) dargestellt sowie die Effizienz des Ofens bewertet.

### **Prototypenentwicklung Biomasseofen**

Aufbauend auf dem entwickelten Passivhauspeicherofen für das S-HOUSE mit einer Heizleistung von 5 kW wurden entsprechend dem Systemlayout für das „Wireless House“ die Komponenten für den Biomasse-Ofen konzipiert.

---

<sup>31</sup> Siehe auch Tabelle 3.



Abbildung 20: Brennkammer mit Türöffnung



Abbildung 21: Bodenplatte



Abbildung 23: Brennkammer, Ansicht von unten



Abbildung 22: Einbau der Züge (Rauchgasführung)



Abbildung 24: Einbau des Abzugrohres

Der Ofen ist modular aufgebaut und wird mit einem zusätzlichen Thermoöl-Wärmetauschermodul versehen, wie im folgenden Schema dargestellt ist. Die Wärmeabfuhr des Ofens erfolgt mit einem Wärmetauscher, der in einer trockenen Schüttung eingebettet ist und vom Wärmeträgermittel Thermoöl durchflossen wird.

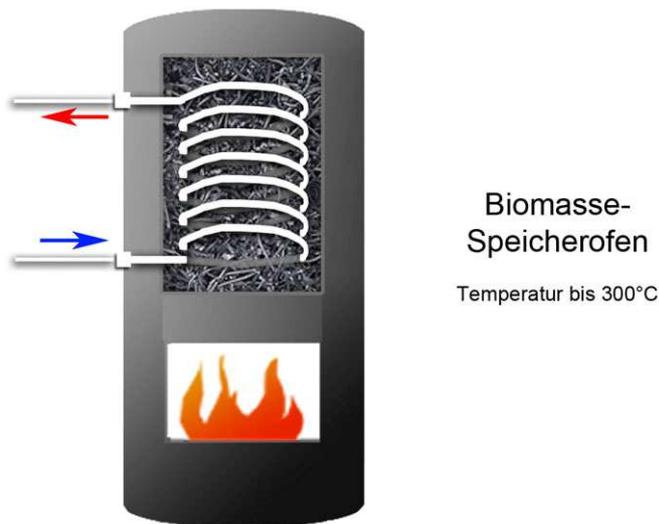


Abbildung 25: Systemdetail Wärmeträger/Wärmetauscher: Biomasse-Backup-System<sup>32</sup>

Der Einbau des Wärmetauschers erfolgt über der Brennkammer in Form einer Metallrohrspirale. Die Anforderungen an dieses Rohr sind:

- hohe Wärmeübertragung
- Temperaturbeständigkeit über 300 °C
- lange Lebensdauer, Korrosionsbeständigkeit
- einfacher Einbau

Die Recherchen haben ergeben, dass diese Anforderungen von marktüblichen Spiralrohren erfüllt werden können. Diese Rohre eignen sich für den geforderten Temperaturbereich, sind gut formbar und können so relativ einfach an den erforderlichen Durchmesser angepasst werden.

---

<sup>32</sup> GrAT (2008).



## Spiraflex (R)

Flexibles, einwandiges, spiralgewelltes Rohrsystem

Betriebsdruck: PN 6 / PN 10

Dimensionen: DN 15-40

Mediumrohr: Edelstahl

Hoher thermischer Wirkungsgrad, leicht verformbar

Einsatzgebiet:

Wärme-Kältetauscher für Warmwasserbehälter,  
Geothermie, Abwasserwärme

Abbildung 26: Beschreibung Spiralrohr<sup>33</sup>

Der Wärmetauscher wurde für die Ofenabmessungen dimensioniert und berechnet. Für die gesamte erforderliche Wärmetauscherfläche von 4 m<sup>2</sup> wird ein Spiralrohr mit einer Länge von 35 m und einem Innendurchmesser von 22 mm benötigt. Durch die gerippte Oberfläche des Rohres wird ein guter Wärmeübergang erreicht. Mit einer Brennstofffüllung von vier Holzbriketts zu je 2 kg können bei einem Wirkungsgrad von 85 % für die Verbrennung und 50 % für den Wärmetauscher insgesamt 17 kWh Wärmeenergie an den Wärmeträger Thermoöl abgegeben werden. Die restliche Wärmemenge steht für die Raumheizung zur Verfügung.

---

<sup>33</sup> Brugg Rohrsystem AG, [www.pipesystems.com](http://www.pipesystems.com).



Abbildung 27: Spiralrohr des Wärmetauschers

Das Füllmaterial des Wärmetauschers muss folgende Anforderungen erfüllen:

- temperaturbeständig
- möglichst rasche Übertragung der Verbrennungstemperaturen an das Wärmetauscherrohr
- Ausgleichswirkung hinsichtlich der Temperatur über einen bestimmten Zeitraum
- Verhinderung zu hoher Temperaturen des Wärmeträgermediums Thermoöl

Die Wärmeübertragung an der Außenseite des Spiralrohrs wird durch eine Schüttung aus mineralischen und metallischen Komponenten realisiert,<sup>34</sup> wobei den mineralischen Anteilen die Funktion der Wärmespeicherung und den metallischen die der schnelleren Wärmeleitung zukommt. Durch eine entsprechende Mischung können das Abbrandverhalten, die Temperaturverläufe und der Wärmeübergang eingestellt werden. Als mögliche Metalle werden Aluminium oder Eisenspäne in Betracht gezogen. Deren technische Daten sind in der untenstehenden Tabelle ersichtlich.

---

<sup>34</sup>Wimmer (2001) Patent A407438.

Eigenschaften	Einheit	Aluminium	Eisen	Verhältnis
Atomgewicht	[g/Mol]	26,98	55,84	1 : 2
Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,7	7,87	1 : 3
Ausdehnungskoeffizient	[1/K]	24 x 10 <sup>-6</sup>	12 x 10 <sup>-6</sup>	2 : 1
Spezifische Wärme	[J/kg.K]	ca. 890	ca. 460	2 : 1
Schmelzwärme	[J/g]	ca. 390	ca. 272	1,5 : 1
Schmelztemperatur	[°C]	660	1536	1 : 2,5
Wärmeleitfähigkeit	[W/m.K]	235	75	3 : 1
Elektrische Leitfähigkeit	[m/Ω.mm <sup>2</sup> ]	38	ca. 10	4 : 1

Tabelle 17: Vergleich der Metalle Aluminium und Eisen als mögliche Füllmaterialien für den Wärmetauscher<sup>35</sup>

Die Vorteile von Aluminium liegen in der besseren Wärmeleitung und der geringeren Masse. Die Temperatur des Thermoöls kann über die Durchflussgeschwindigkeit, die Wärmetauscherbefüllung und den Befüllungsgrad der Brennkammer mit Brennstoff gesteuert werden.

Im Vergleich zu den in der Literatur angegebenen Abgastemperaturen für handbeschickte Holzfeuerung lagen diese bei durchgeführten Messungen nur geringfügig über dem Mindestwert von 130 °C. Dies zeigt die hohe Effizienz des Ofens. Noch tiefere Abgastemperaturen bergen die Gefahr der Rauchgaskondensation. Um den Wirkungsgrad des Ofens bzw. des Backup-Systems exakt bestimmen zu können, bedarf es detaillierter Überprüfungen an einem Ofenprüfstand.

## 9.2 Speichersysteme

Für die Speicherung der Wärmeenergie kommen Mitteltemperatur- und Niedertemperaturspeicher zum Einsatz. Darüber hinaus werden im Folgenden die Möglichkeiten der Speicherung von Kälte sowie alternative Speicherkonzepte wie Druckluft und kinetische Speicher analysiert.

---

<sup>35</sup> GrAT, eigene Darstellung nach [www.migweld.de](http://www.migweld.de).

### 9.2.1. Mitteltemperaturspeicher

Die Zwischenspeicherung der produzierten thermischen Energie stellt einen zentralen Aspekt im System „Wireless House“ dar. Diese Energie soll möglichst verlustarm gespeichert werden und jederzeit zur Verfügung stehen. Außerdem sind Kriterien wie Steuerung und Regelung, Materialwahl, Wartungs- und Reparaturanfälligkeit, Lebensdauer und Entsorgung sowie Investitionskosten der Speichersysteme zu berücksichtigen. In der folgenden Tabelle finden sich die entsprechenden Bewertungen der möglichen Systeme.

Kategorie/Modell	Wärmeträger als Speicher	feste Speicher (Beton/ Gießkeramik etc.)	PCMs (div. Salze)	thermo-chemischer Speicher
Bewertung	geeignet*	geeignet	bedingt geeignet, da Schmelztemperatur genau auf Temperaturniveau abgestimmt sein muss	geeignet*

\* Systeme unterlaufen einer genaueren Untersuchung

Tabelle 18: Mitteltemperatur-Speichersysteme

### Stein-Öl-Speicher

Aus den möglichen Systemen wurde eine Kombination aus flüssigen und festen Wärmespeichern ausgewählt. Die Vorteile von Thermoöl, das sowohl als Wärmeträgermedium als auch als Wärmespeicher einsetzbar ist, keine korrosiven Eigenschaften aufweist und bis 350 °C druckfrei arbeitet, sowie die einfache Verfügbarkeit und die geringen Kosten eines Kiesspeichers (fester Wärmespeicher) waren für die Auswahl dieses Systems ausschlaggebend. Außerdem erfordert es keine aufwendige Infrastruktur. Thermoöl ist in der Industrie bereits seit langem in Verwendung, daher sind auch viele der erforderlichen Komponenten bereits verfügbar.

Für die Durchführung erster Versuche wurde ein reiner Thermoölspeicher-Prototyp gebaut und mit einem Rinnenkollektor beheizt.

Als flüssiges Wärmeträger- und Speichermedium besitzt Thermoöl im Vergleich zu Dampf entscheidende Vorteile, die im Folgenden aufgelistet sind:

- kein Hochdruckdampf mit heißer Kondensatwirtschaft
- keine Wasseraufbereitung
- kein Chemikalienverbrauch
- kein Absalzen und Abschlämmen
- keine Abnahmekosten, Revisionen; unterhalts- und wartungsfrei
- einfachere Platzierung und Installation
- 30 % bis 40 % weniger Investitionskosten
- Knopfdruck-Inbetriebnahme auch nach längeren Unterbrechungen, weil Kesselanlage, Verrohrung und Maschinen mit dem Thermoöl gefüllt bleiben, was die gesamte Anlage schützt, darum geringe Unterhaltskosten
- längere Lebensdauer, da keine inneren Korrosionen
- Gewinn an Betriebssicherheit

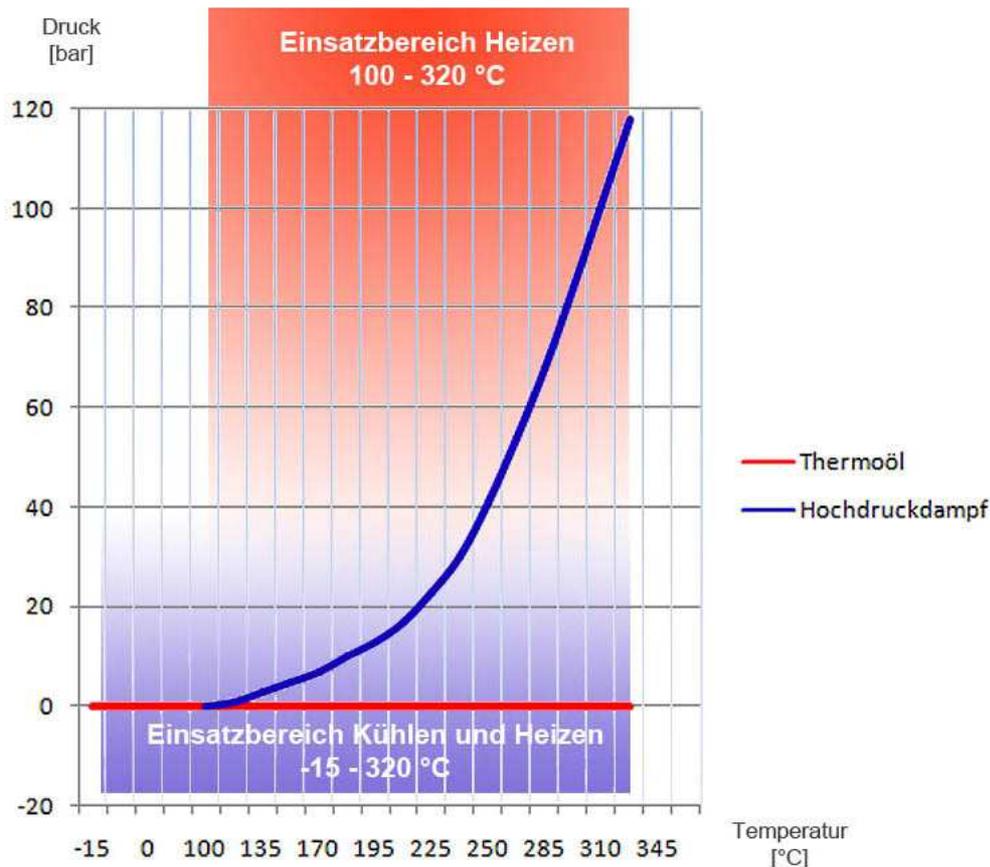


Abbildung 28: Temperatur-Druck-Zusammenhang von Wasser im Vergleich zu Thermoöl<sup>36</sup>

Neben diesen Vorteilen von Thermoöl sind aber beim Umgang mit dem Medium entsprechende Sicherheitsrichtlinien und Regeln zu beachten, die in der DIN 4754 ersichtlich sind. Die DIN 4754 enthält die Vorgaben für die Ausführung von Wärmeträgeranlagen mit Thermoölen als Wärmeträgermedium und besagt unter anderem:

„Die Errichtung von Wärmeübertragungsanlagen mit anderen flüssigen Wärmeträgern als Wasser setzt besondere Erfahrungen voraus. Die Anlagen können nur von Firmen ausgeführt werden, die über entsprechende Kenntnisse verfügen. Außerdem ist darauf zu achten, dass Wärmeverbraucher, die mittels Wärmeträger erhitzt werden (z. B. Gegenstromapparate, Verdampfer, Lufterhitzer), so ausgeführt sein müssen (z. B. mittels eingeschweißter Rohre in Rohrplatten), dass weder Wärmeträger in das Produkt, noch umgekehrt das Produkt in den Wärmeträger

<sup>36</sup> GrAT (2008).

eintreten kann. Werden Produkte aufgeheizt, die korrodierend auf die Heizflächen wirken, so sind Korrosionsmaßnahmen zu treffen.“ (DIN 4754)

Im Besonderen ist bei der Planung von Anlagen mit Thermoöl Folgendes zu beachten (Quelle: Technisches Merkblatt von Wärmeträgeranlagen, Regiomat AG):

- Keine Gewindeverbindungen, Buntmetalle oder porösen Guss verwenden.
- Flanschverbindungen nach DIN 2633 mind. Nenndruck PN 16, mit Dehnschrauben 5.6 und metallverstärkten Graphitdichtungen.
- Die Rohrleitungsteile sind möglichst durch einwandfreies Schweißen zu verbinden.
- Ventile mind. PN 16, Stahl oder Sphäroguss, mit Faltenbalgabdichtung und Sicherheitsstopfbuchse.
- Den größeren Dehnungen im ganzen System Rechnung tragen, dabei auf die Entlastungen von Pumpen und anderen Apparaten achten.
- Druckprobe der ganzen Anlage inkl. Verbraucher mittels Druckluft 1,5 bis 2 bar (kein Wasser), sorgfältig sämtliche Verbindungen mit Lecksuchspray oder Seifenlösung auf Undichtigkeiten absuchen; Anlage auf Wasser absuchen und entfernen.
- Für den Maschinenhersteller gilt die gleiche Sorgfaltspflicht.
- Auslegung der Wärmeverbraucher mit einem Druckabfall von ca. 3 bis 5 m FLS bei einer Temperaturdifferenz von normalerweise 30 K. Es ist auf genügende Durchflussgeschwindigkeit zu achten. Auf Doppelmäntel ist zu verzichten oder es sind Vorkehrungen zu treffen.
- Dem eingesetzten Mineralöl, synthetischen Wärmeträger und den Anforderungen ist bei der Auslegung Rechnung zu tragen.

### **MT-Speicher-Prototyp**

Erste Versuche wurden mit einem kleinen Thermoölspeicher durchgeführt, wobei das Thermoöl mit Solarenergie durch einen Rinnenkollektor (siehe Abbildung 29) aufgeheizt und mittels Thermosyphon-Prinzips umgewälzt wurde.

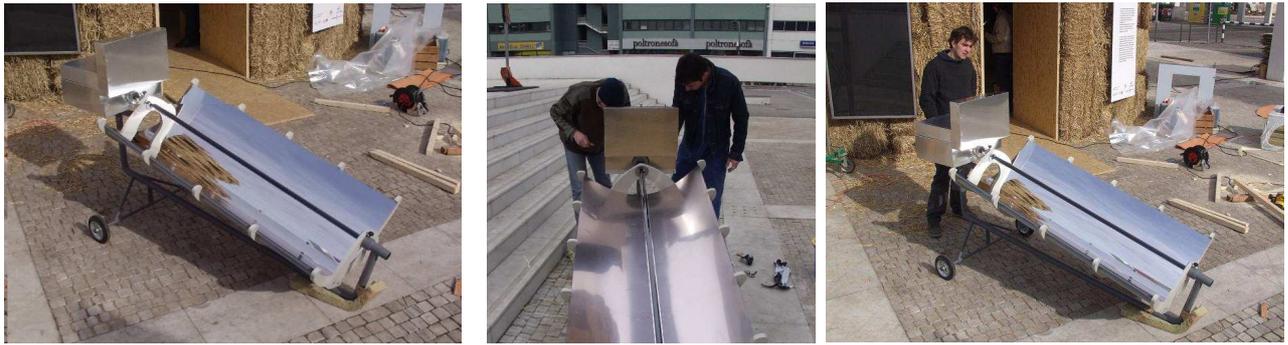


Abbildung 29: Versuchsaufbau des Rinnenkollektors

Die Versuchsdurchführung beschränkte sich auf die technische Machbarkeit eines Solargrillers mit Thermoölbetrieb. Die Solarstrahlung konnte mit dem Rinnenkollektor so genutzt werden, dass das Thermoöl im Speicher auf mehr als 200 °C aufgeheizt werden konnte. Der Speicher wurde so konstruiert, dass er bis auf die obere Seite gut wärmeisoliert wurde und so die thermische Energie nach oben abgeben konnte.

### **Speicherladestrategien**

Grundsätzlich kann bei Speichersystemen zwischen saisonalem und kurzzeitigem Speicher unterschieden werden. Je nach Nutzung und Ausführung des Speichers können die zu überbrückenden Zeitintervalle variieren. Grundlegendster Unterschied ist die Größe des Speichers.

Eigenschaften Langzeitwärmespeicher (saisonaler Speicher):

- Kann aufgrund des hohen Volumens lange Schlechtwetter-Zeiten überbrücken;
- aufgrund großer Abmessungen erhöhte Wärmeverluste;
- hoher Platzbedarf;
- träges Ansprechverhalten.

Saisonalspeicher finden derzeit nur im Niedertemperaturbereich Verwendung.

Eigenschaften kurzzeitiger Speicher:

- Kann lange Schlechtwetterzeiten nicht überbrücken → Backup-System notwendig;
- geringe Abmessung → geringe Wärmeverluste;

- aufgrund der Abmessungen flexibel einsetzbar;
- schnelle Reaktionszeiten.

Im gegenständlichen Projekt soll die Wärmespeicherung kurzzeitig bis zu einer Woche lang möglich sein (siehe auch Kapitel 10.1). Die Beladung des Speichers im „Wireless House“ erfolgt, wie in der untenstehenden Abbildung dargestellt, entweder mit Solarenergie über den Solarkonzentrator oder mittels Biomasse über den Ofen, der als Backup-System fungiert. Die Entladung erfolgt über einen Wärmetauscher im oberen Drittel des Speichers.

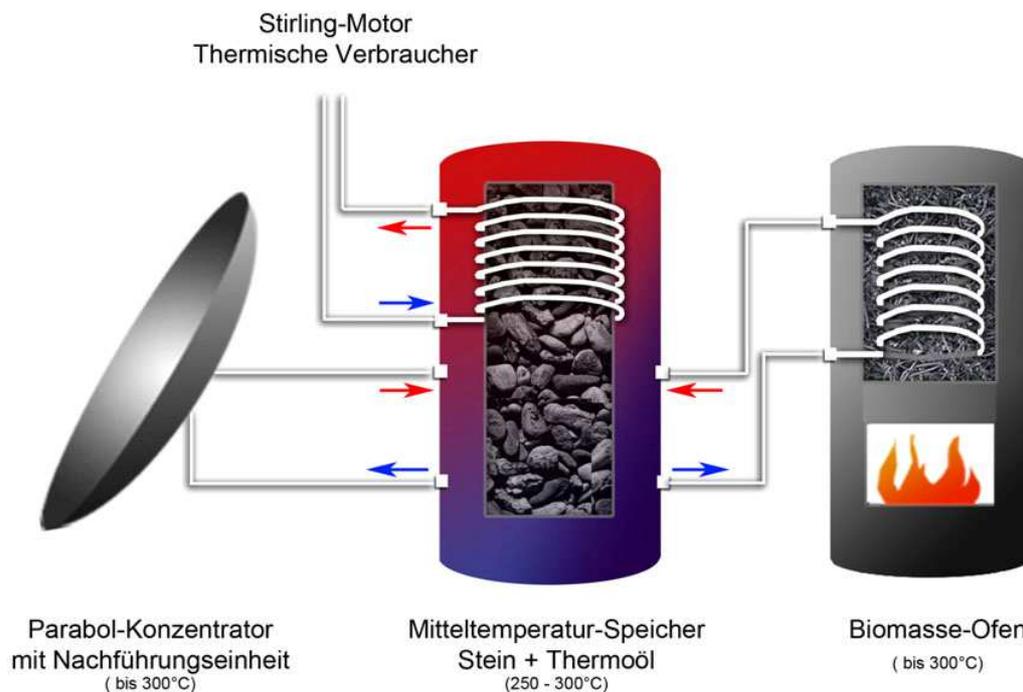


Abbildung 30: Systemdetail Wärmeträger/Wärmetauscher: Kombination von Mitteltemperaturspeicher mit Solarkonzentrator und Biomasse-Backup-System<sup>37</sup>

Der Speicher wird somit unabhängig von der verfügbaren Energieform (Solarenergie oder Biomasse) immer auf einem Temperaturniveau von 300 °C gehalten. Das jahreszeitlich unterschiedliche Angebot an Solarstrahlung und der daraus resultierende Anteil an zusätzlich notwendiger Biomasse sind in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

<sup>37</sup> GrAT (2008).

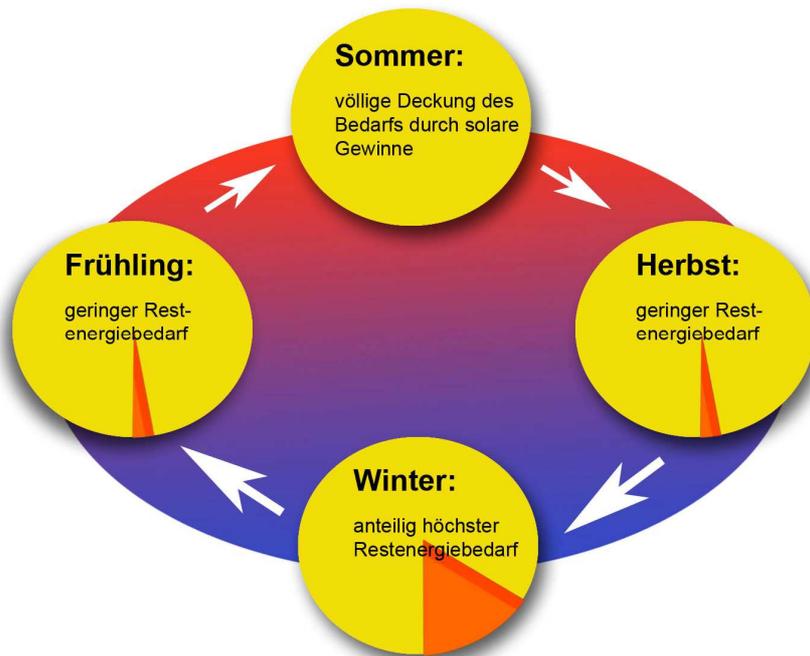


Abbildung 31: Jahreszeitliche Anteile von Solarenergie und Biomasse für die Ladung des Mitteltemperaturspeichers

Die Graphik zeigt, dass ein Großteil der erforderlichen Energie solar abgedeckt werden kann, was auch ein zentrales Kriterium für die Strategieentwicklung im Gesamten und für die Wärmespeicherung im Speziellen darstellt. Der Speicher muss Wärmeenergie über das gesamte Jahr für die Kühlung (Kühlschrank, Gefrierschrank), das Kochen (Herd, Backrohr) und die Erzeugung von elektrischer Energie (Stirlingmotor-Generator) liefern. Die benötigte Energiemenge schwankt gering zwischen Winter- und Sommersaison und liegt zwischen 20 und 30 kWh pro Tag (siehe Kapitel 10.1).

Für das Be- und Entladen des Speichers müssen neben den Verbräuchen auch die Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung berücksichtigt werden, die bei einem Temperaturniveau von 300 °C wesentlich höher sind als bei herkömmlichen Pufferspeichern. Untersuchungen zeigen, dass Wärmespeicher mit Isolierung (10 cm Steinwolle) höhere Temperaturen nicht über mehrere Tage speichern können. In weniger als sieben Stunden kühlt ein solcher Speicher von 300 °C auf 250 °C ab (Tyroller, 2004). Daraus folgt, dass für die Entwicklung von Speicherladestrategien zuerst die Frage beantwortet werden muss, wie die Wärmeverluste minimiert werden können, da dieser Faktor einen wesentlichen Einfluss auf die weiteren

Entwicklungsarbeiten und in Folge auf die Planung und Dimensionierung einer zukünftigen Demonstrationsanlage hat.

Zur Abschätzung der Wärmeverluste im Speicher respektive über die Speicherflächen wurden anhand der folgenden Formel Berechnungen für einen zylindrischen Speicher mit unterschiedlichen Dämmmaterialien und -stärken durchgeführt.

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l \cdot \Delta T / \ln(r_A / r_I)$$

Q ist der Wärmeverlust in W,  $\lambda$  ist die Wärmeleitfähigkeit des eingesetzten Dämmstoffes, l ist die Länge (Höhe) des Speichers,  $\Delta T$  ist die Temperaturdifferenz zwischen Speicher- und Umgebungstemperatur,  $r_A$  und  $r_I$  sind Innen- und Außendurchmesser der Dämmschicht. Länge und Innenradius werde mit 1 festgelegt. Damit ergibt sich ein Speichervolumen von etwas mehr als 3 m<sup>3</sup>.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verluste bei herkömmlicher Dämmung bis zu 50 % des Verbrauchs betragen. Erhöhte Dämmstärken können die Verluste hingegen stark reduzieren. Bei einer Steigerung der Dämmstärke von den üblichen 10 cm auf 50 cm kann der Verlust um den Faktor 4 reduziert werden. Voraussetzung ist der Einsatz von temperatur- und hitzebeständigen Materialien, wie Perlite oder Steinwolle. Aber auch eine Kombination verschiedener Dämmstoffe ist möglich. Vakuumdämmplatten weisen eine zehnmal höhere Dämmwirkung ( $\lambda = 0,004 \text{ W/mK}$ ) auf. Sie können aufgrund ihrer derzeitigen geringeren Temperaturbeständigkeit (< 100 °C) in der äußersten Dämmschicht eingesetzt werden. Mit 10 cm Vakuumdämmplatte zusätzlich zu 40 cm Steinwolldämmung erzielt man eine Reduktion des Wärmeverlustes im Vergleich zu herkömmlicher Dämmung um den Faktor 10. Der Zusammenhang von Wärmeverlusten und Temperaturabfall des Speichers wurde basierend auf durchgeführten Messungen (Tyroller, 2004) berechnet. Die Veränderung der Speichertemperatur ist in der untenstehenden Abbildung dargestellt.

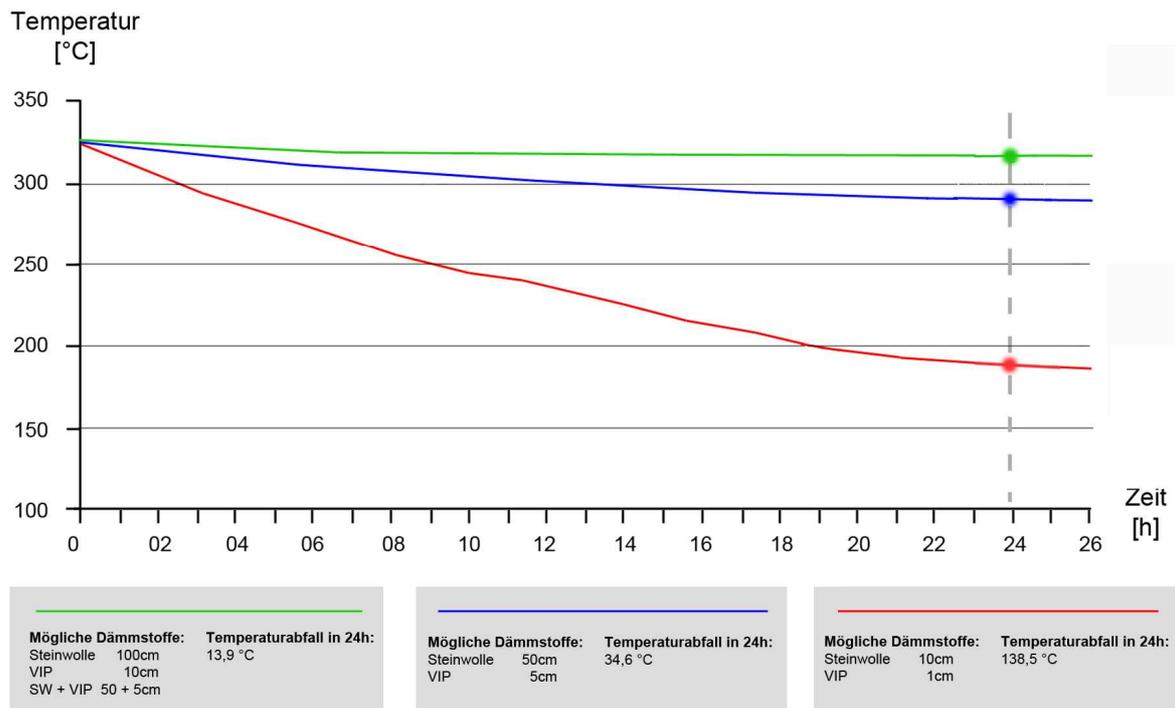


Abbildung 32: Abkühlverhalten von Speichern mit unterschiedlichen Isolierungsvarianten<sup>38</sup>

Die rote Kurve in der Abbildung bezieht sich auf einen mit 10 cm Steinwolle gedämmten Wärmespeicher. Dieser verliert 138,5 °C über einen Tag bzw. fast 100 °C über Nacht. Mit einer verbesserten Dämmung, bestehend aus 50 cm Steinwolle, kann der Temperaturabfall bereits stark verringert werden und beläuft sich nur mehr auf knappe 35 °C über 24 Stunden. Die grüne Kurve zeigt den Temperaturabfall bei einem Meter Dämmstärke. Für jede Dämmvariante (10 cm, 50 cm, 100 cm) wurde auch die vergleichbare Dämmstärke in Vakuumdämmplatten angegeben. Der Einsatz dieses Dämmmaterials ist aber derzeit nur bis 100 °C möglich. Daraus ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Vakuumdämmplatten als zusätzliche Dämmschicht nur im Außenbereich (Temperatur < 100 °C) verwenden.
- Weiterentwicklung der Vakuumdämmplatten für das erforderliche Temperaturniveau von 300 °C.

Mit einer optimierten Dämmung können die Verluste minimiert werden, und die solare Beladung des Mitteltemperaturspeichers tagsüber kann ohne Entladung bei

<sup>38</sup> Eigene Darstellung nach Tyroller 2004.

vertretbaren Wärmeverlusten mehrere Tage gehalten werden. Die Entladung des Speichers erfolgt kontinuierlich und liefert die Energie für die thermischen Verbraucher im Mitteltemperaturbereich – Stirlingmotor und Kühlgeräte (Herd und Backrohr). Je nach Dimensionierung kann das Beladungsintervall verlängert werden. Im Kapitel 10.1, „Berechnungen und Dimensionierung“ sind die unterschiedlichen ermittelten Intervalle und die jeweiligen Speicherdimensionen dargestellt.

Um das Verhalten des Speichers genau bestimmen zu können, müssen verschiedene offene Fragen, wie zum Beispiel unerwünschte Mischungsvorgänge bei der Beladung<sup>39</sup> oder Aufladeverhalten bei unterschiedlicher solarer Einstrahlung, im Rahmen von weiterführenden Forschungen geklärt werden. Entwicklung, Bau und Überprüfung eines Gesamtprototyps sind dazu notwendig.

### 9.2.2. Niedertemperaturspeicher

Die Speicherung von Wärmeenergie auf niedrigem Temperaturniveau soll mittels bereits vielseitig erprobter und optimierter Systeme realisiert werden. In Tabelle 19 werden verschiedene Technologien bewertet.<sup>40</sup>

Kategorie/Modell	Warmwasser-Schichtenspeicher	Schüttgutspeicher	PCM-Speicher	thermochemischer Speicher
Bewertung	geeignet	geeignet	bedingt geeignet	geeignet

\* Systeme unterlaufen einer genaueren Untersuchung

Tabelle 19: Niedertemperatur-Wärmespeicher

Zu den angeführten Systemen ist anzumerken, dass grundsätzlich alle einsetzbar wären. Für die Auswahl spielen eher Kriterien wie Preis, Umweltverträglichkeit und Zuverlässigkeit eine Rolle. Aufgrund der ausgereiften Technik der Wasserspeicher, ihrer Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit wird im Projekt auf diese Lösung für die

<sup>39</sup>Durch das angestrebte Temperaturniveau von 300 °C im Speicher ist davon auszugehen, dass es innerhalb des Speichers zu einer ungenügenden Schichtung kommt. Aktuelle Forschungsarbeiten haben diese Effekte in Wasserspeichern untersucht und aufgrund einer optimierten Gestaltung der Auslassgeometrie eine Reduktion von Ansaug- und Mischeffekten erzielt. Jedoch müssen diese Phänomene für den Thermoöl-Stein-Speicher speziell im Rahmen einer eigenen Grundlagenstudie ermittelt werden (Lohse [2008]).

<sup>40</sup>Siehe auch Tabelle 5.

Speicherung von Niedertemperatur zurückgegriffen, vor allem auch deshalb, weil sich Speicher mit Wasser ohne großen Aufwand in das Gesamtsystem integrieren lassen. Da diese Komponenten (Wasserpufferspeicher) und ihre Funktionsweise hinreichend bekannt sind, wird auf diese Systeme nicht mehr genauer eingegangen.

### 9.2.3. Kältekollektor und Kältespeicher

#### Historischer Hintergrund

Historisch gesehen, war die Nutzung von Eis als Kältespeicher bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts eine Notwendigkeit für die damaligen Wirtschaftszweige, die über das gesamte Jahr Bedarf an kühlen Lagerräumen hatten. Vor allem betraf dies die Verarbeitung und Lagerung von Lebensmitteln. Brauereien, Gasthäuser und Fleischhauer waren die Hauptabnehmer von Eis, das im Winter aus umliegenden Teichen herausgeschnitten und in speziell errichteten Eishäusern, in Eiskellern oder auch in eigens für diesen Zweck gegrabenen Höhlen gelagert wurde.

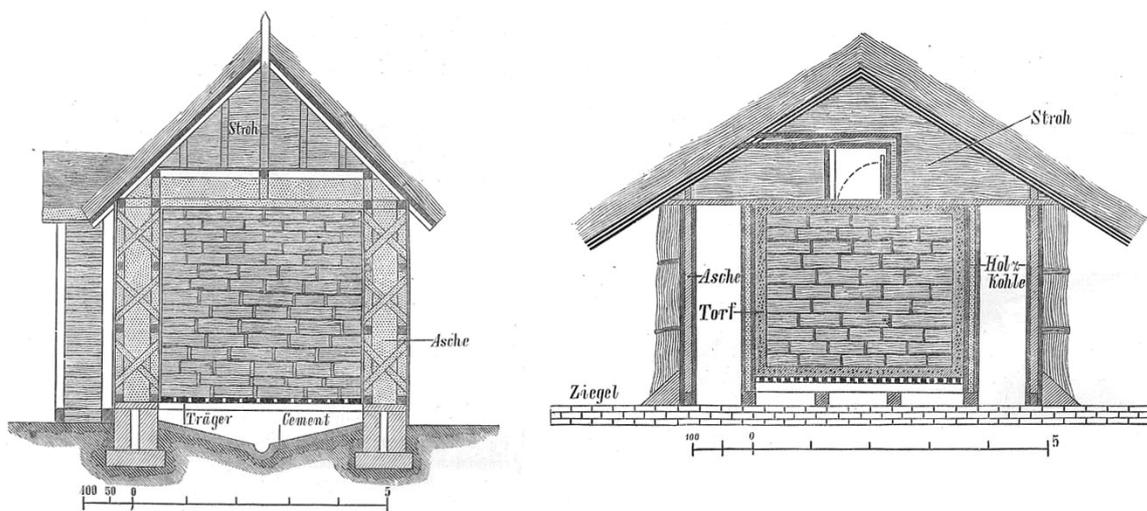


Abbildung 33: Eishaus<sup>41</sup>

Eis weist eine hohe Speicherkapazität auf und kann, entsprechend gelagert, bis weit in den Sommer hinein Kälte speichern. Erst mit der Erfindung der Kältemaschine durch Karl von Linde ging die Nutzung von Eis als Kältespeicher zurück.

<sup>41</sup> Schakteburg (1901).

## Moderne Systeme

Heute sind elektrisch betriebene Kältemaschinen und vor allem Klimaanlage die größten Energieverbraucher während der warmen Jahreszeit. Alternativen zur elektrischen Kühlung sind daher dringend notwendig, um den Verbrauch an elektrischer Energie in Gebäuden zu reduzieren. Mögliche technologische Lösungen werden in der folgenden Tabelle in Bezug auf ihre Einsatzmöglichkeit bewertet.<sup>42</sup>

Kategorie/Modell	Herkömmlicher Heizkörper <i>Kältekollektor</i>	Wassereis (als PCM) <i>Kältespeicher</i>	Paraffine (als PCM: -30°C bis +50°C) <i>Kältespeicher</i>
Bewertung	geeignet*	geeignet*	bedingt geeignet aufgrund hoher Kosten

\* Systeme unterlaufen einer genaueren Untersuchung

Tabelle 20: Kältekollektoren und -speicher

Mit einer neuen Methode lässt sich Eis genau dort erzeugen, wo die Kälte benötigt wird, nämlich im Gebäude. Mit der Verwendung einfacher Kollektoren, die an einer exponierten Stelle im oberen Bereich des Gebäudes angebracht werden (z. B. Dach, Dachterrasse), wird das Kälteübertragungsmedium bei Temperaturen unter 0 °C abgekühlt, und der Kreislauf wird aktiv. Das kalte Medium sinkt bis zur tiefsten Stelle des Kreislaufes ab und gibt dort die Kälte an den Speicher ab. Sobald die Außentemperatur über der Temperatur des Kältespeichers liegt, stoppt der Kreislauf. Der Kältespeicher und die Leitungen müssen optimal wärmeisoliert sein, um Kondensation zu verhindern. Im Folgenden ein Schema des Systems.

---

<sup>42</sup> Siehe auch Tabelle 6.

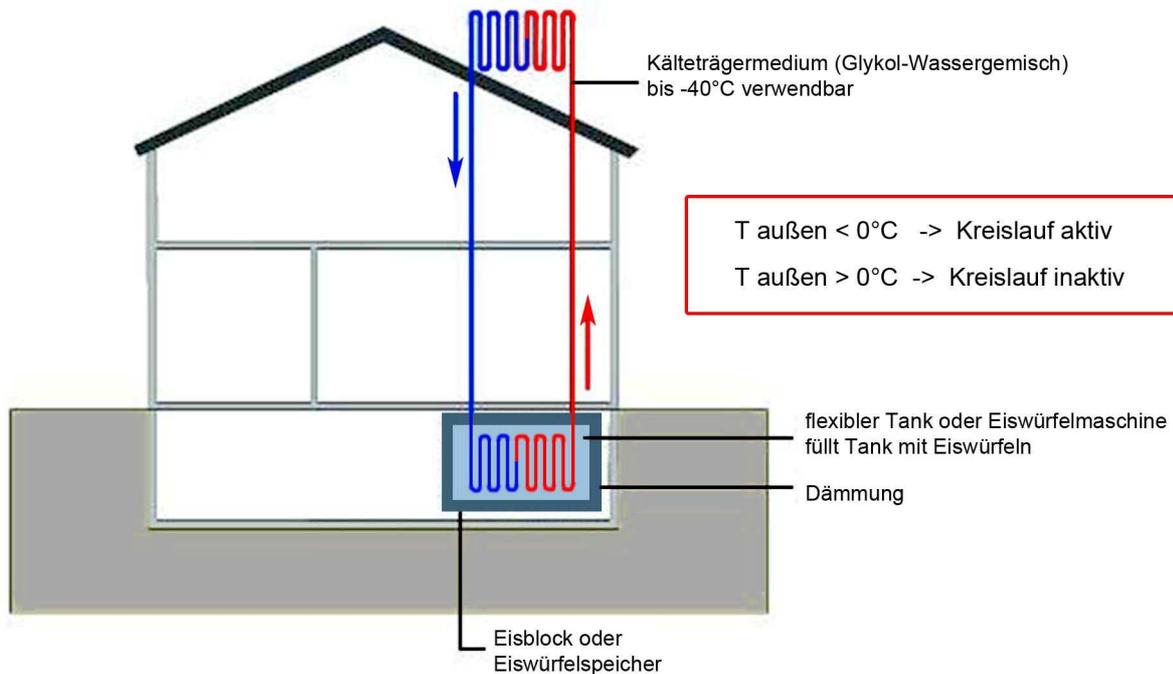


Abbildung 34: Funktionsskizze des Kältekollektors und Kältespeichers<sup>43</sup>

Die Ausdehnung des Eises um 10 % und die damit verbundenen Spannungen stellen noch ein Problem dar. Dieses kann entweder durch die Auswahl eines flexiblen Materials, welches die Volumenausdehnung von Wasser bzw. Eis mitmacht, oder durch die Speicherung von Eiswürfeln gelöst werden.

Die gespeicherte Kälte kann dann zur Reduktion des Energieverbrauchs von Kühlgeräten, aber auch zur Klimatisierung genutzt und z. B. über die Lüftung verteilt werden. Der Bedarf an Kühlenergie (siehe Kapitel 10.1) kann je nach Gebäudegröße bzw. Nutzungsart und geographischer Lage sehr stark variieren. Geht man von einem Kühlenergiebedarf für die Lagerung von Lebensmittel und Getränken für einen durchschnittlichen Haushalt aus, so kann mit einem Eisvolumen von ca. 4 m<sup>3</sup> das Auslangen über ein Jahr gefunden werden. Der Einsatz von Klimaanlage verlangt ein Vielfaches an Kühlleistung und würde damit auch wesentlich mehr Eisspeichervolumen erfordern. Dafür ist eine saisonale Eisspeicherung nicht sinnvoll. Hingegen werden beim Anfall großer Kühllasten bereits Eisspeicher eingesetzt, die über Nacht aufgefüllt werden und die Lastspitzen für die Klimaanlage tagsüber reduzieren (Calmac). Bis jetzt erfolgt allerdings die Eisproduktion noch mittels

<sup>43</sup> GrAT (2008).

Nachtstrom, was für das Konzept des Energieautarken Gebäudes nicht zielführend ist. Stattdessen ist die Versorgung mit Solarenergie vorgesehen.

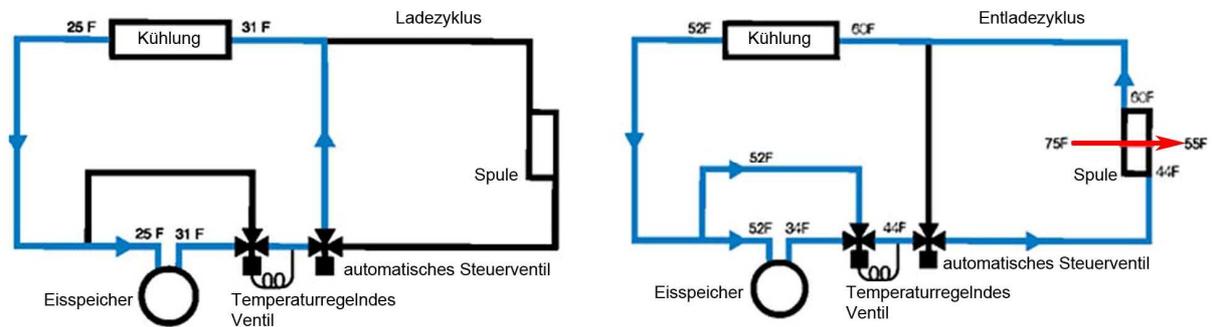


Abbildung 35: Funktionsskizze Lade- bzw. Entladevorgang<sup>44</sup>

Die Eisspeicher der Firma Calmac sind in verschiedenen Dimensionen und Ausführungen erhältlich. Hier ist eine Bandbreite von 144 kWh (bei 1.980 kg beladen, davon 1.550 l Wasser) bis 1.710 kWh (bei 22.950 kg beladen, davon 18.795 l Wasser) verfügbar.<sup>45</sup>

### Prototypenentwicklung Eisspeicher

Ein kleiner Eisspeicher wurde mittels eines adaptierten Kühlschranks und zusätzlicher Wärmedämmung installiert und sein Speicherverhalten ermittelt.



<sup>44</sup> <http://www.calmac.com/products/icebank.asp>; 10.12.2008.

<sup>45</sup> <http://www.calmac.com/products/icebank.asp>; 10.12.2008.



Abbildung 36: Prototyp Eisspeicher<sup>46</sup>

Die Ergebnisse aus dem Versuch bestätigen die lange bzw. relativ verlustfreie und vor allem einfache Lagerfähigkeit von Eis. Daraus lässt sich ableiten, dass die Eisspeicherung gerade im Sinne der Angepassten Technologie grundsätzlich weiter verfolgt werden sollte. Für die Erfüllung aller Nutzeranforderungen im Bereich Kühlung sind aber zusätzliche Technologien, wie die Absorptions- und Adsorptionskühlung, einzusetzen. Diese werden im Kapitel 9.4.1 beschrieben.

#### 9.2.4. Sonstige Speicher

An weiteren Speichermöglichkeiten wurden kinetische Speicher und Druckluftspeicher auf ihre Verwendbarkeit untersucht (siehe folgende Tabelle sowie Tabelle 7).

Kategorie/Modell	MDS K3, Schwungradspeicher	Druckluftspeicher
Bewertung	ungeeignet	geeignet*

\* Systeme unterlaufen einer genaueren Untersuchung

Tabelle 21: Sonstige Energiespeicher

Kinetische Speicher sind für den Einsatz in der Haustechnik aufgrund ihrer hohen Verluste und ihrer kurzen Speicherintervalle nicht geeignet. Das Speichersystem mit Druckluft hingegen wird im Folgenden näher beschrieben und auf seine Tauglichkeit im Energieautarken Haus hin analysiert.

<sup>46</sup> GrAT (2008).

## **Druckluftspeicher**

Der Druckluftspeicher könnte eine Alternative für Speicher hoher Energiedichte wie z. B. Blei-Akkumulatoren bieten. Bei Drücken bis 300 bar (normale Industriegasflaschen) werden hohe Energiedichten erreicht, und im Gegensatz zu Akkumulatoren gibt es keine ladezyklenabhängige Degradation.

Die zeitbedingten Verluste sind sehr gering, und viele der benötigten Systemkomponenten sind kostengünstig verfügbar. Es werden sogar Automobile für Druckluftbetrieb geplant bzw. gebaut.<sup>47</sup> Die Speichertechnologie eignet sich grundsätzlich auch für das energieautarke Gebäude, allerdings sind entsprechende Adaptierungen und Weiterentwicklungen der Systemkomponenten erforderlich (Drucklufttanks, Kompressoren, Druckluftmotoren, Leitungen). Die wesentlichste Schwachstelle jedoch sind die Verluste beim Komprimieren der Luft.

### **9.3 Komponenten zur Erzeugung elektrischer Energie**

Trotz drastischer Reduktion bleibt auch beim vorgeschlagenen Konzept ein Restbedarf an elektrischer Energie, der mit geeigneten Technologien ebenfalls aus der gespeicherten thermischen Energie umgewandelt werden kann.

Im folgenden Abschnitt wird zuerst auf diesen elektrischen Restenergiebedarf eingegangen, danach werden die Umwandlungstechnologien von Wärme in Strom sowie die durchgeführten Entwicklungsarbeiten beschrieben.

#### **9.3.1. Elektrischer Restbedarf**

Durch die Versorgung der großen elektrischen Verbraucher im Haushalt, insbesondere Backrohr und Herdplatten, aber auch der ständig laufenden Geräte wie Kühlschrank, mit thermischer Energie kann der verbleibende elektrische Energiebedarf sehr weit abgesenkt werden und liegt unter 1.000 kWh/Jahr (siehe Kapitel 10.1. Diese Menge an elektrischer Energie kann durch kleine dezentrale bzw. im Gebäude integrierte Energieerzeugungstechnologien bereitgestellt werden. Die Strategie für die Entwicklung energieautarker Gebäude sieht dafür die Umwandlung

---

<sup>47</sup> <http://www.mdi.lu/>, 10.12.2008.

von thermischer in elektrische Energie vor. Es wären zwar auch andere Technologien (z. B. Windkraft, Photovoltaik) einsetzbar, diese weisen jedoch bereits einen hohen Entwicklungsstand auf und stellen daher keine unmittelbare Forschungsaufgabe in diesem Projekt dar.

In der folgenden Tabelle sind die Bewertungen der vorhandenen Systeme zusammengefasst.<sup>48</sup>

Kategorie/ Modell	Bewertung
Thermoelektrisches Element	geeignet*, jedoch sehr geringer Wirkungsgrad < 5 %
Solarzellen flexibel	prinzipiell geeignet, keine Langzeiterfahrungen
Stirlingmotor	bedingt geeignet*, da Arbeitstemperatur bei ca. 800 °C liegt
ORC-Turbine	ungeeignet, derzeit nur für größere Einheiten verfügbar
Windturbine	geeignet (Kleinkraftwindanlagen mit Pel. < 10 kW)
Dampfturbine	ungeeignet für Kleinanlagen
Lineator (Freikolbendampfmaschine mit integriertem Lineargenerator)	geeignet, derzeit aber kein Betrieb mit Sonnenenergie möglich

\* Systeme unterlaufen einer genaueren Untersuchung

Tabelle 22: Komponenten zur Erzeugung elektrischer Energie

---

<sup>48</sup> Siehe auch Tabelle 8.

### 9.3.2. Thermoelektrische Generatoren

Thermoelektrische Generatoren (TEG) nutzen den Seebeck-Effekt zur direkten Umwandlung von thermischer Energie in elektrische Energie. Dieses Prinzip funktioniert mittels Halbleiter, die auf einer Seite erhitzt und auf der anderen Seite gekühlt werden. Der Umkehrerffekt des Seebeck-Effektes ist der Peltier-Effekt, der beim Anlegen einer elektrischen Spannung an das Halbleitermodul eine kühle und eine heiße Seite erzeugt und u. a. bei der Kühlung von Mikroprozessoren zum Einsatz kommt. In der unten stehenden Grafik ist ersichtlich, dass beim Anlegen einer elektrischen Spannung mit der entsprechenden Polarität an das Halbleiterelement die obere Seite heiß und die untere Seite kühl wird. Wird der Prozess umgekehrt betrieben, obere Seite erhitzt und untere Seite gekühlt, dann entsteht eine elektrische Spannung.

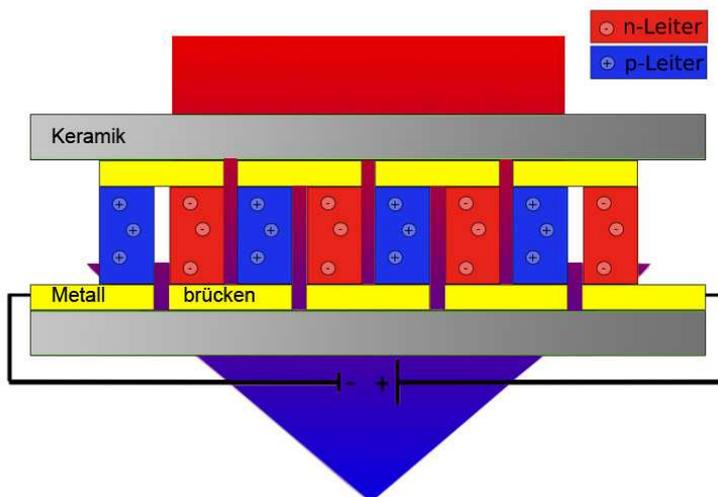


Abbildung 37: Schemazeichnung Peltier-Element<sup>49</sup>

Die dabei erzeugte elektrische Energie hängt von den verwendeten Materialien und den Temperaturen der heißen und der kalten Seite ab. Die Vorteile dieser Umwandlungsmethode liegen zum einen in der direkten Umwandlung, zum anderen hat der Thermoelektrische Generator keine bewegten Teile, benötigt daher keine Wartung und weist eine sehr geringe Reparaturanfälligkeit auf.

<sup>49</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Peltier-Element>, 4.12.2008, überarbeitete Version (GrAT, 2009).

Vielfältige Anwendungen sind möglich und wurden bereits erprobt. Dazu zählt die Nutzung der Abwärme bei LKWs (Abgastemperatur), bei der Gewinnung von Erdgas oder bei der Verbrennung zur Gewinnung elektrischer Energie.

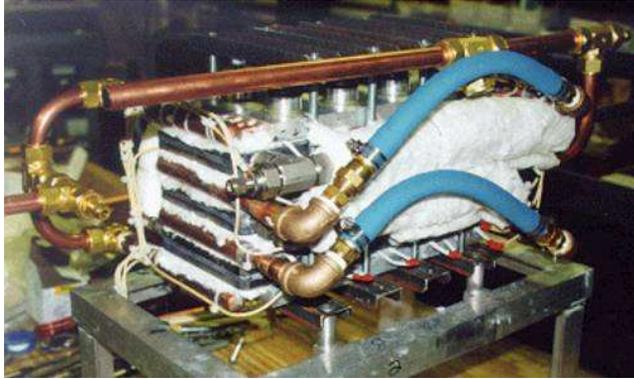


Abbildung 38: Thermoelektrischer Generator (TEG) mit 500 Watt Leistung in einer Verbrennungsanlage, Hitzequelle ist heißes Öl<sup>50</sup>



Abbildung 39: TEG mit einer Leistung von 1 kW im Abgasstrom eines 300-PS-LKWs integriert<sup>51</sup>



Abbildung 40: TEG, im Auspuff des LKWs installiert<sup>52</sup>

---

<sup>50</sup> [www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf](http://www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf)

<sup>51</sup> [www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf](http://www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf)

<sup>52</sup> [www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf](http://www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf)

Weitere Anwendungen betreffen die Entwicklung von Energie-selbstversorgenden Geräten, wie Pelletsöfen oder Zentralheizungen.

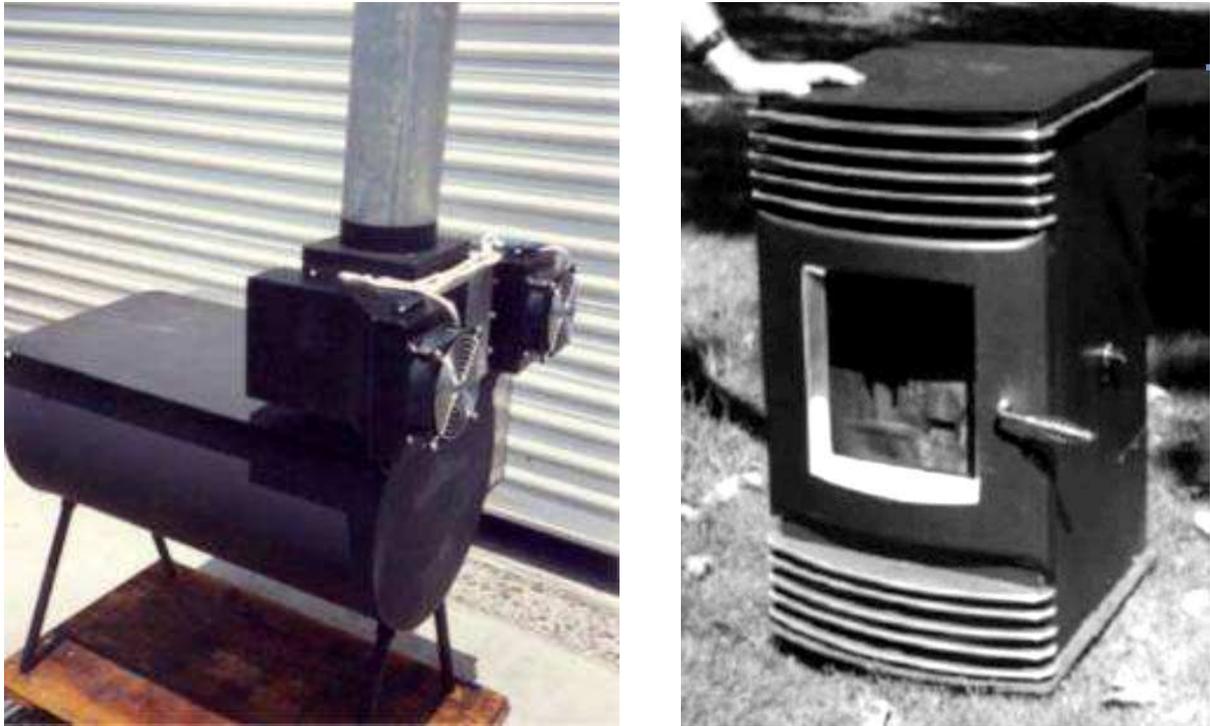


Abbildung 41: links: Der Ofen ist mit zwei Thermoelementen ausgestattet, die 20 W liefern und die Ventilatoren des Ofens antreiben; rechts: Pelletsöfen mit zwei TEG-Modulen, die ausreichend Energie für den Betrieb der Ventilatoren, der Brennstoffzuführung und der Steuerung des Ofens bereitstellen<sup>53</sup>

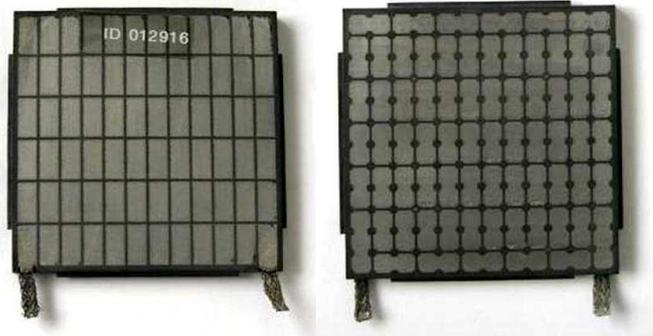
Es wurde sogar ein Prototyp einer mobilen Feldküche für die US-Armee entwickelt. Dabei liefern die TEG die Energie für die Steuerung und die Wiederaufladung der Startbatterie.<sup>54</sup>

Eigene Versuche wurden u. a. mit dem Thermoelektrischen Element HZ-20 durchgeführt.

---

<sup>53</sup> [www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf](http://www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf)

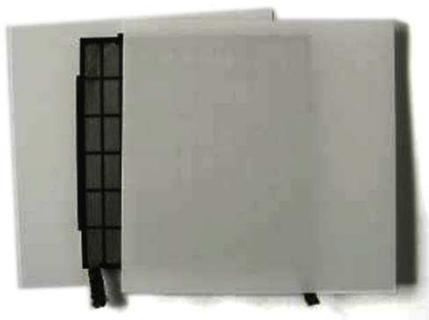
<sup>54</sup> [www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf](http://www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf)



Thermoelektrisches  
Modul HZ-20

20 Watt  
bis 400°C

Abbildung 42: Thermoelektrisches Modul, beheizte Seite (rechts), gekühlte Seite (links)<sup>55</sup>



Keramik Wafer

Elektrische  
Isolationsschicht

Abbildung 43: Isolationsschicht sind zwei Keramikscheiben<sup>56</sup>

Die Versuchsergebnisse mit diesem Modul lagen unter den Angaben der Herstellerfirma. Die im Datenblatt angeführten Wirkungsgrade von bis zu 4,5 % sind nur mit einem Modul bei optimalen Rahmenbedingungen erreichbar und sinken in einem aus mehreren Modulen bestehenden TEG-System auf 2 % und darunter.

---

<sup>55</sup> GrAT (2008).

<sup>56</sup> GrAT (2008).

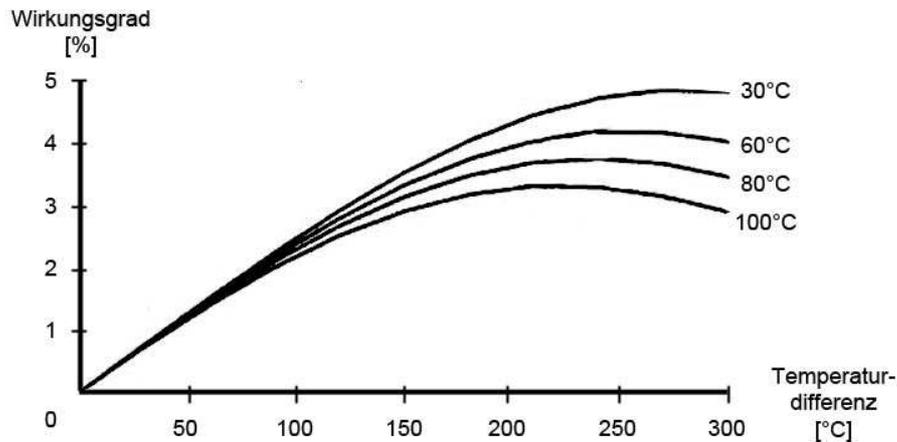


Abbildung 44: Wirkungsgrad des Thermoelektrischen Moduls HZ-20 in Abhängigkeit von den Temperaturen auf der heißen und auf der kalten Seite<sup>57</sup>

Entwicklungen im Bereich Energieerzeugung mit TEG wurden auch vom Austrian Biomass Center (ABC) durchgeführt. Das Ziel war die Versorgung einer Pelletsheizanlage mit elektrischer Energie und die zusätzliche Bereitstellung von Energie für den Haushalt. Moderne Pelletsöfen erreichen Temperaturen bis 1.200 °C (Moser, 2007), und neue Hochtemperatur-TEG auf Basis von  $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$  können ebenfalls bis über 1.200 K betrieben werden und weisen bei entsprechender Kombination mit anderen TEG Wirkungsgrade bis 18 % im Laborversuch auf (Brown, 2006).

Die Forschungsergebnisse zeigen aber, dass, obwohl die Pelletsanlagen weniger als 2 % der Nennheizleistung an elektrischer Energie benötigen, die Versorgung mit TEG gerade nur für die Steuerung der Pelletsanlage ausreicht und keine zusätzliche Energie erzeugt werden konnte. Die Wirkungsgrade von TEG-Systemen liegen damit unter 2 %.

Verfügbare Prototypen der Firma Termo-Gen AB erreichen derzeit ebenfalls nur Wirkungsgrade um 1,5 %. Die Leistung des TEG bei einem 12-kW-Pellets-Heizkessel liegt zwischen 180 und 200 W.

<sup>57</sup> Hi-Z Technology, Inc. 7606 Miramar Road, Suite 7400, San Diego, CA 92126-4210, [www.hi-z.com](http://www.hi-z.com).

## Prototypenentwicklung Thermoelektrischer Generator (TEG)

Ein Prototyp eines Thermoelektrischen Generators mit einer Leistung von 100 W wurde gebaut und getestet.



Abbildung 45: Versuchsaufbau mit einem Thermoelektrischen Generator mit einer Leistung von 100 W<sup>58</sup>

Der erste Prototyp des Thermoelektrischen Generators wurde bei folgenden Rahmenbedingungen getestet:

- Raumtemperatur von 6 °C
- maximale Erhitzertemperatur 150 °C
- Temperaturabfall über Erhitzer ca. 20 °C
- Oberflächentemperatur unter TE-Element, unter Zwischenfolie gemessen oben 110 °C, unten 95 °C
- Kühlwassertemperatur bei eingeschalteter Pumpe 23 °C
- Wärmeausdehnung des Öles bei Füllmenge von 15 l und Temperaturdifferenz von 140 °C ca. 1 Liter
- Thermoölzirkulation mittels Schwerkraftprinzip

---

<sup>58</sup> Atelier Werner Schmidt.



Abbildung 46: Versuchsaufbau Thermoelektrischer Generator, betrieben mit Thermoöl unter Nutzung des Schwerkraftprinzips, Thermoölkreislauf rechts, Kühlwasserkreislauf links<sup>59</sup>

Das Ergebnis der Prototypentests war eine gemessene Leistung von  $5,2 \text{ V} \times 3,4 \text{ A} = 17,7 \text{ Watt}$  am Lastwiderstand (Halogenlampe von Auto 12 V/60 Watt Nennleistung). Die Nennleistung von 100 W wurde bei weitem nicht erreicht. Der Wirkungsgrad des TEG-Prototypen lag ebenfalls bei 2 bis 3 % und bestätigte die oben erwähnten Forschungsergebnisse des ABC.<sup>60</sup>

Obwohl das Temperaturniveau des entwickelten Systems mit  $300 \text{ °C}$  doppelt so hoch wie im Versuch ist, ist die Verwendung von TEG aufgrund der hohen Wärmeflüsse und der geringen Energieausbeute bei gleichzeitig hohem Kostenaufwand derzeit nicht zielführend.

Für die Stromversorgung des gesamten Gebäudes mit elektrischer Energie ist eine Technologie mit höherem Wirkungsgrad (z. B. Stirlingmotor) erforderlich.

---

<sup>59</sup> Atelier Werner Schmidt.

<sup>60</sup> Brown, R.S. et al. (2006); Moser, W. et al. (2006); <http://www.thermo-gen.com/pages/generators.html> , 5.12.2008, Biofuel 200W TEG, Thermo-Gen AB Lennart Holmgren.

### 9.3.3. Stirlingmotor

#### Grundlagen

Der Stirlingmotor ist eine Wärmekraftmaschine, mit der Wärme in Arbeit umgewandelt werden kann. So kann das Temperaturgefälle im Motor zur Erzeugung von mechanischer Arbeit genutzt werden und damit über einen Generator zur Stromgewinnung.

In einem Stirlingmotor wird eine Gasmenge, die in einem Verdrängungszyylinder eingeschlossen ist, mit Hilfe eines Verdrängerkolbens zwischen einem warmen und einen kälteren Bereich hin- und herschoben. Typischerweise besitzen Stirlingmotoren einen permanent warmen und kalten Bereich, da so Energie für die erneute Erwärmung/Kühlung gespart werden kann und sich der Wirkungsgrad verbessert. Der Regenerator speichert die thermische Energie des heißen Gases, wenn dieses zur kalten Seite überströmt, und wärmt es beim Zurückströmen auf die heiße Seite wieder auf. Während des Prozesses erfolgt eine Druckänderung, da sich das erwärmte Gas ausdehnt und das gekühlte Gas zusammenzieht. Die periodischen Druckänderungen werden vom sogenannten Arbeitskolben normalerweise über eine Schubstange, die eine Kurbelwelle antreibt, aufgenommen, somit wird mechanische Arbeit verrichtet.

Bei einfachen Stirlingmotoren besteht das „Arbeitsgas“ aus Luft, ansonsten aus Helium oder auch Wasserstoff. Kleinere Stirlingmotoren arbeiten mit atmosphärischem Druck des Arbeitsgases.

Eine Besonderheit des Stirlingmotors ist, dass die Energie, die zum Antrieb benötigt wird, als Wärme von außen durch die Zylinderwand des Erhitzers zugeführt wird. Daher können Stirlingmotoren sowohl mit Brennstoffen sei es Gas, Öl, Biomasse, als auch mit Solarenergie, betrieben werden.

Da der Betrieb von Stirlingmotoren wie von allen Arbeitsmaschinen verlustbehaftet ist, muss der Teil der aufgenommenen Wärme, die nicht in mechanische Energie umgewandelt werden kann, vom Kühler auf der kalten Seite des Stirlingmotors

abgeführt werden und kann beispielsweise zur Warmwasserbereitung oder zum Heizen verwendet werden.<sup>61</sup>

## Das Funktionsprinzip

Stirlingmotoren basieren auf einem geschlossenen thermodynamischen Kreisprozess und sind sogenannte Heißgasmotoren, wobei man zwischen drei Hauptbauarten unterscheidet: dem Alpha-, Beta- und dem Gamma-Typ. Die drei Arten unterscheiden sich nur in der Anordnung der Zylinder und Kolben, funktionieren jedoch nach dem gleichen Prinzip, das in der folgenden Graphik anhand eines Gamma-Typs dargestellt ist.

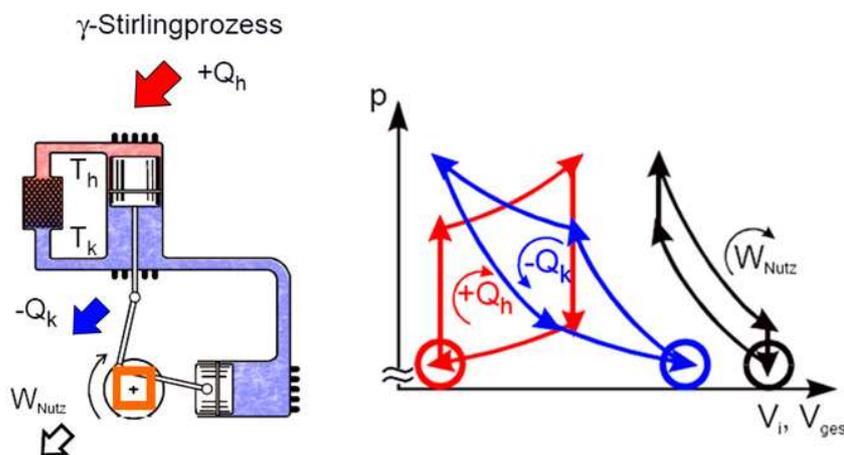


Abbildung 47: Funktionsprinzip Stirlingmotor<sup>62</sup>

Als Wirkungsgrad eines Stirlingmotors bezeichnet man das Verhältnis der abgegebenen mechanischen Leistung zur aufgenommenen Leistung. In diesem Wirkungsgrad sind die zur Wärmeerzeugung und -zuführung erforderlichen Motorteile nicht enthalten.

Stirlingmotoren, die mit niedrigen Temperaturniveaus um die 150 °C arbeiten, besitzen einen Wirkungsgrad von 2–5 %. Hochtemperatur-Stirlingmotoren können

<sup>61</sup> Kühl (2008); Bernd (2008).

<sup>62</sup> Kühl (2008).

theoretisch Wirkungsgrade von bis zu 50 % besitzen. Produktentwicklungen erreichten bei Praxistests 20 bis 25 % Wirkungsgrad.<sup>63</sup>

## **Anwendungen mit erneuerbaren Energien**

### *Betrieb mit Biomasse*

Bei der direkten Stromerzeugung sind Stirlingmotoren die einzigen Antriebsmaschinen, die ohne zusätzliches Aggregat auskommen. Soll Biomasse als Brennstoff eingesetzt werden, ist eine optimal angepasste Feuerung mit guter Regelbarkeit notwendig. Ebenso ist es wichtig, dass keine festen Rückstände in den Verbrennungsgasen enthalten sind, da es sonst zu Problemen während des Stirlingprozesses kommen kann.

Aktuelle Entwicklungen sind vor allem im Bereich von Biomasseheizkesseln in Kombination mit Stirlingmotoren zu finden. Dabei handelt es sich, wie bereits im Kapitel 6 erwähnt, um Hochtemperatur-Stirlingmaschinen. Diese arbeiten bei Temperaturen um 800 °C. Dieses Temperaturniveau liegt weit über dem im „Wireless House“ verfügbaren.

### *Betrieb mit Sonnenenergie*

Bei den sogenannten Dish-Stirling-Anlagen werden relativ hohe Wirkungsgrade von ca. 30 % erreicht. Eines der bekanntesten Beispiele ist hier der Dish-Stirling der Firma Schlaich Bergemann und Partner, der einen Stirlingmotor-Generator der Firma SOLO enthält (siehe Abbildung 48).

---

<sup>63</sup> Betz (2008).



Abbildung 48: Stirlingmotor-Generator V161 von SOLO<sup>64</sup>

Auch bei dieser Entwicklung handelt es sich um Hochtemperatur-Stirlingmaschinen. Der Solarkonzentrator bündelt die Sonnenstrahlung und erwärmt den Receiver auf 650 °C Betriebstemperatur.<sup>65</sup>

Für das „Wireless House“-Konzept ist hingegen ein Stirlingmotor für die Arbeitstemperatur von 300 °C notwendig, worauf in der nachfolgend beschriebenen Modellentwicklung Bedacht genommen wurde.

### **Prototypenentwicklung Stirlingmotor**

Für die Verwendung im Energieautarken Haus muss der Stirlingmotor verschiedene Leistungsparameter erfüllen. Grundsätzlich sind die Arbeitstemperatur von ~ 300 °C, die gewünschte Leistung von über 200 W und eine kontinuierliche Arbeitsweise (24 h pro Tag) ausschlaggebend.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Prototyp eines Stirlingmotors entwickelt, gebaut und getestet. Dieser Prototyp bringt vorerst eine Leistung von 50–100 Watt.

---

<sup>64</sup> Schlaich Bergemann und Partner, [www.sbp.de](http://www.sbp.de).

<sup>65</sup> Schlaich Bergemann und Partner (2002).

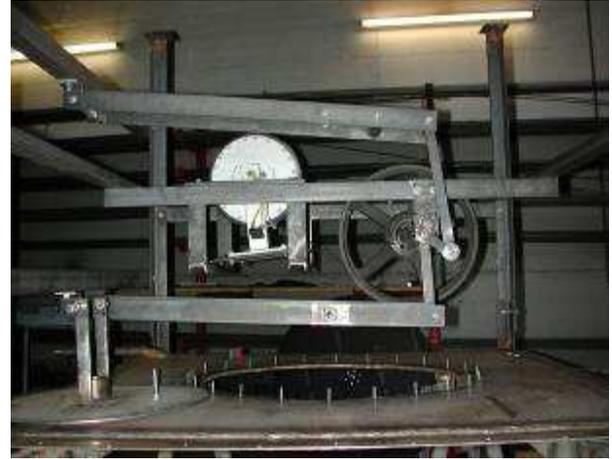
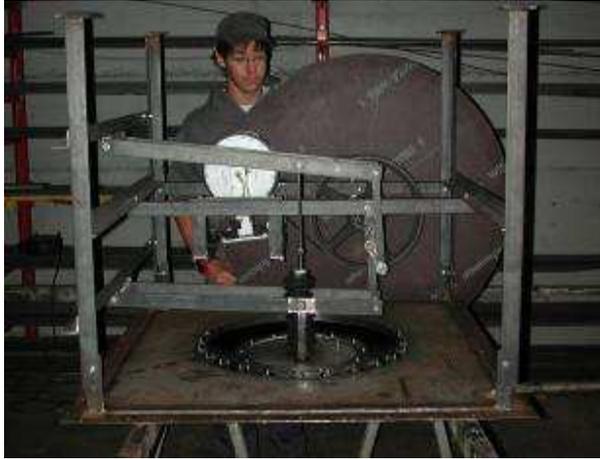


Abbildung 49: Bau des Stirlingmotor-Prototyps<sup>66</sup>



Abbildung 50: Zusammenbau des Stirlingmotor-Prototyps<sup>67</sup>

In einem wärmege­dämmt­en Ge­häu­se wird das Herz­stück des Stirling­motors, be­stehend aus Ver­drän­ger­kolben und Ar­beits­kolben (Mem­brankolben), die durch eine Tem­pe­ra­tur­dif­fe­renz me­chanische En­er­gie er­zeu­gen, montiert.

<sup>66</sup> Atelier Werner Schmidt.

<sup>67</sup> Atelier Werner Schmidt.



Abbildung 51: Vorbereitungsarbeiten und Inbetriebnahme des Stirlingmotors



Abbildung 52: Testlauf und Vermessung der Ausgangsleistung

Beim Testlauf wurde das Thermoöl mittels Gasbrenner auf mehr als 150 °C erhitzt und so die heiße Seite des Stirlingmotors beheizt. Die kalte Seite wurde mit Wasser

auf knapp über 20 °C gekühlt. Auf der Generatorseite wurde die Ausgangsleistung von über 50 Watt gemessen.

Ein weiterer Prototyp im Bereich Mitteltemperatur ist die Sunpulse-Maschine, die derzeit in einer 5-kW-Anlage errichtet und getestet wird.<sup>68</sup>

Diese Leistung ist für den erforderlichen Anwendungszweck noch nicht ausreichend, daher wurde für die Weiterentwicklung mit möglichen japanischen Kooperationspartnern Kontakt aufgenommen, die in der Entwicklung von Niedertemperatur-Stirlingmotoren führend sind. Insbesondere interessant ist dabei ein alpha+-Stirlingmotor, welcher mit geringen Temperaturdifferenzen arbeitet. Der Motor erreichte während der Testphase 805 W bei 700 min<sup>-1</sup> und einen Wirkungsgrad von 14% bei einer Temperatur von 300 °C. Dieser Prototyp wurde so konzipiert, dass er mit Thermoöl betrieben werden kann, etwa dem Biomasse-Backup-System<sup>69</sup>.

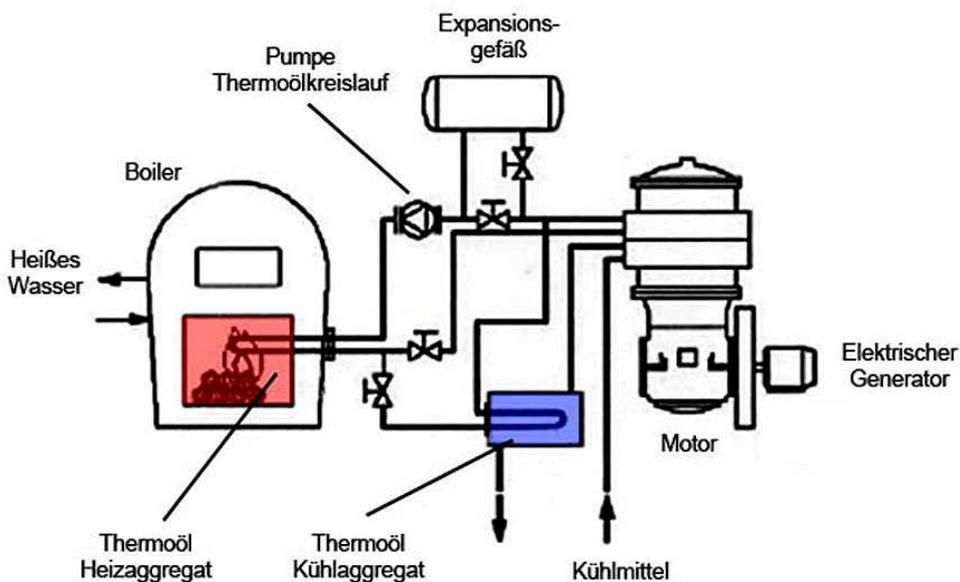


Abbildung 53: Systemskizze Stirlingmotor<sup>70</sup>

<sup>68</sup> Kleinwächter J. (2003).

<sup>69</sup> Makoto Takeuchi et al (2007).

<sup>70</sup>GrAT (2008), eigene Darstellung nach Makoto Takeuchi et al. (2007).

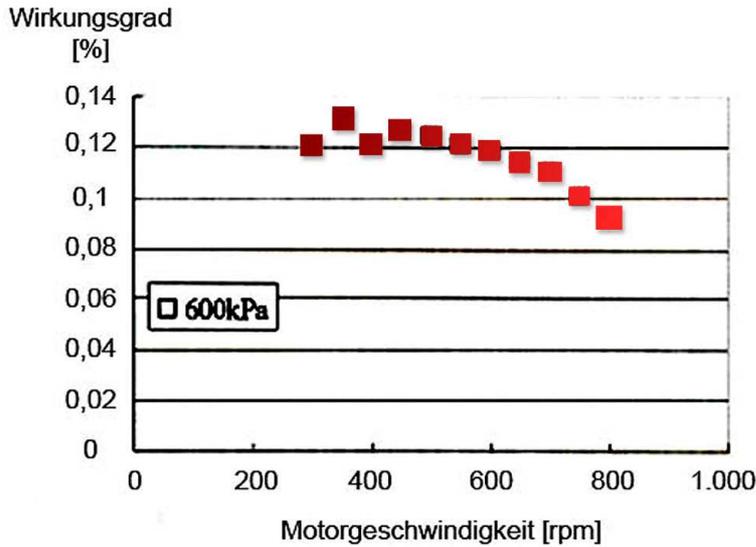


Abbildung 54: Wirkungsgradkurve Stirlingmotor bei 600 kPa Buffer Druck<sup>71</sup>

Die Ergebnisse zeigen, dass Mitteltemperatur-Stirlingmaschinen die Anforderungen im „Wireless House“-System erfüllen können. Forschungsaufgaben und Adaptionbedarf bestehen vor allem noch in Hinblick auf die Einbindung des Stirlingmotors in das Gesamtsystem.

## 9.4 Output-Komponenten

### 9.4.1. Kälte aus Wärme

Mögliche Systeme zur Erzeugung von Kälte basieren einerseits auf Absorption, andererseits auf Adsorption.<sup>72</sup> Für das Konzept des Energieautarken Hauses sind beide Möglichkeiten prinzipiell geeignet.

Kategorie/Modell	Absorptionskälte	Adsorptionskälte
Bewertung	geeignet*	geeignet*

\* Systeme unterlaufen einer genaueren Untersuchung

Tabelle 23: Kälteanlagen

Absorptionskühlgeräte werden seit langem im Freizeitsektor (Camping- und Outdoor-Equipment) angeboten. Diese Kühlgeräte werden mit Gas betrieben und sind somit

<sup>71</sup> GrAT (2008), eigene Darstellung nach Makoto Takeuchi et al. (2007).

<sup>72</sup> Siehe auch Tabelle 9.

unabhängig vom Stromnetz überall einsetzbar. Forschungsarbeiten für die Entwicklung wirtschaftlicher Lösungen sind im Laufen. Großanlagen mit mehreren Megawatt Kühlleistung sind am Markt ebenfalls seit langem erhältlich. Anlagen mit einer Leistung unter 100 kW sind kaum verfügbar.

Typische Temperaturen für den Betrieb der Anlagen liegen zwischen 85 °C (single effect absorption) bis 160 °C (double effect absorption).

Ein Beispiel für eine Adsorptionsgroßanlage ist die Kältemaschine der japanischen Firma Nishyodo.<sup>73</sup>



Adsorptionskältemaschine mit periodischer Betriebsweise mit Silikagel als Adsorptionsmittel und Wasser als Arbeitsstoff.

Kälteleistung: 70–400 kW

Antriebstemperatur: 55 °C

COP: 0,65

Kosten: 500–700 €/kW

Abbildung 55: Adsorptionskältemaschine<sup>74</sup>

Typische Arbeitstemperaturen liegen zwischen 60 und 95 °C. Wirtschaftliche Kleinanlagen, die z. B. mit Solarenergie betrieben werden können, sind derzeit nicht auf dem Markt.

<sup>73</sup> bmvit (2008).

<sup>74</sup> bmvit (2008).

## Prototypenentwicklung für ein thermisch betriebenes Kühlgerät

Die Entwicklung des Absorptionskühlgerätes für das „Wireless House“ basierte im ersten Schritt auf der Adaption eines Absorberkühlschranks. Dabei wurde die gasbetriebene Heizung durch eine thermische Versorgung mittels Thermoöl ersetzt.



Abbildung 56: Bau des Prototyps der Absorptionskühlmaschine<sup>75</sup>



Abbildung 57: Anbringen der Isolierung der Thermoölversorgungsleitungen für Kühlgerät und Backrohr<sup>76</sup>

Der Versuchsaufbau besteht aus einem einfachen Küchenblock, in dem Kochen und Kühlen thermisch mittels Thermoölbetrieb funktionieren. Wie auch beim Stirlingmotor wurde auf einen möglichst einfachen Aufbau und Selbstregulation geachtet. Die Zirkulation erfolgt auch hier nach dem Thermosyphon-Prinzip.

Es zeigte sich, dass für eine verbesserte Effizienz des Absorberkühlschranks eine größere Wärmetauscherfläche notwendig wäre als die herkömmliche. Außerdem

<sup>75</sup> Atelier Werner Schmidt.

<sup>76</sup> Atelier Werner Schmidt.

sollte nach Möglichkeit kein Standardkühlschrank, sondern ein besonders gut gedämmter Kühl-/Gefrierraum verwendet werden.

#### 9.4.2. Herd und Backofen

Eine grundsätzliche Bewertung der vorhandenen Produkte für den Einsatz in der Küche findet sich in der folgenden Tabelle.<sup>77</sup>

Kategorie/Modell	Scheitholzküchenofen	Industriebacköfen
Bewertung	ungeeignet, schlecht regelbar	geeignet*

*\* Systeme unterlaufen einer genaueren Untersuchung*

Tabelle 24: Herd und Backofen (thermisch betrieben)

Thermoölbetriebene Backöfen sind derzeit nur für Industrieküchen im Einsatz und sind folglich als Küchen- und Haushaltsgeräte nicht geeignet. Außerdem werden diese Produkte nicht mit Solarenergie betrieben, sondern Wärme wird mit fossilen Energieträgern bereitgestellt. Bei Öfen der Nahrungsmittelindustrie erfolgt die Speisung meistens mit extern mittels Gas oder elektrischer Energie erhitztem Wärmeträgeröl.

#### Prototypenentwicklung Herd und Backrohr

Für die Konzeption des neu entwickelten Küchenofensystems, betrieben mit Thermoöl, wurden Modelle gebaut und Versuche durchgeführt.

---

<sup>77</sup> Siehe auch Tabelle 10.

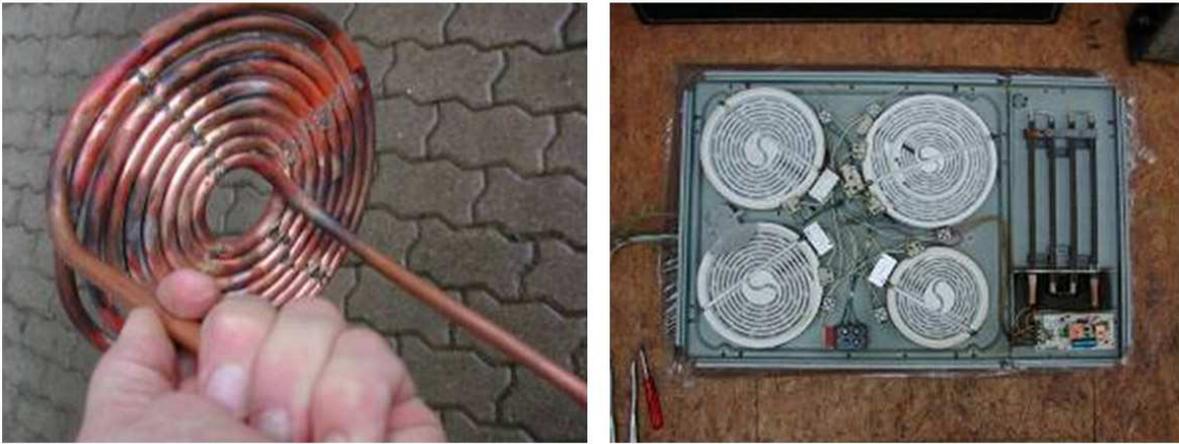


Abbildung 58: links: Herdplatte für den Prototyp eines mit Thermoöl betriebenen Küchenofens, rechts: Umbau eines herkömmlichen Küchenofens zu einem mit Thermoöl betriebenen Küchenofen<sup>78</sup>

Der Prototyp für Herd und Backrohr wurde basierend auf herkömmlichen, elektrisch betriebenen Geräten entwickelt. Die Heizspiralen in den Geräten wurden durch hart verlötete Kupferschlangen ersetzt. Diese wurden in ähnlicher Dimension wie die elektrischen Heizschlangen gefertigt und eingebaut.



Abbildung 59: Umbau eines elektrisch betriebenen Backrohrs zu einem Thermoölbackofen<sup>79</sup>

<sup>78</sup> Atelier Werner Schmidt.

<sup>79</sup> Atelier Werner Schmidt.

Die Hitzeezeugung erfolgt durch die mit Wärmeträgeröl durchflossenen Kupferrohre. Das Gesamtkonzept sieht vor, dass der Transport von Wärmeträgeröl über das Schwerkraftprinzip erfolgt. Die Steuerung (Ein-, Ausschaltung) erfolgt über Ventile. Alle Metallteile müssen entsprechend gut wärmegeklämt sein, damit die Verluste minimiert werden und der Betrieb der Geräte den Nutzeranforderungen sowie den sicherheitstechnischen Richtlinien entspricht.



Abbildung 60: Designentwicklungen für einen kombinierten, mit Thermoöl betriebenen Küchenofen und für eine Kochplatte<sup>80</sup>

Ein mögliches Design für einen kombinierten, thermisch betriebenen Küchenofen (Kochplatte und Backrohr in einem Gerät) zeigt das linke Bild in der obigen Abbildung. Gut ersichtlich ist die hohe Dämmstärke, die sich auch in größeren Dimensionen der Abdeckung der Kochplatte und der Backroürtüre niederschlägt. Im rechten Bild ist ein Designvorschlag für eine einzelne Kochplatte zu sehen. Die beheizte Platte befindet sich in der Mitte, die obere und die untere Platte dienen zur Wärmeisolation bei Nicht-Benutzung und als Abstellfläche während des Kochens.

### 9.4.3. Anschlüsse

Neue Endgeräte, die neben Strom und eventuell Wasseranschlüssen auch einen heißen Wärmeträger (300 °C) nutzen sollen, werden auch für diesen einen genormten/standardisierten Anschluss benötigen. Die technische Machbarkeit

---

<sup>80</sup> Atelier Werner Schmidt

solcher Anschlüsse ist mit bestehenden Komponenten möglich (siehe nachfolgende Tabelle).<sup>81</sup>

Kategorie/Modell	Standardisierter Hochtemperatur- (HT-)Anschluss
Bewertung	geeignet*

\* Systeme unterlaufen einer genaueren Untersuchung

Tabelle 25: Hochtemperaturanschlüsse

In der Industrie werden die Produkte bei Temperaturen von 300 °C selbst in mit Druck beaufschlagten Systemen eingesetzt. In jedem Fall ist die Auswahl geeigneter Materialien für die Armaturen – Edelstahl – und für die Dichtungen – Graphit oder mineralische Dichtungsmaterialien – wesentlich für den sicheren und wartungsfreien Betrieb der Geräte bzw. des gesamten Systems. Für die weiteren Entwicklungen muss, wie bereits im Kapitel 8.6 beschrieben, eine Abstimmung mit den Sicherheitsrichtlinien betreffend Haushaltsgeräte und Installationstechnik im Gebäudebereich erfolgen.

---

<sup>81</sup> Siehe auch Tabelle 11.

## **10. Dimensionierung und Systemintegration**

Die erarbeiteten Ergebnisse zu den einzelnen Systemkomponenten werden zu einem Gesamtkonzept zusammengefügt. Dabei wird nicht nur das Zusammenspiel der Komponenten, sondern auch die Frage der Dimensionierung des „Wireless House“ geklärt. Aufbauend auf den Berechnungen für die Dimensionierung erfolgt die Darstellung des Gesamtsystems. Über die rein technischen Lösungsansätze hinaus werden verschiedene architektonische Lösungen entwickelt.

### **10.1 Berechnungen für die Dimensionierung**

Als Grundlage für unterschiedliche Systemauslegungen wurde zum einen die Verbraucherseite und zum anderen die Erzeugungsseite analysiert (siehe Kapitel 8). Bei der Verbraucherseite wurde berechnet, wie stark der Bedarf an elektrischer Energie durch Wechsel zu thermischer Energieversorgung reduziert werden kann und welche Energiemengen jeweils für unterschiedliche Systeme (normaler Haushalt, Haushalt mit Best-practice-Equipment oder Energieautarkes Haus) notwendig sind. Auf der Erzeugungsseite werden verschiedene Systemkomponenten für das Energieautarke Haus dimensioniert und die notwendigen Massen und Volumina z. B. für den Speicher berechnet.

#### **10.1.1. Berechnung des Versorgungssystems**

Das gemäßigte mitteleuropäische Übergangsklima zeichnet sich durch verhältnismäßig warme Sommer und kühle Winter aus. Die Humidität liegt im Mittel zwischen 60 und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit. Der exemplarische Standort in Böheimkirchen, NÖ, der für die Erprobung der entwickelten Technologien ausgewählt wurde, weist folgende Klimadaten auf (beispielhaft aufgeführt für das Jahr 2007):

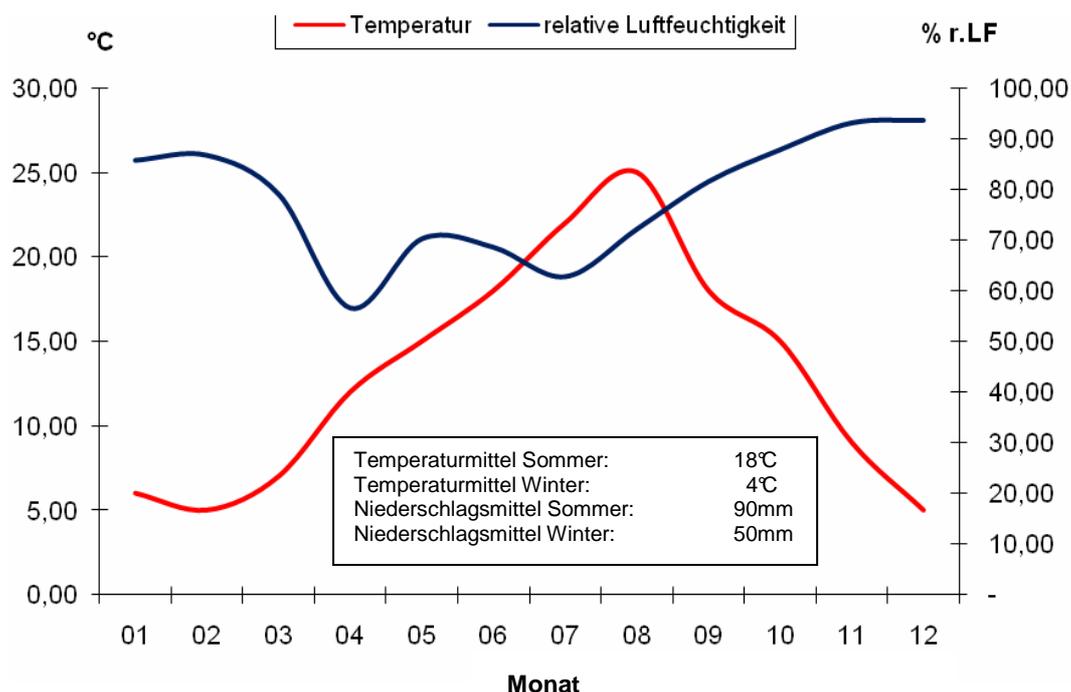


Abbildung 61: Darstellung der Klimadaten des Jahres 2007 am Standort Böheimkirchen, NÖ<sup>82</sup>

Die in dieser Darstellung verwendeten Messdaten stammen aus den direkt am S-House in Böheimkirchen angebrachten Sensoren und liefern somit konkrete Messwerte für den Prototyp des sich in Planung befindlichen Energieautarken Hauses. Entscheidende Faktoren für die Nutzung der Solarenergie mittels konzentrierender Solarkollektoren ist die zur Verfügung stehende direkte Solarstrahlung, d.h. Globalstrahlung (in W/m<sup>2</sup>) ohne Anteil an diffuser Sonnenstrahlung.

Auf Basis der so ermittelten solaren Gewinne am gewählten Standort beträgt der Brutto-Jahreseintrag für 2007 1.080,14 kWh/m<sup>2</sup>. Demzufolge wurden folgende Werte für unterschiedliche Parabolspiegelmodelle eruiert, die für die weiteren Auswertungen verwendet wurden:

<sup>82</sup> GrAT (2008).

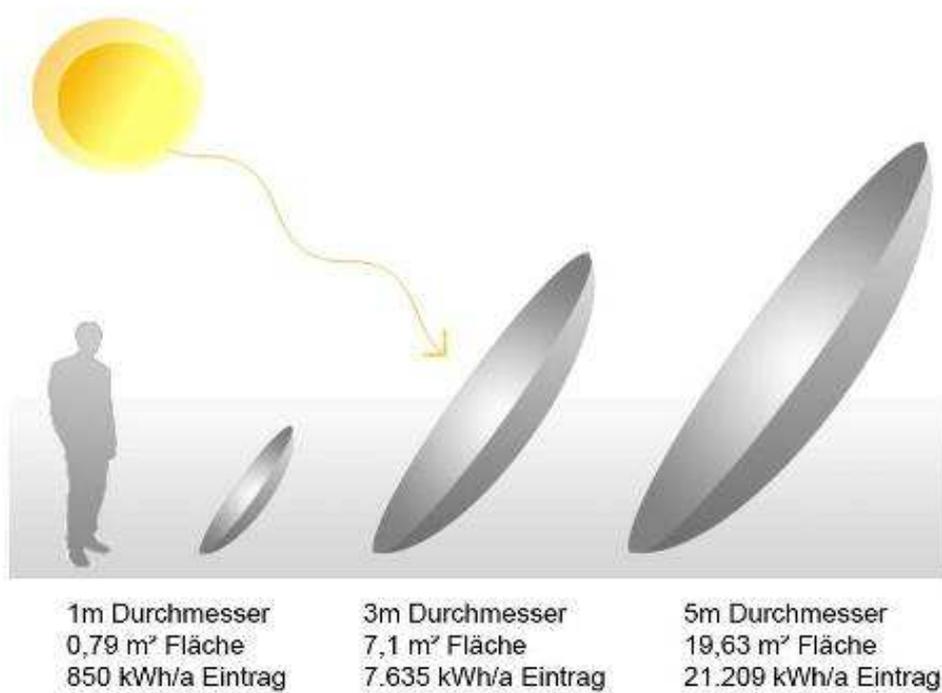


Abbildung 62: Vergleich Parabolspiegel unterschiedlicher Durchmesser nach Energieeintrag<sup>83</sup>

Um ein realistisches Bild des möglichen Deckungsgrades des täglichen Energiebedarfs mittels konzentrierender Solarkollektoren zu erhalten, wurde für jeden Monat der solare Energieeintrag für die ausgewählte Kollektorgröße von 5 m Durchmesser bestimmt und dem Bedarfsprofil zugeordnet.

---

<sup>83</sup> GrAT (2008).

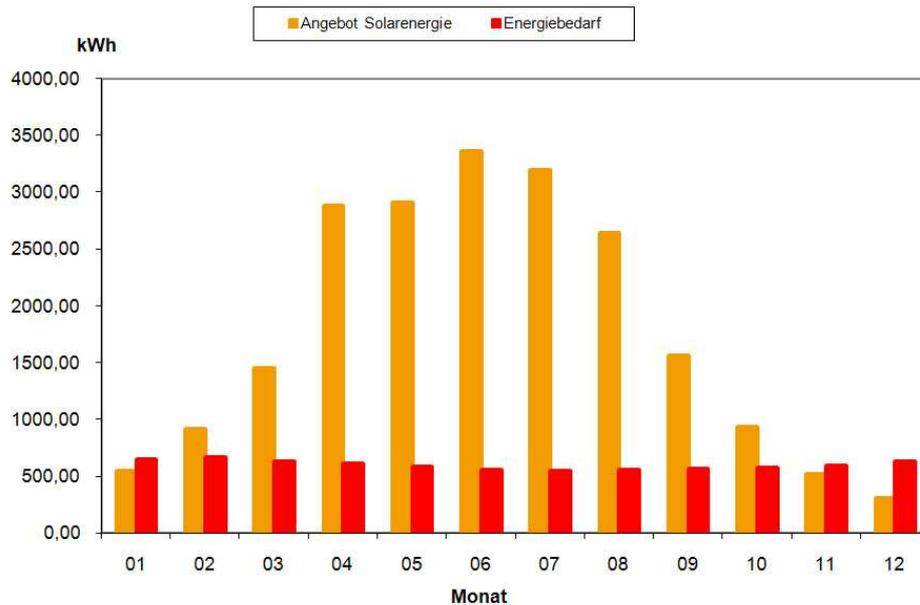


Abbildung 63: Vergleich von solarem Energieangebot pro Monat im Jahr 2007 in Böheimkirchen (Solarkollektor-Durchmesser 5 m) und durchschnittlichem Energiebedarf auf Basis des Wireless House im Jahr<sup>84</sup>

Das folgende Diagramm zeigt die im Juli 2007 in Böheimkirchen ermittelten maximalen und minimalen Globalstrahlungswerte eines typischen Tagesverlaufs. Die angegebenen Werte beziehen sich wie zuvor auf die als Basis genommene Kollektorfläche des Parabolspiegels von 5,0 Metern Durchmesser bei einer resultierenden Gesamtfläche von 19,63 m<sup>2</sup>. Dem gegenübergestellt wird das energetische Nutzerprofil einer vierköpfigen Familie (s. Kapitel 8).

<sup>84</sup> GrAT (2008).

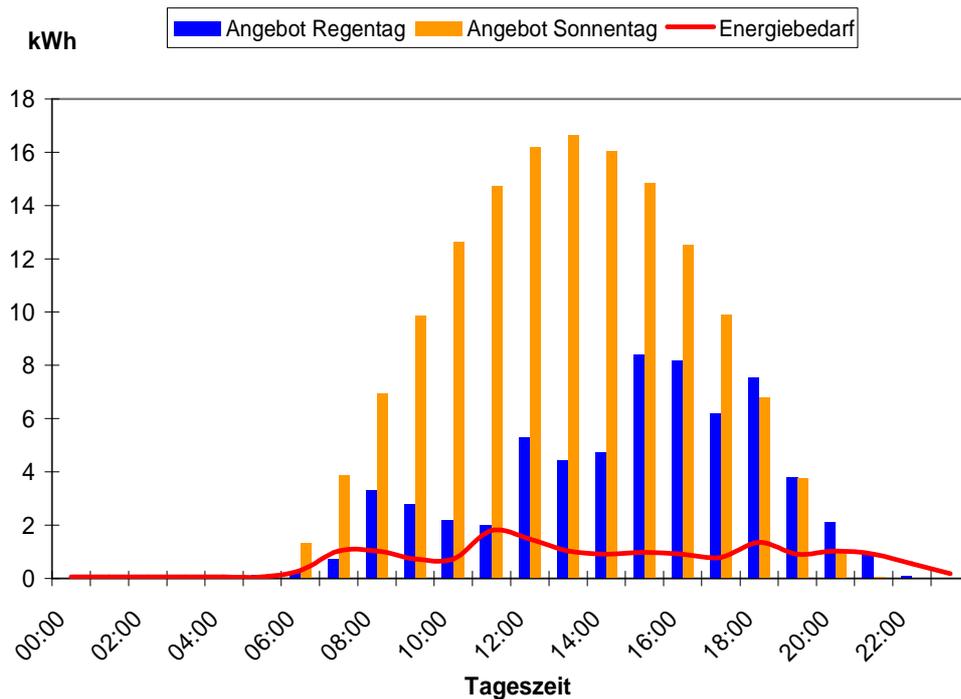


Abbildung 64: Vergleich des Energiebedarfs eines Tages mit dem Angebot an Solarenergie im Juli 2007<sup>85</sup>

Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass im Sommer allein durch kurzfristige Speichermaßnahmen (über die Nacht, über wenige Regentage) eine ständige Energieversorgung auf Basis der solaren Einträge gewährleistet werden kann. Diese positive Bilanz beginnt bereits früh im Jahr (März/April) und kann bis in den Spätherbst (Oktober/November) aufrechterhalten werden, dann jedoch kommt es zu einer signifikanten Veränderung im Gleichgewicht aus Energiebedarf und -angebot.

In den Wintermonaten sinkt die Dauer der lichten Tage und die Außentemperatur, damit zeigt sich im Winter ein erhöhter Energiebedarf im Bereich Beleuchtung (elektrisch) und Heizung (thermisch). Der erhöhte Tagesbedarf an Energie erreicht ein Maximum im Februar mit Werten von bis zu 27,5 kWh/d (im Vergleich zu 21 kWh/d im Sommer).

Wie sich dieser Zustand auf die Energiebilanz für das Energieautarke Haus auswirkt, veranschaulicht die folgende Graphik, deren Kenndaten die minimale sowie die maximale Strahlungsmenge aufzeigen, welche im Dezember 2007, dem Monat mit

---

<sup>85</sup> GrAT (2008).

der geringsten verfügbaren Solarstrahlungsmenge (insgesamt 15,33 kWh/m<sup>2</sup>), erfasst wurden.

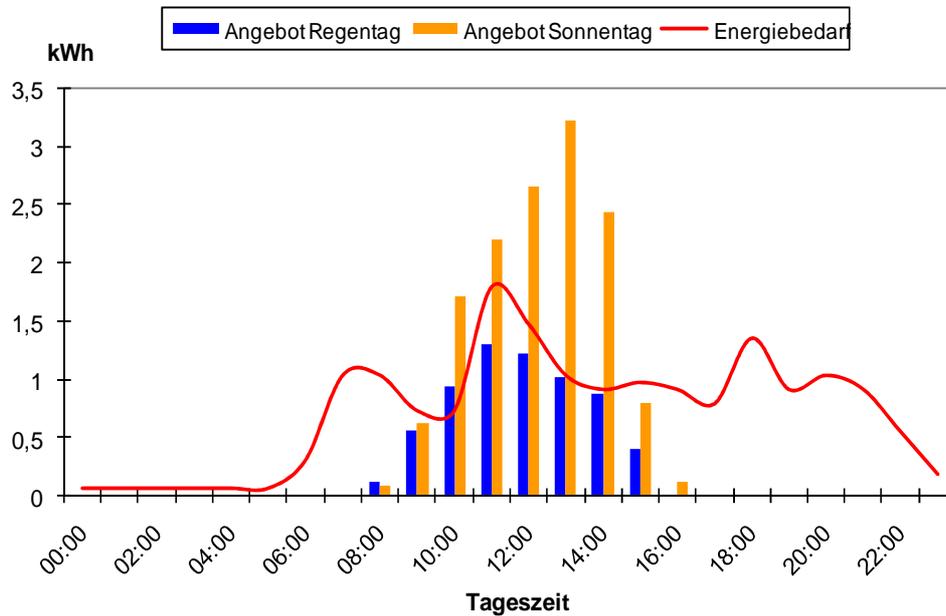


Abbildung 65: Vergleich des Energiebedarfs eines Tages mit dem Angebot an Solarenergie im Winter 2007<sup>86</sup>

Die Gegenüberstellungen zeigen, dass es in den Sommermonaten möglich ist, den Energiebedarf zur Gänze aus den solaren Gewinne zu decken, während diese im Winter durch die veränderten Angebots- wie auch Verbrauchswerte nicht ausreichen.

Sowohl im Falle eines Sonnentages als auch im Falle eines Regentages ist hier die Zuschaltung des Backup-Systems (Biomasseofen) unumgänglich. Die folgende Darstellung veranschaulicht den benötigten Restenergiebedarf im Tages-Lastprofil mit dem größten Energiebedarf.

<sup>86</sup> GrAT (2008).

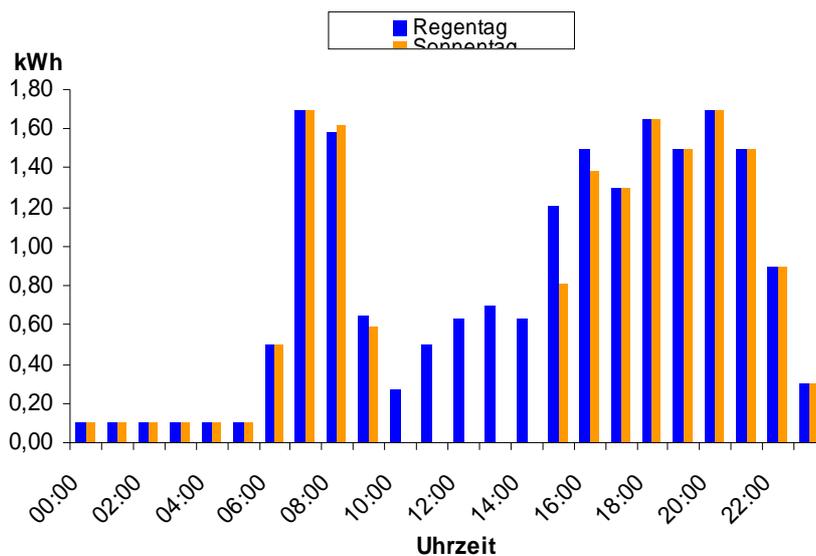


Abbildung 66: Restenergiebedarf im Verlauf eines typischen Regen- und Sonnentags im Dezember 2007<sup>87</sup>

Führt man eine Berechnung des nicht über die Sonnenenergie zu deckenden Restbedarfs an Energie durch, so ergeben sich für das Beispieljahr lediglich bei vier Monaten Lücken in der Energiebilanz, die in der folgenden Tabelle für das Jahr 2007 aufgeführt sind:

Monat	Bedarf in kWh	solar gedeckt in kWh	Restbedarf in kWh
11 / 2007	592,01	544,43	47,58
12 / 2007	624,03	301,00	323,03
01 / 2007	645,38	453,2	192,18
02 / 2007	652,89	643,00	9,89
<b>Gesamt</b>	<b>2.514,31</b>	<b>1.941,63</b>	<b>572,68</b>

Tabelle 26: Energiebilanz energetischer Restbedarf

Dieser Restenergiebedarf muss vom Biomasse-Backup-System abgedeckt werden mit einem Maximum von 323 kWh im Monat Dezember.

<sup>87</sup> GrAT (2008).

### 10.1.2. Berechnung der Speicheranlage

Die Speicherung unterschiedlicher Energieformen bzw. die Speicherung von thermischer Energie mit unterschiedlichen Temperaturen ist notwendig, um die jeweilige Energieform je nach den Anforderungen der Nutzer zeitlich flexibel zur Verfügung stellen zu können.

Bei der Realisierung des Energieautarken Hauses wird von einem Heizenergiebedarf eines Passivhauses von weniger als 15 kWh/m<sup>2</sup>a ausgegangen. Die Dimensionierung des Speichers ist so zu wählen, dass die erforderliche Bedarfsenergiemenge im Winter trotz sehr geringer bzw. schwankender solarer Gewinne ohne Komforteinbußen über einen Zeitraum von maximal acht Tagen über den Speicher bereitgestellt werden kann. Ebenso ist der Solarkollektor entsprechend groß auszulegen.

Um diese Parameter zu veranschaulichen, wurden drei Bedarfsfälle mit den jeweils resultierenden Speichergrößen berechnet (s. **Error! Reference source not found.**). Das Lastprofil beschreibt jeweils den Winterfall und geht von erhöhtem Heizwärmebedarf sowie (bei den Bedarfsfällen 2 und 3) von erhöhtem Bedarf an elektrischer Energie für Beleuchtung aufgrund generell längerem Aufenthalt mit entsprechendem Nutzerverhalten im Gebäude aus.

Für Bedarfsfall 1 wurde ein minimales Verbrauchsverhalten typischerweise während der völligen Abwesenheit der Bewohner angenommen, welches sich durch reduzierten Stromverbrauch, gesenkte thermische Energienutzung sowie völligen Wegfall des Warmwasserbedarfs kennzeichnet.

Die für den jeweiligen Bedarfsfall benötigte Speichergröße ergibt sich somit aus den kontinuierlichen Entnahmen in Verbindung mit dem gewünschten zu überbrückenden Zeitraum.

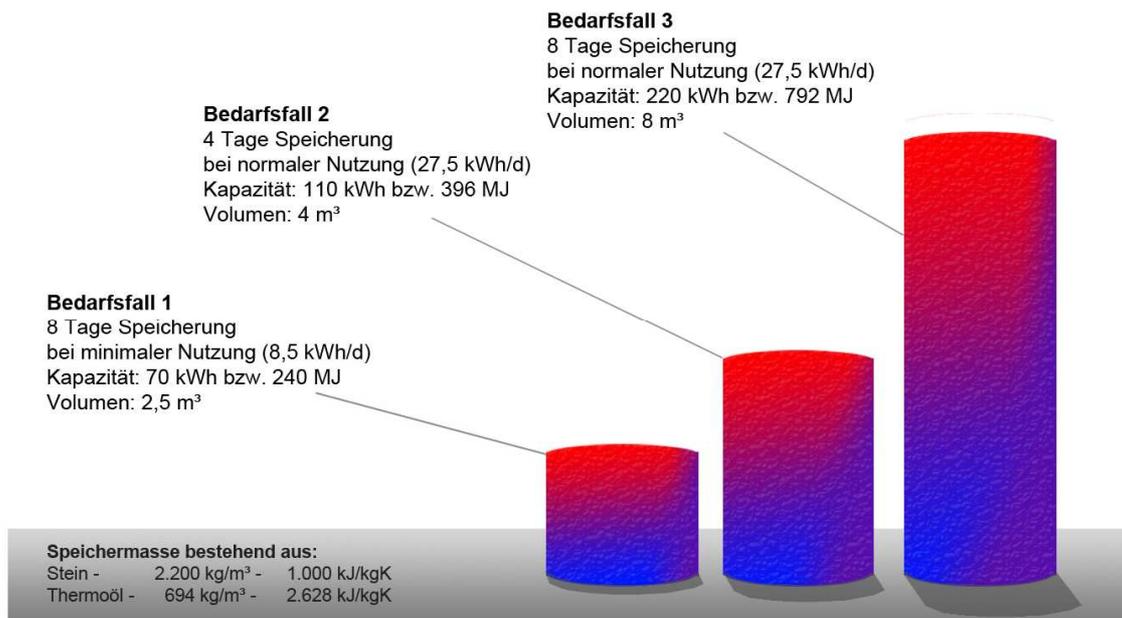


Abbildung 67: Berechnung der benötigten Speichervolumina für drei unterschiedliche Bedarfsfälle<sup>88</sup>

Die der Darstellung zugrundeliegende Kalkulation (s. Anhang) konnte zeigen, dass mit einem drucklosen Stein-Öl-Speicher mit 8,0 m<sup>3</sup> Volumen eine maximale Speicherung von 220 kWh möglich ist, was dem Bedarf der Verbraucher für einen Zeitraum von acht Tagen entspricht.

Die nachfolgende Graphik zeigt das Funktionsschema auf der Grundlage der durchgeführten Berechnungen für den Versorgungskreislauf des Energieautarken Hauses. Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt wurde, lässt sich das autarke Energiesystem mit sehr geringer externer Energiezufuhr bewerkstelligen.

<sup>88</sup> GrAT (2008).

# Funktionsschema „Energieautarkes Gebäude“

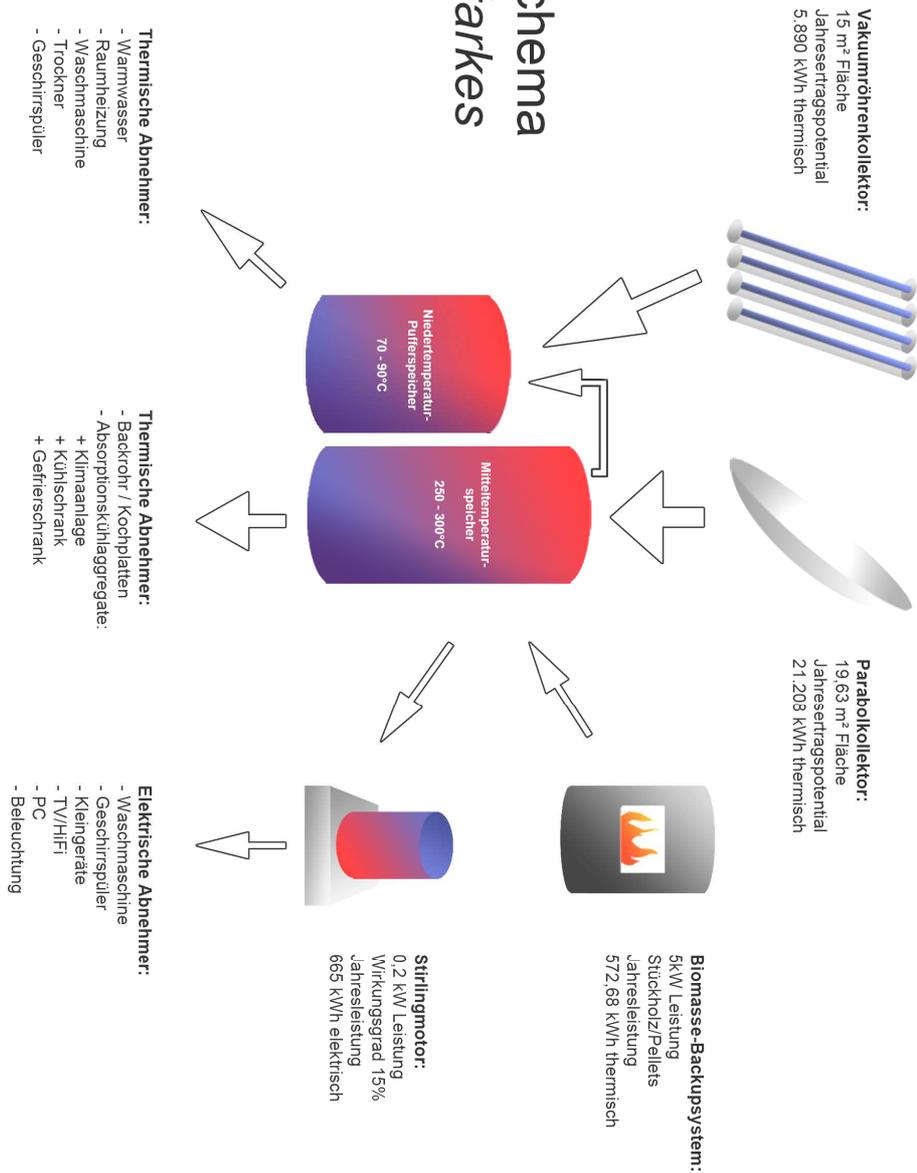


Abbildung 68: Funktionsschema des Energieautarken Hauses auf Basis der Kalkulationen am Standort Böhheimkirchen im Jahr 2007 (100 m<sup>2</sup> Nutzfläche, 4 Bewohner, 40 l Warmwasser/Person+Tag, HWB 6 kWh/m<sup>2</sup>a). Graphik: GrAT (2008).

Neben der Energiebereitstellung veranschaulicht die Darstellung vor allem auch die Bedeutung der Speichersysteme. Der wachsende Raumbedarf bei größerer Speicherdimensionierung und die damit verbundenen Schwierigkeiten der Unterbringung schlagen sich vor allem bei der architektonischen Gestaltung des Raumprogramms nieder, können jedoch durchaus intelligent und mit zusätzlichem Nutzen gelöst werden, wie im Folgekapitel dargestellt wird.

## **10.2 Architektonische Lösungen**

Bei der Umsetzung der Einzellösungen innerhalb eines architektonischen Gestaltungskonzeptes gilt es auf mehrere Punkte besonders einzugehen. Neben den örtlichen Gegebenheiten (Lage, Ausrichtungsvarianten des Gebäudes, Beschattungssituation, jährliche Sonnenstunden) sind vor allem Entscheidungen über die Kombination aus Energiebereitstellung und Energiespeicherung zu treffen. Diese Entscheidungen wurden bereits vorab im Kapitel 8, „Systemlayout“ getroffen und führten zur Auswahl des Systems „Schwerkrafthaus“ mit nutzungsbedingten Abänderungen und Erweiterungen, von dem hier nun als Basis ausgegangen werden soll. Das in der Kreislaufausführung angewandte Schwerkraftprinzip bringt einige Vorteile mit sich: Die Kollektoren können in Bodennähe angebracht und auch vom Gebäude selbst losgelöst installiert werden.

Zur Veranschaulichung der räumlichen Bedingungen dieses Systems wurden architektonische Modellstudien durchgeführt; zwei Konstruktionstypen und ein Entwurf für die Integration der Speicheranlage in das Gesamtgebäude sind das Ergebnis dieser Studien und werden im Folgenden dargestellt.

## Modelltyp 1



Abbildung 69: Modellstudie „Schwerkrafthaus“ mit Rinnenkollektor<sup>89</sup>

Das im Systemlayout angewandte Schwerkraftprinzip ermöglicht eine vertikal orientierte Gebäudeform. Der Hochtemperaturspeicher wird an diese Gebäudeform angepasst und fügt sich so ins architektonische Gesamtkonzept.

In diesem Modelltyp wird zwar eine große Kollektorfläche benötigt, durch die in der Studie vorgesehene horizontale Ausrichtung des Kollektors im Sockelbereich des Gebäudes ergibt sich jedoch keine Beeinträchtigung der architektonischen Gesamtstruktur.

## Modelltyp 2



Abbildung 70: Modellstudie „Schwerkrafthaus“ mit Parabolkollektor in Hanglage<sup>90</sup>

---

<sup>89</sup> Atelier Werner Schmidt.

<sup>90</sup> Atelier Werner Schmidt.

Aufgrund des Schwerkraftprinzips und der dadurch begünstigten Vertikalausrichtung ist die Errichtung des Energieautarken Hauses in einer Hanglage vorteilhaft, wie im Modelltyp 2 demonstriert wird. Durch ein erweiterbares Speicher- und Kollektorsystem gibt es kaum Einschränkungen für die Gesamtgebäudegröße.

### Entwurf für die Integration des Speichersystems

Ein zusätzlicher Entwurf zeigt Möglichkeiten auf, vom Grundkonzept des Schwerkrafthauses in weiterer Konsequenz zu profitieren. Der zentral eingebaute thermische Pufferspeicher kann die trotz effektiver Dämmung verlorene Wärmeenergie als Heizwärme an die ihn umgebenden Räume abgeben, sodass in der resultierenden Energiebilanz die tatsächlichen Verluste auf ein minimales Maß reduziert werden können (siehe Abbildung 71).

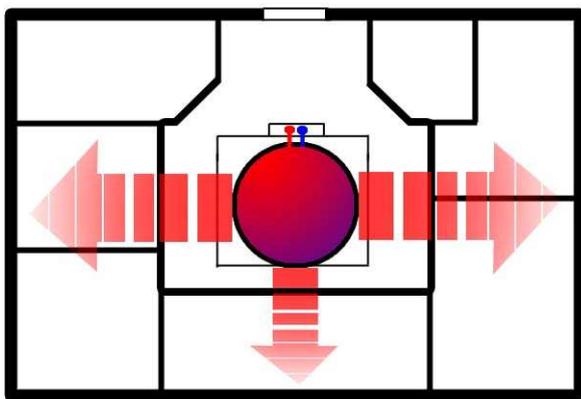


Abbildung 71: Grundriss EG eines Modelltyps für ein energieautarkes Gebäude mit zentralem Pufferspeicher<sup>91</sup>

Ein vertikales Lüftungssystem um den Pufferspeicher beugt einer sommerlichen Überhitzungsgefahr durch diese Wärmeabgabe vor. Für die räumliche Strukturierung bedeutet dies keine wesentlichen Nachteile, da der vertikal aufstrebende Speicher entweder direkt an den Erschließungs- und Installationskern gekoppelt werden kann oder diesen in seiner formalen Ausprägung schlicht ersetzt (Erschließung über Laubengang oder ausgelagertes Treppenhaus). In jedem Fall ist die vertikale Leitungsführung sehr vorteilhaft für eine Zusammenführung der verschiedenen Leitungsisolierungen.

<sup>91</sup> [http://www.jenni.ch/pdf/Prospekt\\_MFH.pdf](http://www.jenni.ch/pdf/Prospekt_MFH.pdf), 18.12.2008.

Die folgende Abbildung zeigt einen möglichen Gesamtentwurf für die architektonische Gestaltung eines energieautarken Gebäudes, in dem sämtliche energieerzeugende und -speichernde Komponenten bereits baulich integriert sind.

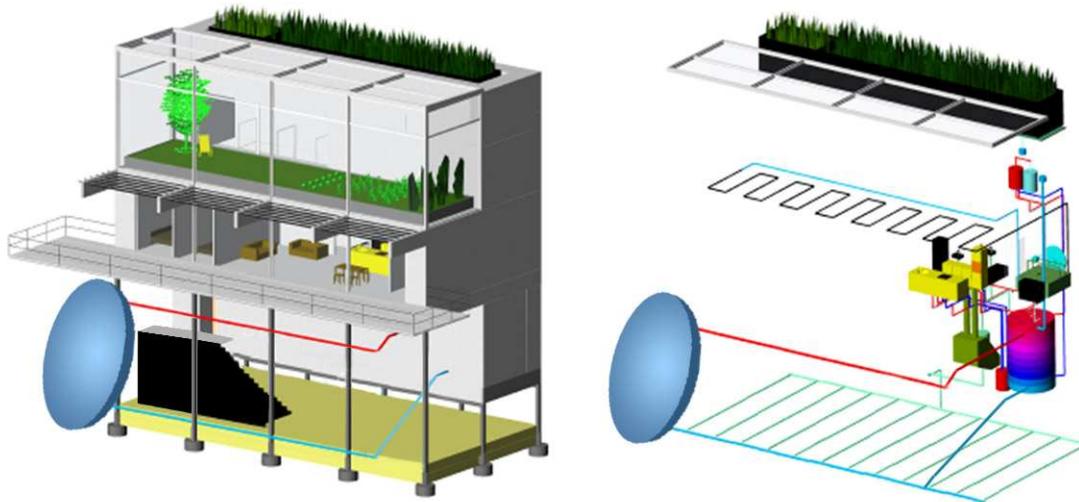


Abbildung 72: Architektonischer Gesamtentwurf für ein energieautarkes Haus

Im Gesamtentwurf können zusätzliche Möglichkeiten etwa zur Regenwassernutzung und zur Abwärmenutzung für ein Gewächshaus integriert werden. Die Haustechnik ist in einer kompakten Einheit geplant.

# 11. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

## 11.1 Erkenntnisse

Die Projektergebnisse des Projekts „Strategieentwicklung für energieautarke Gebäude“ zeigen, dass die solare Selbstversorgung mit Energie für Gebäude auch in unseren Breiten grundsätzlich möglich ist, dies vor allem in einer konsequenten Kombination aus Reduktion des Energieverbrauchs, Umstieg auf thermische Versorgung und Maximierung der Nutzung von Solarenergie.

Der spezielle nutzerzentrierte Ansatz enthält neue Möglichkeiten zur Adaptierung bestehender Komponenten bzw. Neuentwicklungen, die einer nachhaltigen Entwicklung entsprechen und gleichzeitig ökonomisches Potential aufweisen. Für die Energiebereitstellung kommen ausschließlich erneuerbare Energien zum Einsatz, zum größten Teil Solarenergie. Nachdem der Großteil der Haushaltsanwendungen thermisch versorgt werden kann und thermische Energie solar kostengünstiger gewonnen werden kann als elektrische, ist es für ein nachhaltiges Wirtschaften sinnvoll, möglichst viel Energie thermisch ohne Umwandlung bereitzustellen. Dadurch lassen sich graue Energie und Entsorgungsprobleme im Vergleich zum Einsatz von PV und Bleiakkus deutlich reduzieren. Das Ziel der Reduzierung des Energie- und Stoffeinsatzes wird damit im Konzept des Energieautarken Hauses erreicht.

Wesentlich für die Ausarbeitung der detaillierten Strategie war die Berücksichtigung der Nutzerseite bei der Konzeption der einzelnen Komponenten. Eine genaue Analyse und Berechnung des jeweiligen Energiebedarfs macht eine effiziente Anpassung des Energieversorgungssystems möglich und verhindert so überflüssige Verbräuche. Bei der Entwicklung der Erzeugungs-, Speicher- und Outputkomponenten wurde weiters auf die Faktoren Recyclingfähigkeit, einfache Wartung und Flexibilität in Bezug auf unterschiedliche Standort- und Nutzungsbedingungen geachtet.

Obwohl einige der Komponenten des Energieautarken Hauses schon verfügbar sind, macht erst die Ergänzung mit Neuentwicklungen und deren Integration in ein Gesamtsystem das gesteckte Ziel der Energieeffizienz und -autarkie erreichbar.

Die Grundidee des Projekts, Energie dezentral bereitzustellen, macht die so konzipierten Gebäude außerdem unabhängig vom bestehenden Infrastrukturnetz und reduziert auch die Wahrscheinlichkeit großflächiger Blackouts, wie sie in den letzten Jahren vorgekommen sind. Die Infrastrukturanschlusskosten entfallen völlig, was zusammen mit der Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern das Energieautarke Haus auch in ökonomischer Hinsicht zu einem Vorreiter in Sachen nachhaltigen Bauens macht.

## **11.2 Demonstrationsprojekt**

Die Ergebnisse fließen in das bereits in der Startphase befindliche Projekt „Zero Carbon Village“ ein. Dabei handelt es sich um ein Demonstrationsprojekt für die Weiterentwicklung einzelner Gebäuden bis hin zu einer gesamten Siedlung, die autark mit Energie versorgt wird.

Die Chancen für ein Demonstrationsprojekt sind durch die Verfügbarkeit eines Grundstücks und die aktive regionale Einbindung als hoch einzustufen. Das Folgeprojekt weist nicht nur in Hinblick auf Klimaschutz, Energieeinsparung und Wohnkomfort, sondern auch hinsichtlich Öffentlichkeitswirksamkeit und Dissemination und Öffentlichkeitswirksamkeit hohes Potential auf.

Aufbauend auf ersten Versuchen mit den entwickelten Vorprototypen werden weitere Entwicklungsschritte bis hin zu einem Gesamtprototypen gesetzt.

## **11.3 Zielgruppen des Projekts**

Von den Forschungsergebnissen aus dem vorliegenden Projekt profitieren all jene Branchen und Akteure, die ihre Kompetenzen im Bereich Komponenten- und Systementwicklung für eine kleinstrukturierte regenerative Energieversorgung in Österreich und für den Export ausbauen wollen. Dazu gehören Handwerksbetriebe und Komponentenproduzenten ebenso wie Architektur- und Bauingenieurbüros und deren Kunden (Immobilien-gesellschaften und Einzelkunden wie Hotels oder Großbetriebe). Für diese Betriebe und Akteure ergeben sich aufgrund der internationalen Vernetzung in diesem Projekt neue Kooperationsmöglichkeiten und die Chance, neue Märkte zu erschließen. Durch das gewonnene Know-how in einem

zukunftssträchtigen Bereich nehmen die angesprochenen Unternehmen auch im internationalen Wettbewerb eine starke Position ein.

Eine weitere Zielgruppe der Ergebnisse, der Bildungssektor, profitiert durch die unmittelbare Einbindung in das Projekt. Zukünftige AbsolventInnen der beteiligten Institution erreichen einen wesentlichen Wissensvorsprung in der Entwicklung nachhaltiger Lösungen, den sie in ihrem Berufsleben wie auch in zukünftiger Forschung gewinnbringend einsetzen können.

#### **11.4 Marktpotential und wirtschaftliche Machbarkeit**

Die technische Umsetzbarkeit des entwickelten Systems wurde ausführlich dargelegt. Dass das Konzept des Energieautarken Hauses auch wirtschaftlich machbar und sinnvoll ist, belegt bereits die Analyse des Markts für erneuerbare Energien im Bauwesen. Von dem internationalen Trend, der an steigenden Installationszahlen von Solarkollektoren, PV-Modulen und Pellets-Heizungen abzulesen ist, profitiert die österreichische Wirtschaft besonders, da großteils in Österreich entwickelte und produzierte Technologien und Produkte eingesetzt werden. Der Markt für thermische Solaranlagen in Österreich wächst ebenso wie der Export von Sonnenkollektoren seit einigen Jahren kontinuierlich. Die Solarwärmebranche zählt zu den am stärksten wachsenden Branchen Österreichs. Wachstum ist auch im Bereich von energieeffizienten Gebäuden zu beobachten. In Deutschland wird für 2010 prognostiziert, dass jeder fünfte Neubau (das entspricht 60.000 Wohneinheiten) in Passivhausstandard errichtet werden wird. Für sogenannte Drei-Liter-Häuser (Niedrigenergiehäuser) wird bis 2010 ein Anstieg von 250.000 Wohneinheiten kumuliert in Deutschland und 60.000 in Österreich und der Schweiz erwartet (Quelle: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme). Ein hohes Marktpotential für energieautarke Gebäude ist somit eindeutig gegeben.

Da weiter mit steigenden Preisen für die fossilen Energieträger sowie (infolge von zunehmender Zersiedelung) mit steigendem kommunalen Aufwand für die Netzanbindung von Neubauten gerechnet werden muss, ist daher davon auszugehen, dass das Konzept des Energieautarken Hauses auch aus rein ökonomischen Gründen auf eine wachsende Nachfrage treffen wird.

Die Kosten von Schlüsselkomponenten, wie zum Beispiel des Stirlingmotors, werden sich dabei ähnlich wie die Kosten von z. B. Photovoltaikpaneelen entwickeln, die sich aufgrund der steigenden Anzahl an installierten PV-Anlagen stetig reduzieren, während die elektrische Leistung durch technische Entwicklungen ständig zunimmt.

Mit einer ähnlichen Entwicklung dürfte auch beim Marktverhalten und bei der technischen Weiterentwicklung der Komponenten des Energieautarken Hauses zu rechnen sein, sobald diese vermehrt nachgefragt und eingesetzt werden.

### **Kriterien der wirtschaftlichen Machbarkeit**

Die Strategie für die Entwicklung energieautarker Gebäude zielt darauf ab, diese Systemlösung für möglichst viele Regionen der Erde anwendbar zu machen. Eine Adaption an die lokal gegebenen klimatischen, ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen soll möglich sein, Komponenten und Systemlösungen sollen mit dem jeweils verfügbaren Wissen, Know-how und den vorhandenen Materialien umsetzbar sein. Aus diesem Grundsatz der Angepassten Technologie leiten sich Planungskriterien ab, die auch zahlreiche wirtschaftliche Vorteile bieten. Die wesentlichsten dieser Kriterien sind im Folgenden angeführt:

- Entwicklung einfacher und effizienter Systemlösungen
- geringe Reparaturanfälligkeit
- geringer Wartungsaufwand
- Verwendung handelsüblicher Materialien und Komponenten
- Selbststeuerung und risikofreier Aufbau und Betrieb
- Orientierung an den Bedürfnissen der Nutzer

Um eine breite Anwendbarkeit zu erreichen, müssen die Kosten für die Komponenten des Gesamtsystems möglichst niedrig gehalten werden, was durch den Einsatz günstiger Materialien bis hin zur Verwendung von rezyklierten Komponenten ermöglicht wird.

Gerade für die Fertigung von Prototypen und Einzelanlagen ist die Verwendung kostengünstiger Teile von Vorteil.

## 11.5 Empfehlungen

Aus den Projektergebnissen lassen sich zukünftige wichtige Forschungsfragen ableiten, die durch eine Umsetzung der entwickelten Strategie „Wireless House“ in Form eines Gesamtprototypen und in weiterer Folge anhand mehrerer Demonstrationsanlagen beantwortet werden sollen.

Bei allen nachfolgenden Entwicklungsarbeiten, welche die erarbeitete Strategie weiterführen, ist der Fokus auf Angepasste Technologien und die Potentiale solarer Energieversorgung bewusst beizubehalten.

*Komponentenentwicklung:* Die Weiter- bzw. Neuentwicklung von Komponenten für das System des Energieautarken Hauses ist eine umfangreiche Herausforderung. Sie betrifft die Energiebereitstellung, die Speicherung und Verteilung sowie die Verbraucher gleichermaßen. Die wesentliche Aufgabe ist die Entwicklung von Solarkonzentratoren, Mitteltemperaturspeichern, Stirlingmotoren und von thermisch betriebenen Haushaltsgeräten, einschließlich Kühl- und Kochgeräten.

*Steuerungs- und Regelungstechnik:* Aufgrund der Unabhängigkeit des „Wireless House“ vom Infrastrukturnetz ist es sinnvoll, ein eigenes Steuerungssystem zu entwickeln, das speziell auf die Energieerzeugungs- und -verbrauchskomponenten des Energieautarken Hauses abgestimmt ist. Durch ein entsprechendes Lastmanagement, das den Energieverbrauch der Komponenten individuell anpasst und regelt, können Verbrauchsspitzen vermieden und eine effiziente Energienutzung im System gewährleistet werden.

*Detailanalyse des Zusammenspiels und der Dimensionierung von Komponenten im Gesamtsystem:* Die Funktionsweise eines Gesamtsystems soll anhand der Konstruktion eines Prototyps erforscht werden, der die Durchführung von praktischen Tests möglich macht. Durch computergestützte Berechnungen und Simulationen (z. B. mit dem Programm TRNSYS) kann außerdem das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten im Gesamtsystem optimiert werden.

*Potentialanalyse der Strategie:* Das entwickelte System für Energieautarke Gebäude soll neben der Berechnung der technischen Funktionsweise auch auf seine ökologischen Potentiale, beispielsweise hinsichtlich seines Beitrags zum

Klimaschutz, untersucht werden. Zusätzlich ist anhand von Szenarien herauszuarbeiten, welche (gesamt)wirtschaftlichen Auswirkungen bei einer Umsetzung der entwickelten Strategie zu erwarten sind und in welchem Ausmaß die Verbreitung des entstandenen Know-hows zu weiteren Entwicklungsarbeiten und somit zu weiterer Wertschöpfung beitragen kann.

## 12. Literaturverzeichnis

- Al-Addious M.: Berechnen der Größe von Wasserspeichern zum saisonalen Speichern von Wärme bei der ausschließlichen Wärmeversorgung von Häusern mit Solarkollektoren. Freiberg, 2006.
- Beckmann G., Gilli P.V.: Thermal Energy Storage. Wien, Springer Verlag, 1984.
- Bernd T.: Stirlingmotoren – Allgemeine Einführung auf Basis aktueller Forschungsergebnisse. 2. Deutscher Stirling Kongress, Stuttgart 2008.
- Betz R.: Sunmaschine. 2. Deutscher Stirling Kongress, Stuttgart 2008.
- bmvit, Solares Kühlen. Wien 2008.
- Bölscekey E., Brandstetter M., Charalampopoulos P.: Nachwachsende Rohstoffe für die Gebäuderevitalisierung, dargestellt und diskutiert an historischen Beispielen. Vortrag, Bauforschungstage 2003, Sopron 2003.
- Brown R.S. et al.: Yb<sub>14</sub>MnSb<sub>11</sub>: New High Efficiency Thermoelectric Material for Power Generation. Department of Chemistry, University of California, California 2006.
- Calmac: A Technical Introduction to Cool Storage Commercial Applications. CALMAC Manufacturing Corporation. 2002.
- Fechner H. et al.: Technologie-Roadmap für Photovoltaik in Österreich, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2007.
- IEA SHC, State of the Art - Medium Temperature Collectors. 2005.
- Jähniq Dagmar: Entwicklung und Optimierung eines Parabolrinnenkollektorsystems zur Erzeugung von Prozesswärme für industrielle Produktionsprozesse. AEE, Energiesysteme der Zukunft, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2005.
- Kleinwächter Jürgen: Das Magnesium-Hydrid-Alanat Speicher System. Vortrag auf der Tagung „Dezentrale Energiespeicherung – Schlüssel zur wirtschaftlichen Entfaltung Erneuerbarer Energien“. Wuppertal, 2003.
- Kühl H.-D.: Stirling Mikro KWK und Wärmepumpe in einem Prozess – Ein Weg zur bedarfsgerechten dezentralen Energieversorgung. 2. Deutscher Stirling Kongress,

Stuttgart 2008.

Lasselsberger L.: Technik der Holzfeuerungen. Bundesanstalt für Landtechnik (BLT), Wieselburg 2002.

Lohse R., Göppert S., Kunis C., Urbaneck T., Schirmer U. und Platzer B.: Be- und Entladesysteme für thermische Schichtenspeicher: Teil 2 – Untersuchungen des Beladeverhaltens. In: Chemie Ingenieur Technik, 80, No. 7, S. 935-943, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2008.

Mangold D., Benner M., Schmidt T.: Langzeit-Wärmespeicher und solare Nahwärme. In: BINE Informationsdienst: profiinfo I/01, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH, Eggstein-Leopoldshafen 2001.

Moser W. et al.: Small-scale Pellet Boiler with Thermoelectric Generator. Austrian Bioenergy Centre GmbH, Wieselburg 2006.

Müller H. Ch.: Anbindung eines Steinöl-Wärmespeichers an einen Fix-Fokus-Parabolspiegel. Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1995.

Müller-Steinhagen H., Drück H., Tamme R.: Neue Konzepte für die effiziente Speicherung von Wärme aus erneuerbaren Energieträgern. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart 2007.

Plataforma Solar de Almeria (PSA): Annual Report 2004. Spanien 2004.

Schakteburg L.: Die Eiskeller, Eishäuser und Lagerkeller sowie die Anlage von Kühlräumen für Schlachthöfe, Margarinefabriken u.s.w. 2. Auflage. Verlag von Ludwig Hofstetter, Halle an der Saale 1901.

Schlaich Bergermann und Partner: EuroDish-Stirling, Ein neues solares Dish-Stirling-Kleinkraftwerk mit segmentiertem Konzentrador für Einzelaufstellung. Stuttgart 2002.

Takeuchi M., Yutaka Abe, Shinji Suzuki, Zenjiro Nakaya and Atsuo Kitahara: Development of 1 kW Class Low Temperature Difference Indirect Heating Stirling Engine using cr-type Mechanism. Suction Gas Engine CO., Tokyo, Japan 2007.

Tamme R.: Speicherung für Hochtemperaturwärme. FSZ, 2005.

Tyroller, M., 2004, Solarsterilisator für Entwicklungsländer, Fachhochschule München, München.

Wagner U.: Energieautarke Versorgung von Gebäuden – Vision oder Utopie? Colloquium 2007 der Trurnit Gruppe, Siemens Forum 2007.

Wimmer et al., 2006, CSP-enabled Energy self-sufficient Housing, Solar Paces, Sevilla.

Wimmer et al., 2008, Wireless House, Self-sufficient and Sustainable Building Solutions. Konferenzbeitrag Sustainable Building Conference.

### **Internetquellen** (abgerufen am 17.05.2008)

<a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Mylar">http://de.wikipedia.org/wiki/Mylar</a>	<a href="http://www.bine.info/img/magazin/Abb20_01.gif">http://www.bine.info/img/magazin/Abb20_01.gif</a>
<a href="http://tinyurl.com/3xgbyb">http://tinyurl.com/3xgbyb</a>	<a href="http://www.bine.info/pdf/publikation/pro0402.pdf">http://www.bine.info/pdf/publikation/pro0402.pdf</a>
<a href="http://tinyurl.com/2hbrgy">http://tinyurl.com/2hbrgy</a>	<a href="http://www.calmac.com">http://www.calmac.com</a>
<a href="http://tinyurl.com/354h58">http://tinyurl.com/354h58</a>	<a href="http://www.ces.purdue.edu/extmedia/AE/AE-89.html">http://www.ces.purdue.edu/extmedia/AE/AE-89.html</a>
<a href="http://tinyurl.com/23hug6">http://tinyurl.com/23hug6</a>	<a href="http://www.ecozen.com/scook1.htm">http://www.ecozen.com/scook1.htm</a>
<a href="http://tinyurl.com/33d2g5">http://tinyurl.com/33d2g5</a>	<a href="http://www.fh-aachen.de/2061.html">http://www.fh-aachen.de/2061.html</a>
<a href="http://tinyurl.com/2omfbx">http://tinyurl.com/2omfbx</a>	<a href="http://www.fragol.de">http://www.fragol.de</a>
<a href="http://tinyurl.com/2vhjlg">http://tinyurl.com/2vhjlg</a>	<a href="http://www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf">http://www.hi-z.com/documents/Hi-Z.Brochure.2006.pdf</a>
<a href="http://tinyurl.com/2t63x2">http://tinyurl.com/2t63x2</a>	<a href="http://icneer.gadhiasolarenergy.com/cms/index.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=146&amp;Itemid=53">http://icneer.gadhiasolarenergy.com/cms/index.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=146&amp;Itemid=53</a>
<a href="http://tinyurl.com/27oh5j">http://tinyurl.com/27oh5j</a>	<a href="http://www.migweld.de">http://www.migweld.de</a>
<a href="http://tinyurl.com/3bedmb">http://tinyurl.com/3bedmb</a>	<a href="http://www.mirrorsheeting.com/">http://www.mirrorsheeting.com/</a>
<a href="http://tinyurl.com/2n67fl">http://tinyurl.com/2n67fl</a>	<a href="http://www.nrel.gov/csp/">http://www.nrel.gov/csp/</a>
<a href="http://tinyurl.com/ynqjx5">http://tinyurl.com/ynqjx5</a>	<a href="http://www.pipesystems.com">http://www.pipesystems.com</a>
<a href="http://tinyurl.com/23rn9s">http://tinyurl.com/23rn9s</a>	
<a href="http://www.abetterfocus.com/files/Reflector_Milestone_Report_9-05.pdf">http://www.abetterfocus.com/files/Reflector_Milestone_Report_9-05.pdf</a>	
<a href="http://www.abetterfocus.com/files/SOL-04-1055_May_05_12.pdf">http://www.abetterfocus.com/files/SOL-04-1055_May_05_12.pdf</a>	
<a href="http://www.acrosolarlasers.com/">http://www.acrosolarlasers.com/</a>	

[http://www.solarladen.de/download/pdf/sonstiges/module\\_und\\_systeme\\_am\\_markt.pdf](http://www.solarladen.de/download/pdf/sonstiges/module_und_systeme_am_markt.pdf)

<http://www.sbp.de>

<http://www.termo-gen.com/pages/generators.html>

<http://www.veoe.at>

### 13. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamtsystem „Energieautarkes Haus“ („Wireless House“) – Überblick über die Zusammenhänge der verschiedenen Komponenten nach Temperaturniveaus und thermischem und elektrischem Betrieb ..... 11

Abbildung 2: Entwicklungsbedarf zum Erreichen höherer Energiedichten (Müller-Steinhagen, Drück, Tamme, 2007) ..... 21

Abbildung 3: Grundstruktur des Systems „24h-Sonnenkraftwerk“ ..... 22

Abbildung 4: Berechnungen des Energieverbrauchs für einen Haushalt unter Berücksichtigung der verwendeten Haushaltsgeräte mit konventioneller Energieversorgung (Altbau, Neubau) und im Konzept des Energieautarken Hauses (der Heizenergiebedarf orientiert sich an der im S-HOUSE berechneten Energiekennzahl von 6kWh/m<sup>2</sup>a) ..... 34

Abbildung 5: Durchschnittlicher elektrischer Nutzenergiebedarf im Tagesverlauf ..... 36

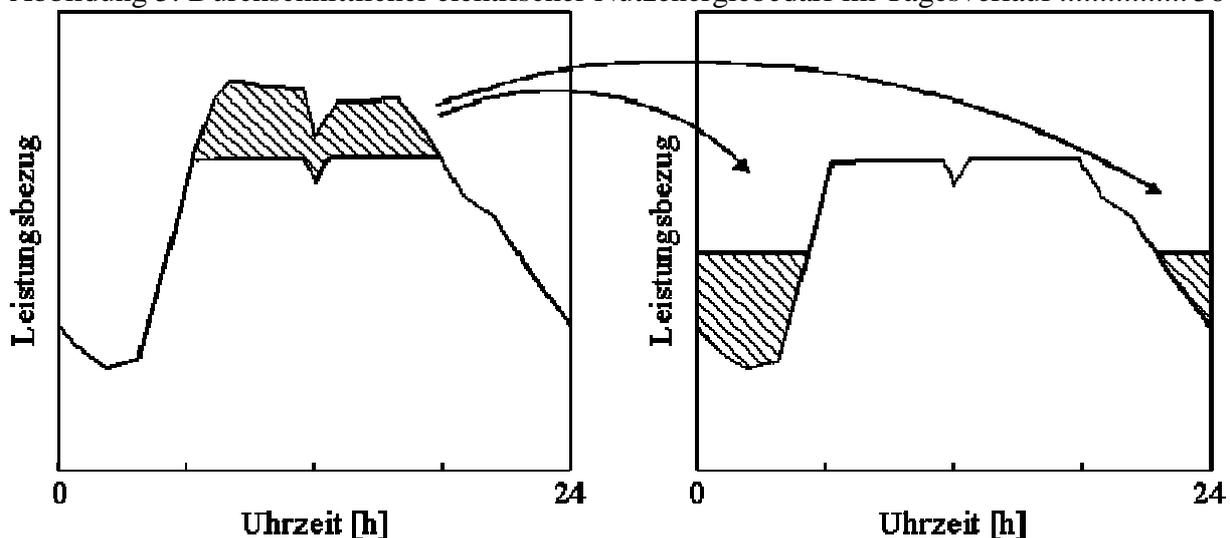


Abbildung 6: Beispiel für Lastmanagement: Reduktion der Lastspitzen durch Änderung der Ein- und Ausschaltzeiten von Verbrauchern... **Error! Bookmark not defined.**

Abbildung 7: Funktionsschema „Schwerkrafthaus“ mit Darstellung von Kollektor, Speicher und Stromerzeuger ..... 37

Abbildung 8: Funktionsschema „Dampfhaus“ mit Darstellung von Kollektor, Speicher, Kondensator und Stromerzeuger ..... 38

Abbildung 9: Funktionsschema des „Lufthauses“ mit Darstellung von Kollektoren, Speicher und Stromerzeuger ..... 39

Abbildung 10: Energetisches Funktionsschema „Energieautarkes Haus“, System „Wireless House“ ..... 43

Abbildung 11: links: SOLITEM PTC1000; rechts: PSA FASOL ..... 46

Abbildung 12: Links: 2m<sup>2</sup>-Scheffler-Kollektor, rechts: 50m<sup>2</sup>-Kollektor in Indien ..... 46

Abbildung 13: Bau eines Prototyps (Rinnenkollektor) ..... 47

Abbildung 14: Fix-Fokus-Scheffler-Kollektoren ..... 52

Abbildung 15: System mit mitbewegtem Receiver, der gleichzeitig den Stirlingmotor beinhaltet ..... 52

Abbildung 16: Arbeitsweise des Nachführungssystems über den Tagesverlauf ..... 54

Abbildung 17: Arbeitsweise des Nachführungssystems über den Tagesverlauf (südseitig) ... 54

Abbildung 18: Prototyp der Nachführung für den Parabolkollektor ..... 55



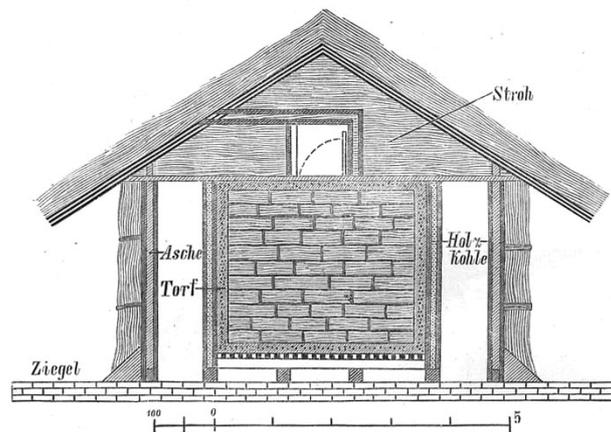
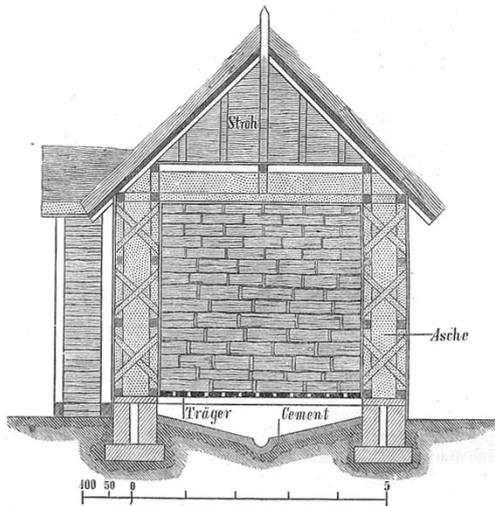


Abbildung 35: Eishaus .....	74
Abbildung 36: Funktionsskizze des Kältekollektors und Kältespeichers .....	76
Abbildung 37: Funktionsskizze Lade- bzw. Entladevorgang .....	77
Abbildung 38: Prototyp Eisspeicher .....	78
Abbildung 39: Schemazeichnung Peltier-Element .....	81
Abbildung 40: Thermoelektrischer Generator (TEG) mit 500 Watt Leistung in einer Verbrennungsanlage, Hitzequelle ist heißes Öl .....	82
Abbildung 41: TEG mit einer Leistung von 1 kW im Abgasstrom eines 300-PS-LKWs integriert .....	82
Abbildung 42: TEG, im Auspuff des LKWs installiert .....	82
Abbildung 43: links: Der Ofen ist mit zwei Thermoelementen ausgestattet, die 20 W liefern und die Ventilatoren des Ofens antreiben; rechts: Pelletsofen mit zwei TEG-Modulen, die ausreichend Energie für den Betrieb der Ventilatoren, der Brennstoffzuführung und der Steuerung des Ofens bereitstellen .....	83
Abbildung 44: Thermoelektrisches Modul, beheizte Seite (rechts), gekühlte Seite (links).....	84
Abbildung 45: Isolationsschicht sind zwei Keramikscheiben.....	84
Abbildung 46: Wirkungsgrad des Thermoelektrischen Moduls HZ-20 in Abhängigkeit von den Temperaturen auf der heißen und auf der kalten Seite .....	85
Abbildung 47: Versuchsaufbau mit einem Thermoelektrischen Generator mit einer Leistung von 100 W .....	86
Abbildung 48: Versuchsaufbau Thermoelektrischer Generator, betrieben mit Thermoöl unter Nutzung des Schwerkraftprinzips, Thermoölkreislauf rechts, Kühlwasserkreislauf links .....	87
Abbildung 49: Funktionsprinzip Stirlingmotor.....	89
Abbildung 50: Stirlingmotor-Generator V161 von SOLO.....	91

Abbildung 51: Bau des Stirlingmotor-Prototyps .....	92
Abbildung 52: Zusammenbau des Stirlingmotor-Prototyps.....	92
Abbildung 53: Vorbereitungsarbeiten und Inbetriebnahme des Stirlingmotors .....	93
Abbildung 54: Testlauf und Vermessung der Ausgangsleistung .....	93
Abbildung 55: Systemskizze Stirlingmotor .....	94
Abbildung 56: Wirkungsgradkurve Stirlingmotor bei 600 kPa Buffer Druck.....	95
Abbildung 57: Adsorptionskältemaschine .....	96
Abbildung 58: Bau des Prototyps der Absorptionskühlmaschine.....	97
Abbildung 59: Anbringen der Isolierung der Thermoölversorgungsleitungen für Kühlgerät und Backrohr .....	97
Abbildung 60: links: Herdplatte für den Prototyp eines mit Thermoöl betriebenen Küchenofens, rechts: Umbau eines herkömmlichen Küchenofens zu einem mit Thermoöl betriebenen Küchenofen.....	99
Abbildung 61: Umbau eines elektrisch betriebenen Backrohrs zu einem Thermoölbackofen	99
Abbildung 62: Designentwicklungen für einen kombinierten, mit Thermoöl betriebenen Küchenofen und für eine Kochplatte .....	100
Abbildung 63: Darstellung der Klimadaten des Jahres 2007 am Standort Böheimkirchen, NÖ .....	103
Abbildung 64: Vergleich Parabolspiegel unterschiedlicher Durchmesser nach Energieeintrag .....	104
Abbildung 65: Vergleich von solarem Energieangebot pro Monat im Jahr 2007 in Böheimkirchen (Solarkollektor-Durchmesser 5 m) und durchschnittlichem Energiebedarf auf Basis des Wireless House im Jahr.....	105

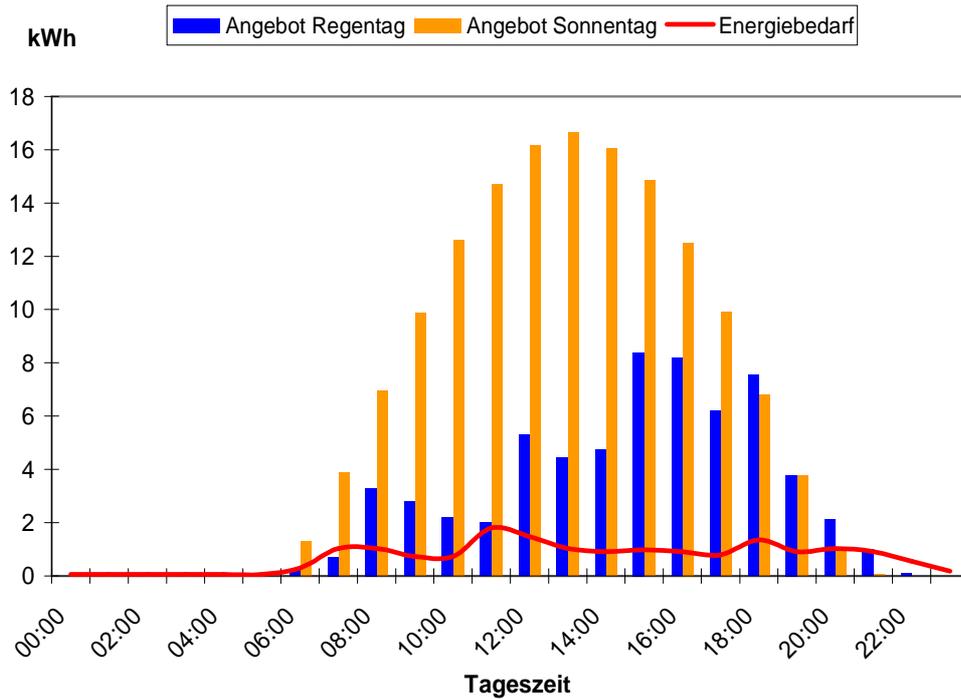


Abbildung 66: Vergleich des Energiebedarfs eines Tages mit dem Angebot an Solarenergie im Juli 2007 ..... 106

Abbildung 67: Vergleich des Energiebedarfs eines Tages mit dem Angebot an Solarenergie im Winter 2007..... 107

Abbildung 68: Restenergiebedarf im Verlauf eines typischen Regen- und Sonnentags im Dezember 2007 ..... 108

Abbildung 69: Berechnung der benötigten Speichervolumina für drei unterschiedliche Bedarfsfälle ..... 110

Abbildung 70: Funktionsschema des Energieautarken Hauses auf Basis der Kalkulationen am Standort Böheimkirchen im Jahr 2007 (100 m<sup>2</sup> Nutzfläche, 4 Bewohner, 40 l Warmwasser/Person+Tag, HWB 6 kWh/m<sup>2</sup>a). Graphik: GrAT (2008). ..... 111

Abbildung 71: Modellstudie „Schwerkrafthaus“ mit Rinnenkollektor..... 113

Abbildung 72: Modellstudie „Schwerkrafthaus“ mit Parabolkollektor in Hanglage..... 113

Abbildung 73: Grundriss EG eines Modelltyps für ein energieautarkes Gebäude mit zentralem Pufferspeicher..... 114

Abbildung 74: Architektonischer Gesamtentwurf für ein energieautarkes Haus..... 115

## 14. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektziele und Methoden zu ihrer Erreichung .....	16
Tabelle 2: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Solarkollektoren .....	19
Tabelle 3: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Biomassespeicheröfen .....	20
Tabelle 4: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von MT-Speichersystemen .....	21
Tabelle 5: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von NT-Speichersystemen .....	23
Tabelle 6: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Kältekollektoren und -speichern .....	24
Tabelle 7: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften sonstiger Speichersysteme .....	25
Tabelle 8: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Komponenten zur Erzeugung elektrischer Energie.....	26
Tabelle 9: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Komponenten zur Erzeugung von Kälte aus Wärme .....	28
Tabelle 10: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Herd und Backofen.....	28
Tabelle 11: Entwicklungsstand, technische und wirtschaftliche Eigenschaften von Anschluss-Systemen .....	29
Tabelle 12: Durchschnittsverbrauch an elektrischer Energie in kWh pro Jahr für Haushalte mit unterschiedlicher Personenanzahl .....	33
Tabelle 13: Energiebedarf gegliedert nach Energieformen.....	35
Tabelle 14: Solarkonzentratoren .....	45
Tabelle 15: Überblick über Reflektormaterialien für den Bau eines Parabolkonzentrator-Prototypen .....	50
Tabelle 16: Biomasseöfen .....	58
Tabelle 17: Vergleich der Metalle Aluminium und Eisen als mögliche Füllmaterialien für den Wärmetauscher .....	63
Tabelle 18: Mitteltemperatur-Speichersysteme .....	64
Tabelle 19: Niedertemperatur-Wärmespeicher .....	73
Tabelle 20: Kältekollektoren und -speicher .....	75
Tabelle 21: Sonstige Energiespeicher .....	78
Tabelle 22: Komponenten zur Erzeugung elektrischer Energie.....	80
Tabelle 23: Kälteanlagen.....	95
Tabelle 24: Herd und Backofen (thermisch betrieben) .....	98
Tabelle 25: Hochtemperaturanschlüsse.....	101
Tabelle 26: Energiebilanz energetischer Restbedarf .....	108

# 15. Anhang

4 Tage normale Nutzung		8 Tage normale Nutzung (Komfortfall)		8 Tage minimale Nutzung (Abwesenheit)	
durchschnittlicher Tagesverbrauch für 4 Tage	27,50 kWh 110,00 kWh	durchschnittlicher Tagesverbrauch für 8 Tage	27,50 kWh 220,00 kWh	durchschnittlicher Tagesverbrauch* für 8 Tage in Abwesenheit (min. Nutzung)	8,26 kWh 66,08 kWh
entspricht	396000,00 kJ 396,00 MJ	entspricht	792000,00 kJ 792,00 MJ	entspricht	237888,00 kJ 237,89 MJ
<b>Temperatursprung</b>		<b>Temperatursprung</b>		<b>Temperatursprung</b>	
Rücklauf	360 K	Rücklauf	360 K	Rücklauf	360 K
Vorlauf	400 K	Vorlauf	400 K	Vorlauf	400 K
<b>Massenverhältnis</b>		<b>Massenverhältnis</b>		<b>Massenverhältnis</b>	
Thermooil	0,7	Thermooil	0,7	Thermooil	0,7
Stein	0,3	Stein	0,3	Stein	0,3
<b>Rohdichte</b>		<b>Rohdichte</b>		<b>Rohdichte</b>	
Thermooil	694 kg/m <sup>3</sup>	Thermooil	694 kg/m <sup>3</sup>	Thermooil	694 kg/m <sup>3</sup>
Stein	2200 kg/m <sup>3</sup>	Stein	2200 kg/m <sup>3</sup>	Stein	2200 kg/m <sup>3</sup>
<b>spez. Wärmekapazität</b>		<b>spez. Wärmekapazität</b>		<b>spez. Wärmekapazität</b>	
Thermooil	2,628 kJ/kg K	Thermooil	2,628 kJ/kg K	Thermooil	2,628 kJ/kg K
Stein	1,000 kJ/kg K	Stein	1,000 kJ/kg K	Stein	1,000 kJ/kg K
<b>Masseberechnung</b>		<b>Masseberechnung</b>		<b>Masseberechnung</b>	
$Q=m^*(c1+c2)*(t2-t1)$		$Q=m^*(c1+c2)*(t2-t1)$		$Q=m^*(c1+c2)*(t2-t1)$	
$m=Q/[(0,7*c1+0,3*c2)*(400-360)]$		$m=Q/[(0,7*c1+0,3*c2)*(400-360)]$		$m=Q/[(0,7*c1+0,3*c2)*(400-360)]$	
<b>Masse gesamt</b>		<b>Masse gesamt</b>		<b>Masse gesamt</b>	
davon Masse Thermooil	4627,03 kg	davon Masse Thermooil	9254,07 kg	davon Masse Thermooil	2779,58 kg
davon Masse Stein	3238,92 kg	davon Masse Stein	6477,85 kg	davon Masse Stein	1945,71 kg
	1388,11 kg		2776,22 kg		833,88 kg
<b>Volumenberechnung</b>		<b>Volumenberechnung</b>		<b>Volumenberechnung</b>	
$V=m/roh$		$V=m/roh$		$V=m/roh$	
$V=m/(0,7*roh1+0,3*roh2)=$	4,04 m <sup>3</sup>	$V=m/(0,7*roh1+0,3*roh2)=$	8,08 m <sup>3</sup>	$V=m/(0,7*roh1+0,3*roh2)=$	2,43 m <sup>3</sup>

\* Aufrechterhaltung der Innenraumtemperatur, Standby-Stromverbrauch (Kühlschrank, etc)

SB08 Wireless House Paper

Klimadaten Messergebnisse