

# DIPLOMARBEIT

## Master Thesis

### **Langzeitwärmespeicher**

Long term heat reservoir

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

(Betreuer)

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn Thomas Bednar

E 206/2

Institut für Hochbau und Technologie  
Forschungsbereich für  
Bauphysik und Schallschutz

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

(Verfasser)

Kis Istvan

E 0925143

Kiesstraße 9  
3071 Böheimkirchen

Wien, am

eigenhändige Unterschrift

## Vorwort

Für die Betreuung dieser Arbeit möchte ich mich bei Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn Thomas Bednar und Univ. Ass. Dipl.- Ing. Maximilian Neusser herzlich bedanken, denn speziell durch ihre wertvollen Anregungen, konnte diese Arbeit im vorliegenden Umfang ausgeführt werden.

Besonderer Dank gilt auch meiner Frau Stefanie, für die Geduld und Motivation, die sie immer wieder aufbrachte, denn durch ihr Interesse half sie mir bei der Suche nach den passenden Wörtern und verbesserte damit die Verständlichkeit dieser Arbeit. Für die Unterstützung bei dieser Arbeit gilt auch besonderer Dank meiner Familie und meinen Freunden, die mich auf unterschiedlichste Art und Weise vorangebracht haben.

Besonderer Wert wurde auf die Nachvollziehbarkeit und das Verständnis der grundlegenden Probleme gelegt, um das komplexe Wissensgebiet der Energiespeicherung leichter verständlich zu machen. Durch eine Überleitung von der Theorie bis zur praktischen Anwendung, mit Hilfe von Beispielen und vorhandenen Daten, werden die derzeitige Anwendung und das Potential von alternativen Energiequellen aufgezeigt. Mit den praktischen Beispielen soll diese Arbeit als Beitrag zur Energiewende im Sinne des Umweltschutzes dienen.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1. Motivation	5
1.2. Ziel und Nutzen	6
1.3. Methodik	12
<b>2. Überblick Theorie und Anwendungen</b>	<b>13</b>
2.1. Die drei Hauptsätze der Thermodynamik	13
2.1.1. <i>Erster Hauptsatz der Thermodynamik</i>	13
2.1.2. <i>Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik</i>	14
2.1.3. <i>Dritter Hauptsatz der Thermodynamik</i>	15
2.2. Der Energieerhaltungssatz	15
2.3. Energie und Energiewirtschaft für Haushalte	15
2.3.1. <i>Wärmeenergie</i>	16
2.3.2. <i>Mechanische Energie</i>	17
2.3.3. <i>Chemische Energie</i>	18
2.3.4. <i>Elektrische Energie</i>	18
2.3.5. <i>Elektromagnetische Strahlungsenergie</i>	19
2.4. Energieumwandlung und Speicherung	22
2.4.1. <i>Carnot'sche Wirkungsgrad</i>	24
2.4.2. <i>Energiespeicher (Allgemein)</i>	28
<b>3. Methodische Grundlagen und Anwendung</b>	<b>31</b>
3.1. Energiebedarf für Einfamilienhäuser	32
3.2. Sonnenenergie	36
3.2.1. <i>Solarthermie</i>	38
3.2.2. <i>Photovoltaik Anlagen</i>	42
3.3. Wärmepumpen	44
3.4. Speichermöglichkeiten für Einfamilienhäuser	46
3.4.1. <i>A/V-Verhältnis</i>	46
3.4.2. <i>Dämmung</i>	48
3.4.3. <i>Speicherformen</i>	49
3.5. Warmwasserspeicher	51
3.5.1. <i>Pufferspeicher/ Solarspeicher</i>	51
3.5.2. <i>Saisonale Wärmespeicherung</i>	52
3.5.3. <i>Tiefenbohrungen</i>	55
<b>4. Forschungsfrage</b>	<b>56</b>
<b>5. Modellierung</b>	<b>57</b>
5.1. Berechnungsmodelle zur Ermittlung des Endenergiebedarfes	57
5.1.1. <i>Anforderungen</i>	57

---

5.1.2.	<i>Monatsbilanzverfahren gemäß Energieausweis</i>	61
5.1.3.	<i>Stündliche Bilanzierung mit halb synthetischen Klimadaten in Anlehnung an ÖNorm H 5056</i>	63
5.1.4.	<i>Gebäudesimulationen mit Speichermassen</i>	69
5.1.5.	<i>Reduzierte Gebäudemodelle</i>	71
5.2.	Berechnungsmodelle zur Simulation von saisonalen Speichern	73
5.2.1.	<i>Saisonale Speicherung mit Warmwasserspeichern</i>	73
5.2.2.	<i>Saisonale Energiespeicherung mit Tiefenbohrungen</i>	76
5.3.	Konversionsfaktoren	79
<b>6.</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>80</b>
6.1.	Warmwasserspeicher	80
6.2.	Tiefenbohrungen	90
6.2.1.	<i>Wirkungsprinzip von Tiefenbohrungen und Leistungszahlen für Wärmepumpen</i>	91
6.2.2.	<i>Allgemeine Einflussfaktoren auf Tiefenbohrungen und deren Wirkungen</i>	96
6.2.3.	<i>Spezielle Einflussfaktoren auf Tiefenbohrungen und deren Wirkungen</i>	96
6.2.4.	<i>Zusammenwirkung des Solarkollektormodells mit der Tiefenbohrung</i>	103
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>112</b>
	Literaturverzeichnis	116
	Anhang A- Datenblätter	121
	Anhang B- Referenzobjekt	128
	Anhang C- Neu entwickeltes Modell zur saisonalen Wärmespeicherung mit Tiefenbohrung in Simulink	130

---

## Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Reduktion des Primärenergiebedarfes von Haushalten, welche einen wesentlichen Anteil am globalen Primärenergiebedarf haben. Es wird nach Möglichkeiten gesucht, Sonnenenergie in großen Speichermassen, wie Tiefenbohrungen und großen Warmwasserspeichern, bereitzuhalten.

Das Ziel dieser Arbeit liegt darin, möglichst viel Solarenergie zu speichern, um möglichst wenig Primärenergie für die Wärmebereitstellung zu verbrauchen. Das Themengebiet der Wärmespeicherung wird mit unterschiedlichen Zugängen beschrieben und daraus folgende Problemstellungen aufgezeigt. Im Besonderen wurde auf die Zusammenfassung der physikalischen Grundprinzipien Wert gelegt, um die Grenzen der technischen Möglichkeiten aufzuzeigen. Zum allgemeinen Verständnis werden die bestehenden globalen Energieströme ebenfalls dargestellt.

Plakativ werden für den österreichischen Energiehaushalt unterschiedliche alternative Energiequellen diskutiert, welche derzeit durch die Ökostromförderung ein verhältnismäßig hohes Wachstum am Markt besitzen. Durch die zunehmend komplexer werdende Aufteilung der Energieströme, müssen einfache Modelle geschaffen werden, um den Stromverbrauch und das Netzverhalten zu modellieren und in weiterer Folge zu bemessen.

Im Zuge dieser Arbeit wurden Voruntersuchungen zur Speicherung der Sonnenenergie mit Hilfe von Warmwasserspeichern und Massenspeichern in Form von Tiefenbohrungen durchgeführt. Aufgrund der einfachen Umsetzung und der Bedingung, dass der Fokus auf Einfamilienhäusern liegt, wurden nähere Untersuchungen zur Speicherung der Sonnenenergie mit Hilfe von Tiefenbohrungen umgesetzt.

Die Bestimmung des Speicherverhaltens von saisonal bewirtschafteten Solarenergiespeichern, setzt Kenntnisse zu den Anlagekomponenten, Gebäudebauteile und Rahmenbedingungen voraus. In dieser Arbeit wurde auf bereits validierter Modelle zurückgegriffen, welche im Zuge der früheren Forschungstätigkeit am Institut für Hochbau und Technologie, an der Technischen Universität Wien, entwickelt wurden. Einerseits wurde ein detailliertes Gebäudemodell verwendet und andererseits ein Modell für Tiefenbohrungen, wobei die vorhandenen Programme durch eine Vielzahl von Rand- und Übergangsbedingungen komplex zu begreifen sind. Außerdem arbeiten beide, zur Verfügung gestellten Modelle, in unterschiedlichen Simulationsschrittweisen, die aus physikalischer Sicht absolut unverträglich für Ergebnissenauigkeit sind. Zur Bereitstellung eines geeigneten Modells, wurden die bestehenden Modelle abschnittsweise von MATLAB R2015b® (in Folge kurz: Matlab) in MATLAB R2015b- Simulink® (in Folge kurz: Simulink) eingebettet. Durch die graphische Darstellung in Simulink, in Form eines Petri-Netzes, werden in weiterer Folge der Überblick über das bestehende Modell sowie Adaptionmöglichkeiten erleichtert und Schnittstellen zwischen Bauteilen klar ersichtlich. Dem Rechenprozess des Modells mussten durch die Implementierung in Simulink neue Arbeitsabläufe zugewiesen werden, wodurch die bestehenden Modelle abschnittsweise verglichen wurden.

Nach der Berechnung eines Gebäudemodells mit halb synthetischen Klima Daten, wurde dieses Modell mit einem Referenzprojekt verglichen und ein vereinfachtes Modell erstellt, wodurch die Gesamtkosten der Anlage und das Einsparungspotenzial der Kohlendioxidemissionen in Zusammenwirkung mit einem Speichermodell bewertet werden konnten. Die Variation der Randbedingungen und der Anlagenkomponenten bieten Einblick zu möglichen Optimierungsmöglichkeiten und lassen Erkenntnisse zur Planung von neuen Gebäuden zu.

Die gesamten bestehenden Bauteile und Regelmechanismen des detaillierten Gebäudemodells, konnten durch die zeitintensive Implementierung der vorgegebenen Modelle von Matlab zu Simulink mit den erforderlichen Funktionskontrollen nicht vollständig umgesetzt werden. Aufbauend auf das entwickelte Modell, können weitere Bauteile des bestehenden Gebäudemodells, eingegliedert und auf übersichtliche Weise zusätzliche Bauteile und Regelmechanismen ergänzt werden, um umfangreichere Studien durchzuführen. Außerdem können in weiterer Folge Erkenntnisse über die Auswirkung von externen Steuerungen von Heizungen über „Smart Grids“ gewonnen werden und Abweichung der Simulationsergebnisse von detaillierten zu vereinfachten Gebäudemodellen, in Form von thermischen Netzwerken, ausgewertet werden.

---

## Abstract

The Master Thesis on hand deals with the reduction of primary energy requirement of households, which have an essential share on the global primary energy requirement. Possibilities are searched for to keep solar energy in big reservoirs such as depth drillings or big hot water reservoirs.

The aim of this paper is to store as much solar energy as possible to use as less primary energy for warmth provision as possible. The topic of heat storage is being described in different ways and resulting problems are shown. On the basic laws of physics there was an attached importance, in particular to show the limits of what is technically possible. For general understanding the existing global energy fluxes are shown as well.

For the Austrian energy budget different forms of alternative energy are being discussed strikingly because there is a proportionally high increase on the energy market because of the current sponsorship for green electricity. Because of the division of energy flux, which is getting complex more and more, there must be simple models to mold the electric power consumption as well as the behavior of the grid and to measure the results subsequently.

In the course of this Master Thesis reconnaissance investigations for the storage of solar energy by dint of hot water tanks and bulk storages in terms of depth drillings were executed. Because of the easier implementation and the condition that single family households are focused, detailed examinations on storing solar energy by dint of depth drillings, were realized.

The determination of the storage properties of seasonal operated solar energy storages, requires the knowledge of plant components, parts of the building and general requirements. In this paper validated models were used, which were developed in former research work at the Institute of Building Construction and Technology at the Technical University Vienna. On the one hand, a detailed model of buildings was used and on the other hand, a model for depth drillings, where upon the existing programs are hard to understand because of an amount of edge and transition conditions. Furthermore, both provided models work with different simulation steps, which is though physically absolutely incompatible with an exact result. For making a suitable model available, the existing models were implemented in sections from MATLAB R2015b® (short: Matlab) to MATLAB R2015b- Simulink® (short: Simulink). Because of the graphic presentation of Simulink in terms of a Petri-net, the overview of the existing model as well as possibilities of adaption are subsequently lightened and cutting sites between components are clear to see. By the implementation to Simulink, new operational procedures have been allocated to the computing process of the model whereby the existing models were compared step-by-step.

After the reunion of the simulation models, the analysis of the results was evaluated on the basis of a built example, where with the overall costs of the constructions and the potential savings were able to be rated. The variation of the boundary conditions and the components of the construction provide an insight into possibilities of improvement and allow insights to the planning of new buildings.

The whole existent components and control mechanism of the detailed building model were not able to be realized completely because of the time-consuming implementation of the existing models from Matlab to Simulink with the function checks required. Based on the developed model, further elements of the existing building model are able to be integrated and extra elements are able to be added in a clear way to conduct extensive studies. Furthermore, insights are able to be gained subsequently about the impact on external regulation from heating via "Smart Grids" and divergences of the simulation results from the detailed to the simplified building model, in terms of thermic network, are able to be evaluated.

# 1. Einleitung

1 Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Möglichkeiten untersucht, Sonnenenergie zu speichern, damit  
 2 Wärmepumpen effizienter betrieben werden können, wobei der Fokus auf Einfamilienhäuser gelegt wurde. Mit der  
 3 Speicherung von regenerativen Energieformen können einerseits Kosten gesenkt und in weiterer Folge der  
 4 Primärenergiebedarf reduziert werden.

5 Zur Auseinandersetzung wird zunächst der Energiebedarf in Österreich aufgezeigt. Aus diesem Bedarf und der  
 6 dazugehörigen Aufteilung, lassen sich wiederum Entwicklungstrends und Potentiale zur Energieeinsparung ableiten.  
 7 Daraus ergibt sich eine Problemstellung, die in weiterer Folge auf Basis theoretischer Grundlagen und  
 8 Simulationsmodellen behandelt wird.

## 1.1. Motivation

9 Die globale Erwärmung verändert das Klima auf der Erde, was durch unterschiedliche Messungen klar belegt ist.  
 10 Die Konsequenzen sind das Abschmelzen der Polkappen, Erwärmung der Weltmeere, stärker werdende  
 11 Unwetterereignisse und viele andere Phänomene, die in vielen Medien, Zeitschriften und Büchern dokumentiert sind.  
 12 Die globale Erwärmung steht in direkten Zusammenhang mit dem Kohlendioxidausstoß (CO<sub>2</sub>), der von Menschen  
 13 produziert wird. Vor allem durch die Verwendung von fossilen Energieträgern wird ein hohes Maß an diesem Gas  
 14 freigesetzt.

15 Einhergehend mit der Industrialisierung, stieg der Energiebedarf jeder Einzelperson und durch die stetige  
 16 Zunahme der Weltbevölkerung verstärkt sich dieser Effekt zusehends. Global gesehen entwickelt sich also der  
 17 Energiebedarf zunehmend ungünstiger, weshalb Lösungen gefunden werden müssen, die die Belastung durch CO<sub>2</sub>  
 18 und andere schädigende Treibhausgase auf die Atmosphäre verringern [1]. In Abbildung 1-1 ist das Verhältnis der  
 19 Weltbevölkerung zum weltweiten Endenergiebedarf dargestellt. Stellt man die Entwicklung des  
 20 Endenergieverbrauches der Entwicklung der Weltbevölkerung gegenüber, erkennt man den direkten Zusammenhang  
 21 beim Wachstum [2].

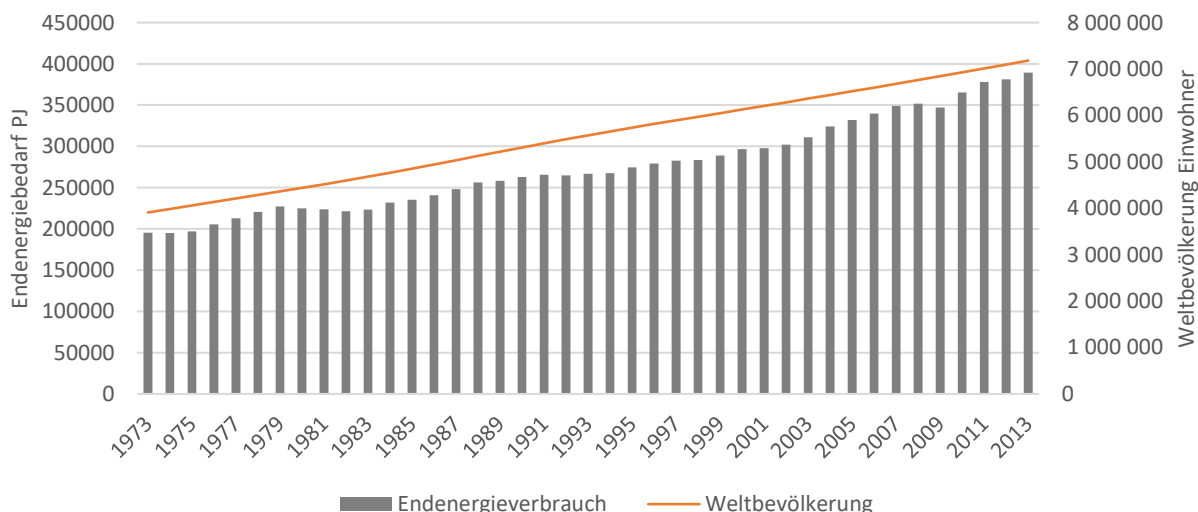


Abbildung 1-1: Vergleich der Entwicklung der Weltbevölkerung zu Endenergiebedarf [3] [2]

22 Die IEA- International Energy Agency [3] gibt an, dass der weltweite Endenergieverbrauch im Jahr 2013 bei  
 23 389.414 PJ stand. Verglichen mit dem Jahresbedarf 1973, zu Beginn der Datenreihe, wird fast die doppelte  
 24 Energiemenge benötigt, der jährliche Zuwachs beträgt 1,74 Prozent.

25 In den kommenden Jahrzehnten wird die Weltbevölkerung weiter steigen, somit wird infolge auch mehr Energie  
 26 benötigt. Bemerkenswert ist, dass der Energiebedarf in den letzten Jahren überproportional zur Bevölkerung  
 27 angestiegen ist. Diese Entwicklung liegt an der zunehmenden Technisierung der Bevölkerung von schwächer

1 entwickelten Ländern, welche derzeit technisch nicht so hoch entwickelt ist, wie die Bevölkerung in den  
2 Industrieländern.

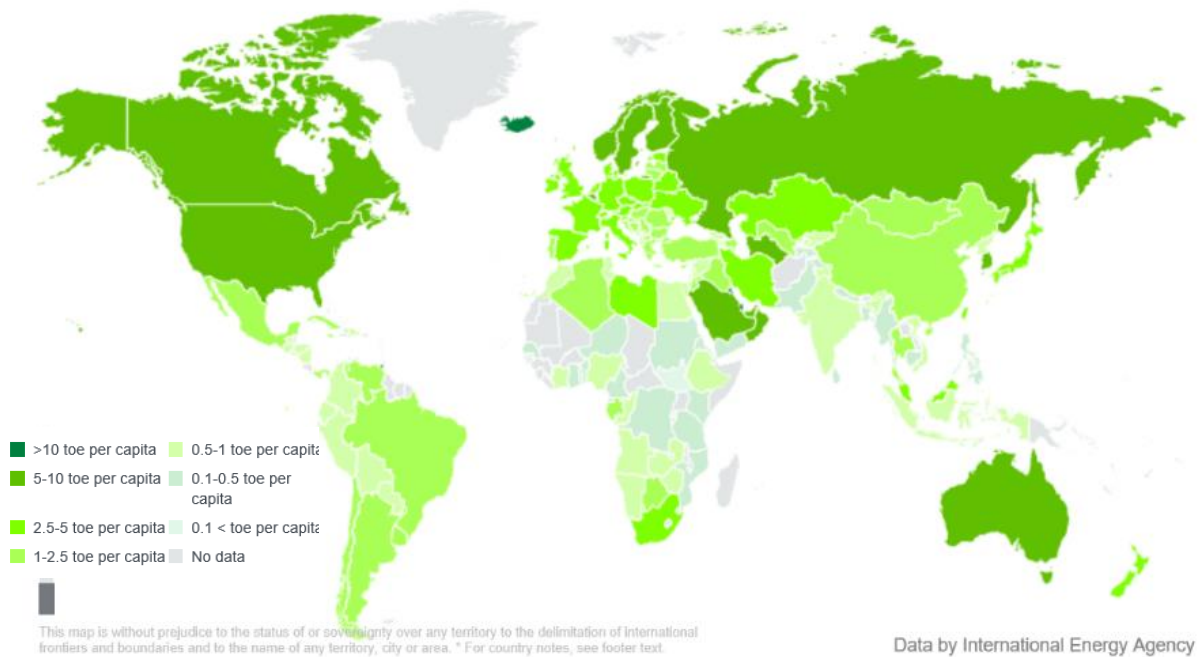


Abbildung 1-2: Energieverbrauch pro Einwohner 2013 (toe=1000 Öleinheiten) [3]

3 In der Abbildung 1-2 ist der Energieverbrauch in Öleinheiten dargestellt. Interessant ist, dass ein Großteil der  
4 Weltbevölkerung nicht so viel Energie verbraucht, wie der europäische Durchschnitt. Vor allem Länder mit einer  
5 großen Population, bei denen die Wirtschaft zunehmend stärker wird, wie zum Beispiel China oder Indien, haben  
6 erheblichen Einfluss auf die weitere Entwicklung des globalen Energiebedarfes und der Treibhausgase.

7 Im direkten Vergleich der Industrieländer erkennt man, dass Einsparungspotential vorhanden ist. Zum Beispiel  
8 liegt der Energiebedarf in den Vereinigten Staaten und in Kanada bei 6,92 und 7,2 toe (80.480 und 83.736 kWh) pro  
9 Einwohner und Jahr, in Österreich hingegen benötigt der Durchschnittseinwohner 3,92 toe (45.590 kWh) pro Jahr.  
10 Mit diesem Wert liegen wir allerdings EU-weit im vorderen Drittel des Durchschnittsverbrauches. Bezieht man alle  
11 Treibhausgase auf das Bruttoinlandsprodukt, so erhält man die CO<sub>2</sub>-äquivalenten Treibhausgasemissionen in kg/€  
12 BIP oder kg/\$ BIP. Dabei werden alle schädlichen Gase mit Kohlendioxid verglichen und bewertet. Österreich liegt  
13 im Europavergleich im vorderen Drittel [4], somit ist hierzulande der Umgang grundsätzlich nicht schlecht, jedoch  
14 müssen Methoden entwickelt werden, um den Energieverbrauch und den damit einhergehenden Anstieg der  
15 Treibhausgasemission laufend zu reduzieren.

## 1.2. Ziel und Nutzen

16 Mit dieser Arbeit soll ein weiterer Beitrag zur Einsparung von Primärenergiequellen geleistet werden. Auf Basis  
17 der Daten des Energieausweises, welche durch das Energieausweis-Vorlage-Gesetz 2012 und den Bauordnungen in  
18 den derzeit geltenden Fassungen für eine flächendeckende Erstellung des Energieausweises sorgen, soll eine  
19 einfache Abschätzung zur Dimensionierung von Solarspeichern erstellt werden. Besonderer Augenmerk liegt hier  
20 speziell auf der Effizienz der Anlage, sowie einer einfachen technischen Umsetzung.

21 Damit der mögliche Nutzen dieser Arbeit bewertet werden kann, stellt sich die Frage, wie die Energieströme  
22 grundsätzlich aufgeteilt sind. Von der International Energy Agency werden, bis auf vereinzelte Ausnahmen, die Daten  
23 zum weltweiten Energieverbrauch zur Verfügung gestellt. In Abbildung 1-3 sieht man die Aufteilung dieser  
24 Energieströme. Im Wohnbereich werden 89.104 PJ (22,9% des Endenergiebedarfs) umgesetzt, das ist vor dem  
25 Verkehrsbereich mit 80.751 PJ (20,7% des Endenergiebedarfs), der größte Bereich. Der gesamte Industriesektor ist  
26 von der Energiemenge noch größer als der Wohnbereich, aufgrund der vielen unterschiedlichen Industriezweige kann  
27 man diesen jedoch nicht leicht objektivieren und Einsparungsmaßnahmen definieren.





Petajoules ▾

**World**  
FINAL CONSUMPTION (2013)

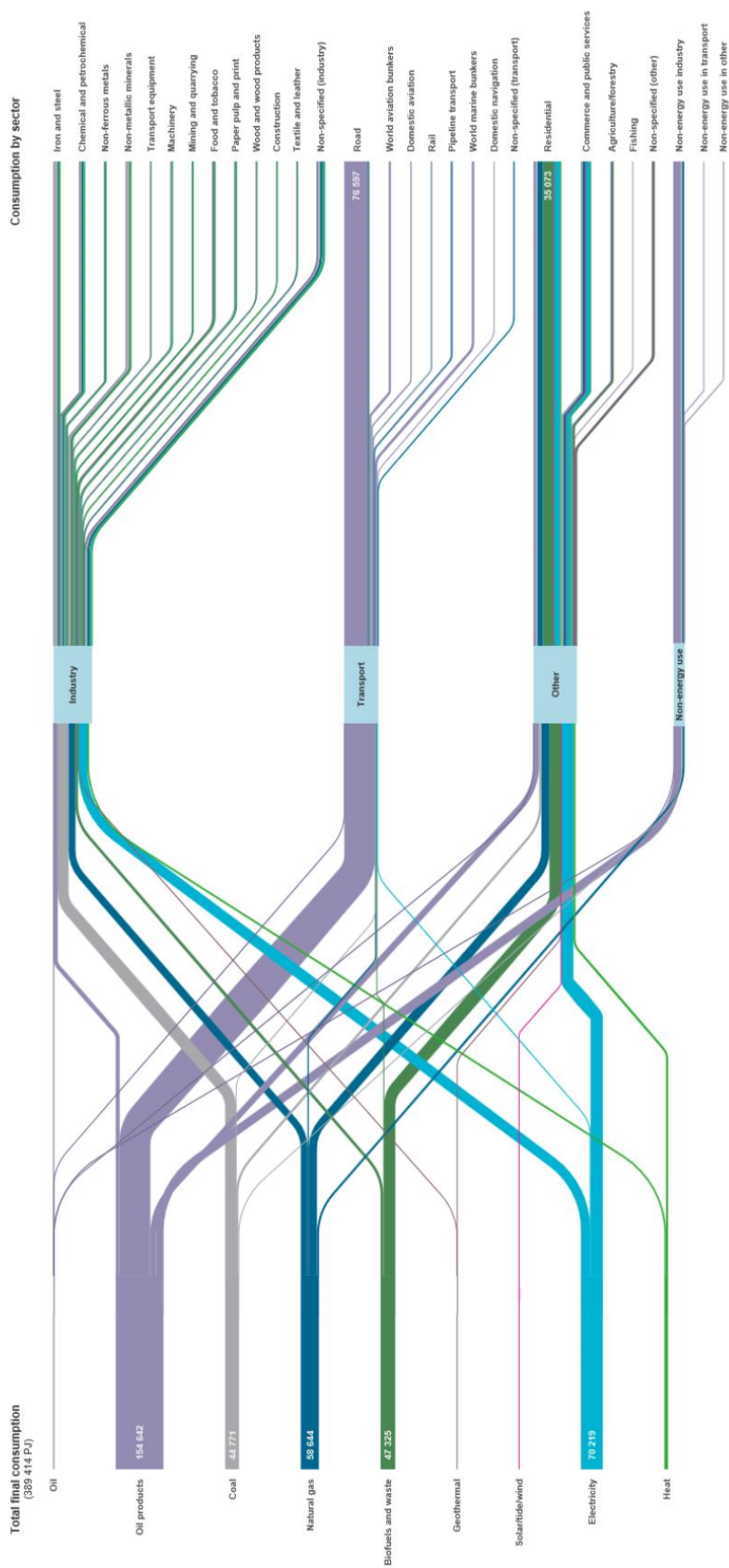


Abbildung 1-3: Energieflussdiagramm zum globalen Endenergiebedarf 2013 [3]

Der Energiebedarf im Bereich des Individualverkehrs wird klassisch mit Ölprodukten gedeckt. Allerdings gibt es derzeit eine starke Entwicklungen in Richtung der E-Mobilität. Elektrische Motoren arbeiten besonders energieeffizient, da für den Antrieb eines Elektroautos ungefähr die Hälfte der Primärenergie von einem herkömmlichen Dieselmotor erforderlich ist. Allerdings ist der Bedarf an Energie, welcher für die Fortbewegung verwendet wird, weltweit gesehen sehr hoch. Die Bereitstellung von alternativen Energieformen in geeignetem Ausmaß stellt ein Problem dar, welches etappenweise gelöst werden muss.

In Tabelle 1-1 sind die Energieträger aufgelistet, die im Wohnbereich verwendet werden. Im Haushaltsbereich sind alle Energieträger vertreten. Sowohl in Österreich, als auch weltweit betrachtet, sind nachwachsende Rohstoffe und Müll hier in der Statistik ganz oben. Nachwachsende Rohstoffe haben den Vorteil, dass das CO<sub>2</sub>, welches bei der Verbrennung freigesetzt wird, durch Bäume und anderen Pflanzen wieder aufgenommen wird. Das Verbrennungsmaterial wird hierzulande zum größten Teil durch unsere Wälder zur Verfügung gestellt. Würde man das Holz in den Wäldern belassen, würde es Verrotten und bei diesem Vorgang würde die gleiche Menge an CO<sub>2</sub> freigesetzt werden, wie bei der Verbrennung. Global gesehen werden die Waldbestände reduziert, in Österreich jedoch gibt es ein Forstgesetz, was sehr streng mit dem Waldbestand umgeht und dafür sorgt, dass hierzulande keine Waldflächen ohne Ersatzbepflanzung gerodet werden können.

Müll muss verbrannt werden, damit das benötigte Deponievolumen kleiner und die gespeichert Energie in den Abfällen entzogen wird. Allerdings erkennt man hier, dass global nicht soviel Müll getrennt wird, wie in Österreich. Die zweitgrößte Gruppe der Energieträger wird durch Produkte gestellt, die in keinem Kreislauf stehen. Damit sind Ölprodukte, Kohle und Erdgas gemeint, die in der Energiewirtschaft aus nachhaltigen Gründen nicht wünschenswert sind, da die Emissionen, welche durch die Verbrennung entstehen, einen direkten Beitrag zu den Treibhausgasen liefern.

**Tabelle 1-1: Aufteilung der Energieträger global und in Österreich im Haushaltsbereich [3]**

Energieträgereinsatz im Haushaltsbereich	Anteil absolut global PJ	Anteil relativ global %	Anteil absolut Österreich 0,3% des globalen Verbrauchs PJ	Anteil relativ Österreich %
Ölprodukte	8589	9,6	50,7	18,4
Kohle	3149	3,5	1,5	0,5
Erdgas	17793	20,0	52,3	19,0
Biogene Brennstoffe und Müll	35073	39,4	71,5	26,0
Geothermie	161	0,2	0,0	0,0
Solar-/ Gezeiten-/ Windenergie	955	1,1	5,6	2,0
Elektrischer Strom	18967	21,3	63,7	23,1
Wärmeenergie	4417	5,0	30,1	10,9
<b>Summe</b>	<b>89104</b>	<b>100,0</b>	<b>275,4</b>	<b>100,0</b>

Einerseits gibt es Bestrebungen, nicht erneuerbare Energieformen zu vermeiden, andererseits müssen Alternativen geschaffen werden, um die Energiequellen zu ändern. Das Ziel ist also, die nicht regenerativen Energieträger zu ersetzen. Allerdings geht der Umstieg nicht so einfach, da alternative Energiequellen angeboten werden müssen, welche kostenmäßig am Markt akzeptiert werden und auch in erforderlicher Menge vorhanden sind. Die Steuerung in Richtung Energiewende erfolgt durch den Gesetzgeber mit Hilfe von regulierenden Maßnahmen

1 (Ökostromförderung, etc.), da aufgrund der derzeit verhältnismäßig hohen Energiekosten für alternative Energie  
 2 wirtschaftlich kein Anreiz für Betriebe besteht und diese durch die Anwendung dieser Technologien Verluste  
 3 erwirtschaften. Bei der Anzahl an gebauten Windkraftanlagen kann man in Österreich in den letzten Jahren bei  
 4 stagnierenden Fördermitteln eine stagnierende Ausbautentwicklung feststellen.

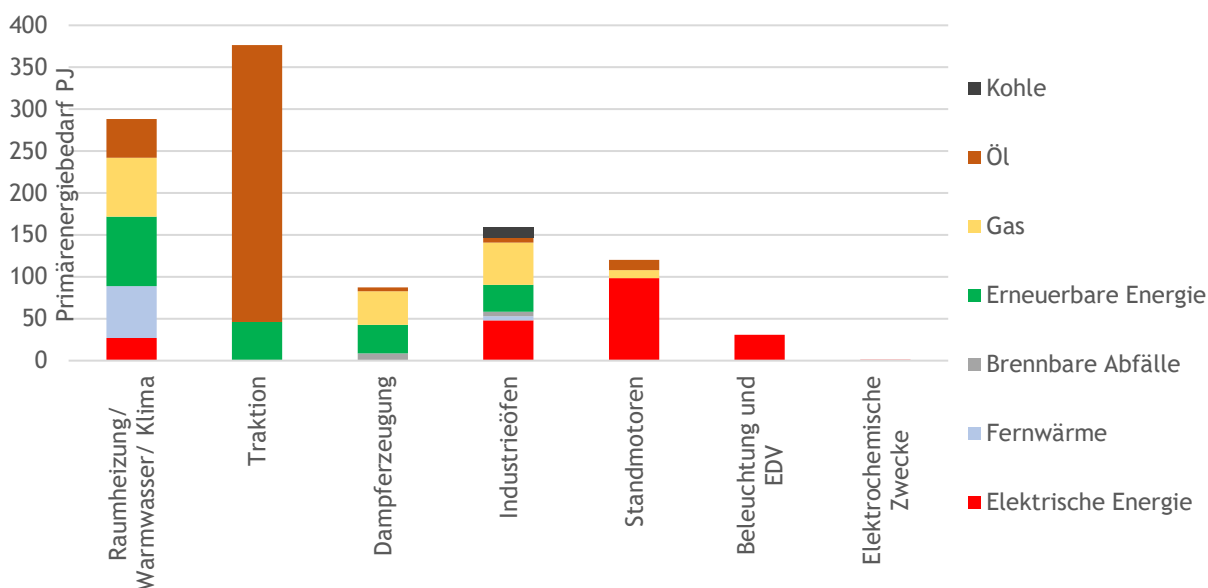


Abbildung 1-4: Energetischer Endverbrauch in Österreich nach Verbraucherzweck im Jahr 2014 [5]

5 In Abbildung 1-4 ist eine Aufschlüsselung des Primärenergiebedarfs im Jahr 2014. Man erkennt, dass die Mobilität  
 6 den größten Energieverbrauch einnimmt, danach kommt der Energiebedarf für Gebäude und dann der  
 7 Prozessenergiebedarf für Industrieöfen.

8 Das Parlament der Europäischen Union hat durch eine Richtlinie im Jahr 2010 beschlossen [6], dass alle Gebäude  
 9 bis 2020 als ‚nearly-zero-energy building‘ ausgeführt werden müssen. Das Österreichische Institut für Bautechnik hat  
 10 2014 einen nationalen Plan zur Richtlinie [7] festgelegt, da Richtlinien, welche vom Europäischen Parlament  
 11 beschlossen werden, in nationales Recht umgesetzt werden müssen. Demnach werden Mindestanforderungen an den  
 12 Heizwärmebedarf, Endenergiebedarf, Gesamtenergieeffizienzfaktor, Primärenergiebedarf und an die  
 13 Kohlendioxidemissionen stufenweise bis Ende 2020 verschärft. Als Neuerung kann ab 1.1.2017, wie bereits bei  
 14 größeren Renovierungen umgesetzt, zwischen zwei Nachweisverfahren gewählt werden. Einerseits kann der  
 15 maximale Endenergiebedarf über den Haustechnikenergiebedarf des Hauses bestimmt werden, oder es wird das  
 16 Nachweisverfahren über die Gesamtenergieeffizienz gewählt, wobei der Heizwärmebedarf beim Nachweisverfahren  
 17 mit der Gesamtenergieeffizienz die Nutzung von alternativen Energiequellen zulässt. Hierbei ist es nicht mehr so  
 18 wichtig, dass das Haus sehr gut gedämmt ist, viel wichtiger ist die Einbringung von Energiequellen, welche geringe  
 19 Mengen Kohlendioxid in die Atmosphäre freisetzen.

20 Die globalen Grundlagen, die zu den aktuellen Gesetzgebungen geführt haben, wurden erarbeitet, nun müssen  
 21 die Grundlagen für die erforderliche Energie im Haushalt zusammengefasst werden. Die zentrale Frage ist, wieviel  
 22 Energie benötigt ein Gebäude und wieviel Einsparungspotential ist gegeben? Diese Frage führt automatisch zur  
 23 Gegenfrage, wie groß das Gebäude ist. Die IEA gibt [8] Auskunft zum tatsächlichen Verbrauch von bestehenden  
 24 Wohneinheiten.

25 Abbildung 1-5 zeigt die globale Entwicklung zum Primärenergiebedarf von privaten Haushalten zum Heizen.  
 26 Dieser Bedarf ist klar getrennt von der Warmwasserbereitung, welche in Abbildung 1-6 ersichtlich ist. Interessant  
 27 ist, dass zum Beispiel in Japan sehr wenig Energie zur Heizung von Wohneinheiten aufgewendet wird, denn hier  
 28 werden generell nur 14,7 Prozent des Bedarfes für private Haushalte aufgewendet. Das liegt einerseits an den kleinen  
 29 Wohnungsgrößen und andererseits an der großen Bevölkerungsdichte. Beim Heizen sind also dichte  
 30 Bebauungsstrukturen energetisch von Vorteil. Verglichen mit dem Warmwasserbedarf und dem Energiebedarf für  
 31 sonstige Zwecke (siehe Abbildung 1-6 und 1-7), hat die Bebauungsdichte aber keine Vorteile.

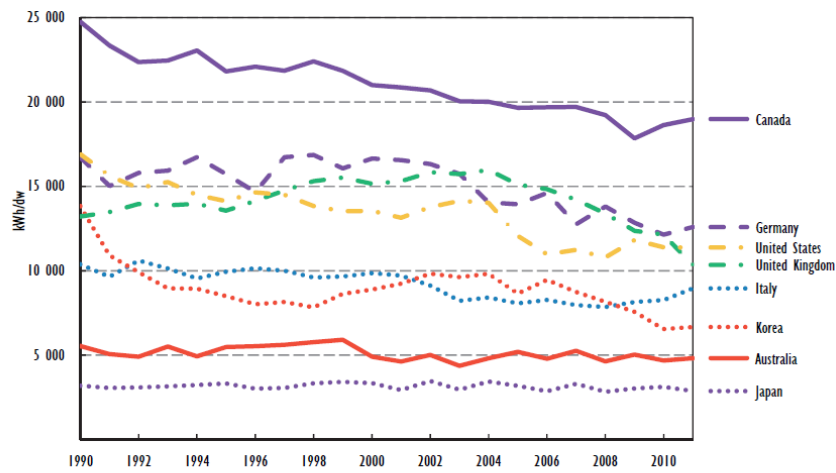


Abbildung 1-5: Primärenergiebedarf von privaten Haushalten für das Heizen (dw=dwelling, Wohneinheit) [8]

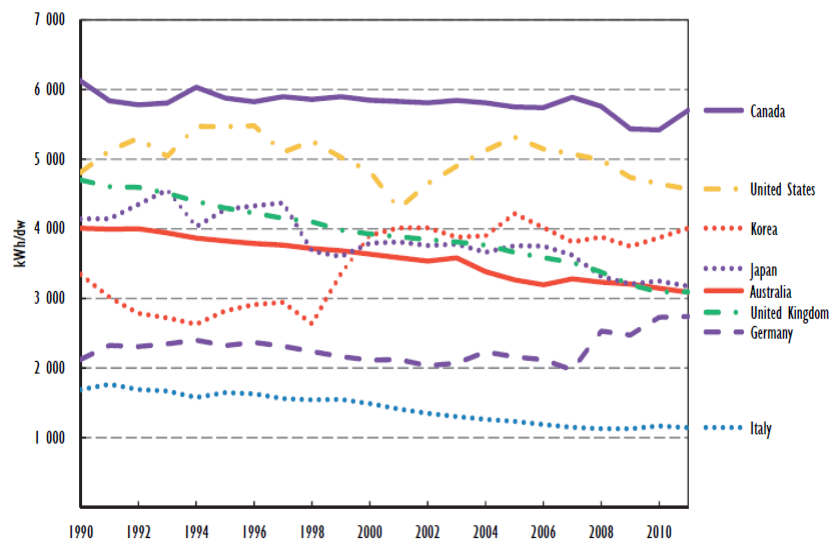


Abbildung 1-6: Primärenergiebedarf für private Haushalte für die Warmwasserbereitung (dw=dwelling, Wohneinheit) [8]

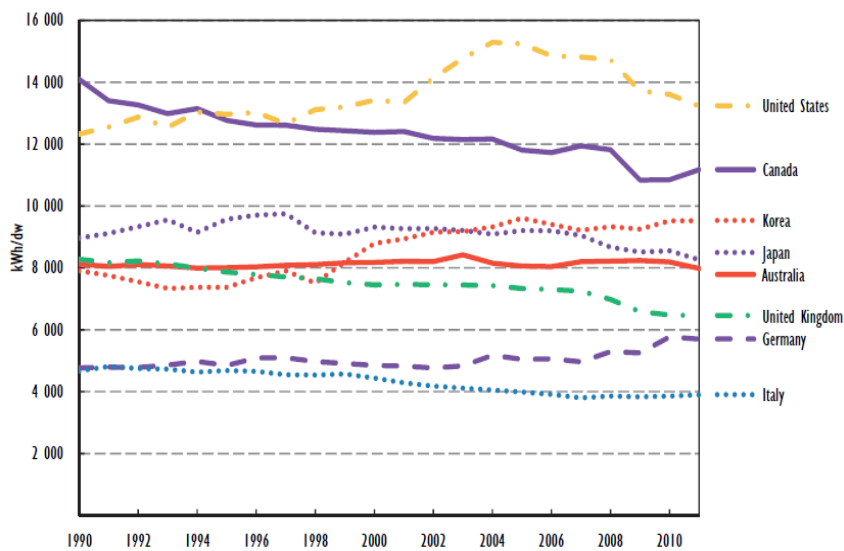


Abbildung 1-7: Primärenergiebedarf für private Haushalte ohne Heizung und Warmwasserbereitung (dw=dwelling, Wohneinheit) [8]

- 1 In Abbildung 1-8 ist der Primärenergiebedarf für Durchschnittshaushalte, bezogen auf  $\text{m}^2$  und Jahr, dargestellt.  
 2 Gut zu erkennen ist die Reduktion des Energiebedarfes, in Bezug auf die Grundfläche. Indes stieg im gleichen  
 3 Zeitraum die Grundfläche der Wohneinheiten überproportional, weshalb auch der Primärenergiebedarf gestiegen  
 4 ist.

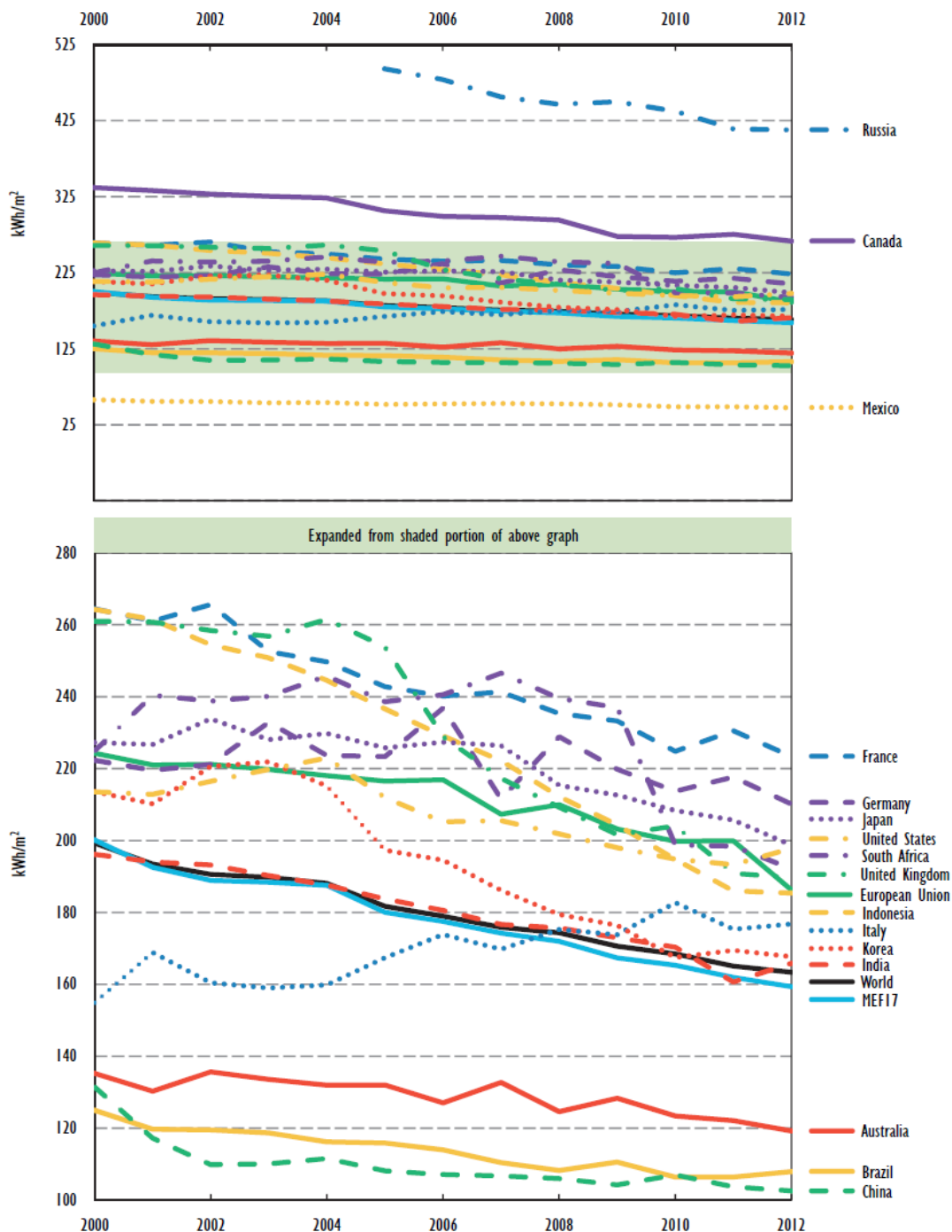


Abbildung 1-8: Primärenergiebedarf für private Haushalte [8]

- 5 Durch die Mindestanforderung an die Gesamtenergieeffizienz für Wohngebäude in Österreich, soll der maximale  
 6 Primärenergiebedarf mit 01.01.2021 auf  $160 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  beschränkt werden, dieser Wert liegt in der Nähe des  
 7 weltweiten Jahresdurchschnittes aus dem Jahr 2012. Die Ergebnisse der Studie verwundern im ersten Moment, die  
 8 Vorgabe durch das Österreichische Institut für Bautechnik wären somit nur im Mittelfeld des aktuellen  
 9 Primärenergiebedarfes. Betrachtet man dagegen die Länder, in denen ein besserer Primärenergiebedarf pro Fläche  
 10 vorliegt, liegen diese näher am Äquator als Österreich und haben dadurch eine höhere Jahresmitteltemperatur. Der  
 11 Bruttoinlandsverbrauch in Österreich geht, gemessen am Durchschnittseinwohner, zurück und trotzdem bleibt aber  
 12 der energetische Endverbrauch, bedingt durch die Zuwachsrate in der Bevölkerung, annähernd konstant.

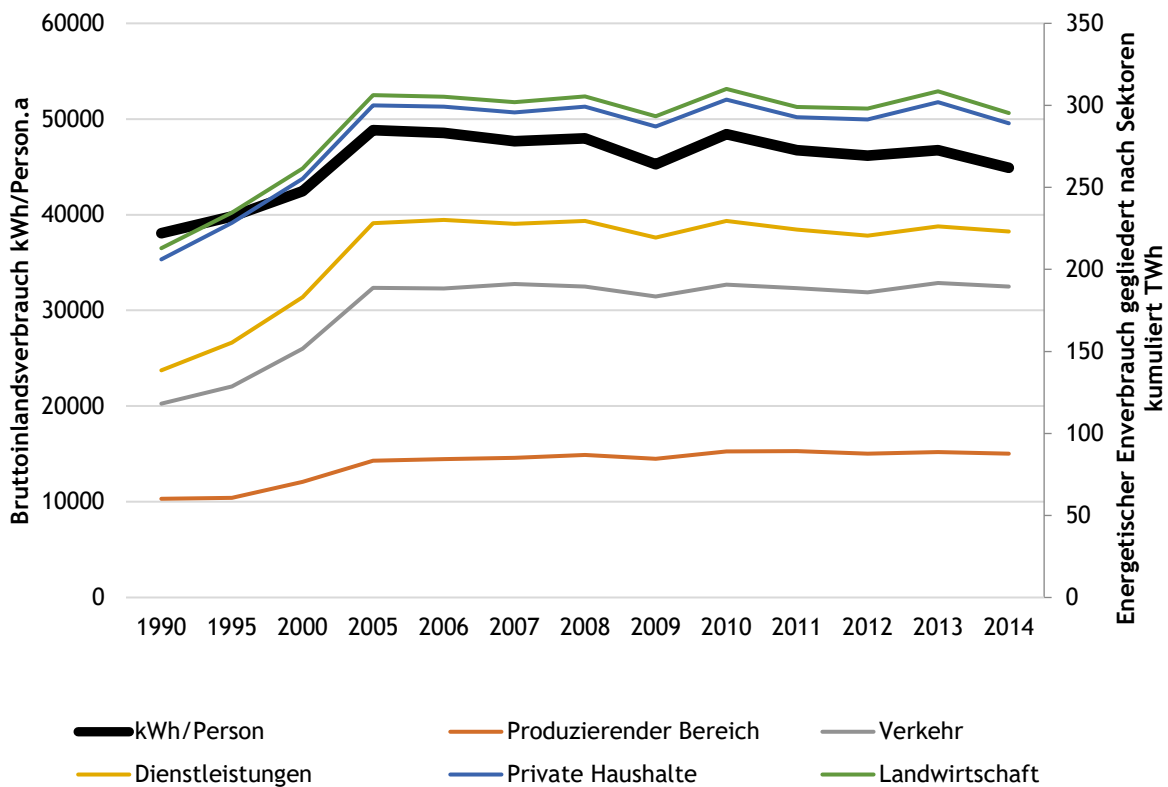


Abbildung 1-9: Bruttoinlandsverbrauch pro Kopf und Jahr in Österreich, verglichen mit dem energetischen Endverbrauch, gegliedert nach Sektoren von 1990 bis 2014 [5]

### 1.3. Methodik

1 In der vorliegenden Diplomarbeit werden in erster Linie allgemeine theoretische Grundlagen zur Physik  
 2 behandelt, auf deren Basis Modelle erstellt werden können. Speziell die Fragen, wie man Energie speichern kann  
 3 und welche alternativen Quellen vorhanden sind, wurden besonders fokussiert, um Möglichkeiten für neue  
 4 Lösungswege zu schaffen, wobei auch auf die einzelnen Leistungsgrenzen eingegangen wird. Anschließend werden  
 5 methodische Grundlagen behandelt, die den aktuellen Stand des Wissens wiedergeben. Die Forschungsfrage bildet  
 6 den Übergang von bestehendem Wissen zur Aufschließung neuer Erkenntnisse, die in der Praxis Anwendung finden  
 7 können.

8 Bislang wurden die Themengebiete Heizen und Dämmen von getrennten Fachplanern betreut, da jedoch die  
 9 Anforderungen zur Reduktion der Umweltbelastung größer geworden sind, muss die energietechnische Optimierung  
 10 interdisziplinär behandelt werden. In Summe kann ein Haus als Maschine betrachtet werden, dass von Bauvorhaben  
 11 zu Bauvorhaben individuell aufgebaut ist. Zum besseren Verständnis der komplexen Themengebiete der  
 12 Solarenergiegewinnung und Langzeitspeicherung, müssen Modelle entwickelt werden, mit denen Untersuchungen  
 13 schnell und einfach durchgeführt werden können. Die Erkenntnisse daraus liefern einen direkten Mehrwert zur  
 14 Effizienzsteigerung.

15 Das Forschungsziel wird mit neuen Modellen erarbeitet, die zum Teil mit bereits validierten Gebäude- und  
 16 Speichermodellen zusammengesetzt sind. Bei den saisonalen Speichern liegt der Schwerpunkt auf Speicher für  
 17 Einfamilienhäuser. Dabei wird speziell auf die Themen Warmwasserspeicher und Tiefenbohrungen, die Energie im  
 18 Niedertemperaturbereich speichern, eingegangen. Bei weiterem müssen Wärmepumpen zur Bereitstellung  
 19 verwendet werden. Im Rahmen der Simulationen werden Variantenstudien durchgeführt, um ein breiteres Spektrum  
 20 an Erkenntnissen zu gewinnen.

21 Zum Abschluss werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf offene  
 22 Themenschwerpunkte gegeben. Zur Steigerung der Nachvollziehbarkeit, sind im Anhang die verwendeten  
 23 Datenblätter, das Referenzobjekt und das erstellte Modell dokumentiert.

## 2. Überblick Theorie und Anwendungen

1 Der Begriff der Energie wurde von Thomas Young in die Mechanik eingeführt, um die Stärke einer ganz  
2 bestimmten Wirkung anzugeben und mittlerweile wird Energie in allen Teilgebieten der Physik als beschreibende  
3 Größe verwendet. Außerdem lassen sich physikalische Phänomene auf unterschiedlichste Weise beschreiben und  
4 durch den Begriff der Energie quantifizieren. Die grundlegenden Formen sind:

- 5           ▪ Mechanische Energie
- 6           ▪ Wärmeenergie
- 7           ▪ Elektrische Energie
- 8           ▪ Chemische Energie

9 Zu den allgemeinen Energieformen gibt es eine Vielzahl von Unterarten, sogar Masse wird mit einer Form von  
10 mechanischer Energie, der Ruheenergie, proportional gesetzt. Die Ruheenergie wurde von Einstein in der  
11 Relativitätstheorie beschrieben und ist heute in der modernen Physik ein zentrales Forschungsthema. Der  
12 Anwendungsbereich liegt in der Energiewirtschaft bei der Kernfusion und Kernspaltung, wobei im Zuge des  
13 Massendefekts Energie freigesetzt wird.

14 Es wird in allen Teilbereichen der Energiewirtschaft geforscht. Speziell bei den neueren Teilgebieten, wie der  
15 Kernfusion, sind Änderungen zu erwarten, die in weiterer Folge die Energiewirtschaft beeinflussen können. Derzeit  
16 wird im Rahmen des Forschungsprojektes „Iter“ [9] ein Kernfusionsreaktor in Frankreich errichtet, dieser soll als  
17 erster Demonstrationsreaktor, welcher mit Kernfusion betrieben wird, Energie ins Netz einspeisen. Der Reaktor soll  
18 dabei eine Leistung von 500 MW produzieren, bei einem Input von 50 MW. Kernfusionsreaktoren haben gegenüber  
19 Kernspaltungsreaktoren den Vorteil, dass die Fusion bei Störungen zum Erliegen kommt, wodurch die Akzeptanz in  
20 der Bevölkerung höher als bei Kernspaltungsreaktoren ist. Der Nachteil bei dieser Art von Reaktor ist, dass, wie bei  
21 den Kernspaltungsreaktoren, Atom Müll entsteht, welcher in Endlagern gebunkert werden muss.

22 Unabhängig von der Energiequelle, ist in jedem Forschungsprojekt der effiziente Einsatz der Energietechnologie  
23 das oberste Ziel und der Vergleich zwischen einzelnen Technologien kann zu jedem Zeitpunkt erfolgen. Sinnvoll ist  
24 das erst dann, wenn die Marktreife vorhanden ist. Generell gibt es allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten in der  
25 klassischen Physik, die als Grundlage für diese Arbeit dienen und die Beurteilung unterstützen.

### 2.1. Die drei Hauptsätze der Thermodynamik

#### 2.1.1. Erster Hauptsatz der Thermodynamik

26 Der erste besagt, dass in einem geschlossenen System keine Energie verloren oder gewonnen werden kann.

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (2-1)$$

27 In der infinitesimalen Schreibweise wird (2-1) zu (2-2), dabei stehen  $\Delta$  oder  $\partial$  für die Änderung mit der Zeit, hier  
28 wird für den Grenzfall  $\lim_{t \rightarrow 0} \Delta = \partial$ , die infinitesimale Schreibweise verwendet. Die partielle Ableitung wird  
29 herangezogen, wenn nur nach der Zeit abgeleitet wird und die verwendeten Größen auch ortsabhängig variieren  
30 können.  
31

$$\partial U = \partial Q + \partial W \quad (2-2)$$

32 In den Gleichungen (2-1) und (2-2) steht  $U$  für die innere Energie,  $W$  für die Arbeit und  $Q$  für den Wärmestrom.  
33 Die Änderung der inneren Energie ist gleich der Summe der Änderungen der Arbeit und des Wärmestroms, somit wird  
34 durch beide Gleichungen eine Energiebilanz definiert, ohne auf den aktuellen Energiezustand einzugehen und sie  
35 gilt für geschlossenen Systeme. Der erste Hauptsatz dient als Grundlage und wird in den folgenden Kapiteln öfters  
36 in abgewandelter Form zur Bilanzierung verwendet.

### 2.1.2. Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik beschäftigt sich mit den Grenzen der Energieumwandlung und Übertragung. Unter anderem definiert dieser, dass es kein Perpetuum Mobile gibt, wobei die allgemeine Gültigkeit dieser Aussage physikalisch nicht nachgewiesen ist, es entspricht jedoch der Erfahrung unzähliger Versuchsreihen.

Umgangssprachlich wird bei der Nutzung von Energie oft über Energieverbrauch geredet, obwohl die Energie umgewandelt wird und in einer Form vorliegt, in der diese nicht mehr nutzbar ist. Physikalisch richtig ist hier der Begriff der Entropie. Rudolf Clausius hat den Begriff der Entropie  $S$  eingeführt, welcher von Boltzmann gemäß Gleichung (2-4) konkretisiert wurde.

$$S(t_2) - S(t_1) \geq 0 \quad | \quad t_2 > t_1 \quad (2-3)$$

Gleichung (2-3) besagt, dass die Entropie eines abgeschlossenen Systems mit Fortschreiten der Zeit, zumindest konstant, zunimmt. Es ist aber nicht möglich, dass die Entropie ohne externe Energiezufuhr abnimmt und sie ist nach Boltzmann in Gleichung (2-4) definiert.

$$S = k \cdot \ln(W) \quad (2-4)$$

Dabei ist  $W$ , nach Boltzmann, die Anzahl der Komplexionen. Heutzutage wird anstatt  $W$ ,  $\Omega$  verwendet und anstatt Anzahl der Komplexionen, Mikrozustände oder die thermodynamische Wahrscheinlichkeit.  $k$  steht für die Boltzmann-Konstante und hat die Größe von  $1,38064852 \cdot 10^{-23}$ . Als Boltzmann diesen Zusammenhang herausgefunden hat, hat es noch keine Quantenphysik gegeben, auch war allgemein nicht bewiesen, dass Atome existieren und diese aus Protonen, Neutronen und Elektronen bestehen.

Um von Mikrozuständen reden zu können, muss man zunächst den Begriff der Quanten einführen. Die Energie eines Teilchens kann nur in Quanten größer oder kleiner werden, daher ändert sich das Energieniveau eines Teilchens sprunghaft und nicht konstant. Makroskopisch kann dieses Phänomen nicht wahrgenommen werden. Die Änderung erfolgt sprunghaft auf Teilchenebene mit der Schwingungsfrequenz eines Moleküls, das heißt, die Energieänderung in der Größenordnung der Boltzmann-Konstante ist sehr klein. Die Quantensprünge sind somit, bei jeder klassischen technischen Anwendung, nicht messbar.

Die Frage ist also, wie man von Quanten und Teilchen zu Mikrozuständen kommt und was das Ganze mit der Energieverteilung in einem geschlossenen System auf sich hat. Ausgehend von einem abgeschlossenen, homogenen System (z.B. einem idealen Gas) können sich folgende Mikrozustände ergeben:

Das System besitzt  $N$  Teilchen. In Summe soll es  $n$  ununterscheidbare Energiequanten geben. Somit können theoretisch alle Energiequanten einem Teilchen zugeordnet sein. Wahrscheinlicher ist es, dass die Energiequanten aber anders, nämlich gleichmäßiger verteilt sind. Wichtig ist für die Mikrozustände  $\Omega$ , die Anzahl der Möglichkeiten zu bestimmen. Mit Hilfe der Kombinatorik kommt man zum Ergebnis:

$$\Omega(N, n) = \frac{(N + n - 1)!}{((N - 1)! n!)} \quad (2-5)$$

Durch Gleichung (2-5) wird die Anzahl der Mikrozustände ermittelt, die Teilchen sind gegeben, die Energiequanten könnten sich in beliebiger Form verteilen. Warum besteht trotzdem ein Wärmestrom zum kälteren Ort? Als Gedankenexperiment muss man das abgeschlossene System in 2 Teile aufteilen. Nun könnte der erste Teil des Systems die gesamte Energie besitzen und der zweite genauso. Die Anzahl der Mikrozustände für den ersten Teil des Systems steigt monoton mit der Energiemenge, dies gilt auch für den zweiten Teil des Systems. Die Energiemenge ist im ganzen System konstant. Die Gesamtanzahl der Mikrozustände ergibt sich aus der Kombinatorik mit:

$$\Omega_{\text{Gesamtsystem}} = \Omega_1 \Omega_2 \quad (2-6)$$



1 Dementsprechend liegt im Gesamtsystem ein Maximum an Mikrozuständen vor, wenn beide Teilsysteme eine  
 2 bestimmte Zahl an Mikrozuständen besitzen. Bei zwei gleich großen Teilsystemen kann man das Maximum der  
 3 Mikrozustände mit einem Rechteck vergleichen, welches die größte Fläche bei gleicher Seitenlänge besitzt.

4 Atome und Moleküle nehmen jede Energie an, die ihnen angeboten wird, dabei werden keine Energiezustände  
 5 bevorzugt, die Vorgeschichte spielt dabei auch keine Rolle. Wenn man die Gesamtanzahl der möglichen  
 6 Mikrozustände, abhängig von der Energieverteilung, zusammenzählt, kann man die relative Häufigkeit bestimmen,  
 7 mit der das Gesamtsystem vorgefunden wird.

$$rel.Häufigkeit(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{\Omega_1 \Omega_2}{\sum \Omega_{Gesamtsystem}} \quad (2-7)$$

8 Die praktische Konsequenz für Wärmespeicher ist, dass es zwangsläufig, früher oder später, zu einer  
 9 Temperaturhomogenisierung des Speichers mit der Umgebung kommt. Dabei gibt es erst dann keinen Wärmestrom  
 10 mehr, wenn es keinen Temperaturunterschied mehr gibt.

### 2.1.3. Dritter Hauptsatz der Thermodynamik

11 Nach Hermann Walter Nernst gilt der dritte Hauptsatz für reine Stoffe:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S(T) = 0 \quad (2-8)$$

12 Demnach geht die Entropie gegen Null, wenn die Temperatur gegen Null Kelvin geht. In dieser Arbeit ist der  
 13 dritte Hauptsatz der Vollständigkeit halber erwähnt. Er hat zur Folge, dass Stoffe nicht bis an den absoluten  
 14 Nullpunkt abgekühlt werden können, da die entziehbare Energiemenge immer kleiner wird. Bedingt durch die  
 15 Entropieverkleinerung wird auch die Wärmekapazität verkleinert und ein weiteres Abkühlen ist nicht mehr möglich,  
 16 da keine Energie entzogen werden kann. Praktisch erfolgt die Abkühlung mit Hilfe des elektromagnetischen Prinzips,  
 17 durch Umorientierung der Spins. Heutzutage hat man den absoluten Nullpunkt bis auf  $10^{-10} K$  erreicht.

## 2.2. Der Energieerhaltungssatz

18 Die drei Hauptsätze der Thermodynamik beschreiben jene Sachverhalte, die die zeitliche Änderung des Systems  
 19 betreffen, über die Menge in einem abgeschlossenen System wurde allerdings nicht diskutiert. Der  
 20 Energieerhaltungssatz besagt, dass Energie nicht vernichtet werden kann, sie kann lediglich umgewandelt oder  
 21 übergeben werden. Für ein abgeschlossenes System gilt:

$$\sum_{i=1}^N U_i = const. \quad (2-9)$$

22 Die Summe der inneren Energie der Teilchen N in einem abgeschlossenen System ist somit konstant. Diese  
 23 nützliche Eigenschaft hilft, gemeinsam mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, beim Bilanzieren von  
 24 geschlossenen Systemen.

## 2.3. Energie und Energiewirtschaft für Haushalte

25 Wie bereits einleitend beschrieben, können 4 Energieformen unterschieden werden. Für die häusliche Verwendung  
 26 ist in Abbildung 1-4, Wärmeenergie zur Heizung und Warmwasserbereitung und elektrischer Strom zur Beleuchtung  
 27 sowie zum Betrieb von Maschinen von besonderem Interesse. In Abbildung 1-4 sieht man auch die Aufteilung der  
 28 Energiequellen, woraus klar ersichtlich wird, dass Umwandlungsprozesse zur Nutzbarmachung der Energiequellen  
 29 zwingend erforderlich sind. In weiterer Folge werden die Energieformen kurz beschrieben und auf die  
 30 Umwandlungsprozesse eingegangen.

### 2.3.1. Wärmeenergie

1 Wärmeenergie ist die wesentliche Energieform für die Behaglichkeit. Die operative Raumtemperatur in einem  
 2 Haus steht im direkten Zusammenhang mit der Energiemenge und bewertet diese in einem vergleichbaren Maß. In  
 3 dieses Empfinden fließen die Oberflächentemperaturen der Bauteile und die Lufttemperatur mit ein. Unter  
 4 Berücksichtigung der Speicherkapazität kann die innere Energie des Gebäudes mit der Gleichung (2-10) bestimmt  
 5 werden. Nach Gleichung (2-9) ist diese ohne Energiezu- und abfuhr konstant.

$$U_{Ges} = \sum_{i=1}^N T_i \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot V_i \quad (2-10)$$

6 mit:

$T_i$  Temperatur des Bauteils  $i$  K

$c_i$  spezifische Wärmespeicherkapazität des Bauteils  $i$  J/kg.K

$\rho_i$  Rohdichte des Bauteils  $i$  kg/m<sup>3</sup>

$V_i$  Volumen des Bauteils  $i$  m<sup>3</sup>

$U_{Ges}$  Innere Energie des Hauses J

7 Zur Berechnung der Wärmeströme müssen die Zu- und Abflüsse an der Gebäudehülle und die geleistete Arbeit  
 8 im Haus ermittelt werden. In (2-2) besteht die Änderung der inneren Energie aus den Wärmeströmen und der  
 9 geleisteten Arbeit.

$$\Delta U_{t \rightarrow t+1} = \int_t^{t+1} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial t} \right) dt \quad (2-11)$$

10 Unter Wärmeströme  $Q$  (Strahlung, Leitung und Konvektion) fallen:

- 11 • Wärmeverluste infolge Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen und opake als auch
- 12 transparente Bauteile
- 13 • Wärmeverluste durch Lüftung
- 14 • Wärmegewinne durch Strahlungsenergie
- 15 • Die erforderliche Heizung und Warmwasserbereitung produziert einen Wärmestrom der einerseits
- 16 bei der Heizung beabsichtigt ist und andererseits bei den Bereitstellungsverlusten unbeabsichtigt ist

17 Unter der geleisteten Arbeit kann man:

- 18 • Den Strombedarf der Haushaltsgeräte und den
- 19 • Energieeintrag durch anwesende Personen im Haushalt werten.

20 Die oben aufgelisteten Teilbereiche werden beim Erstellen des Energieausweises, mit Hilfe des  
 21 Monatsbilanzverfahrens, berücksichtigt. Es gibt genaue normgemäße Vorgaben und Richtlinien, in denen die  
 22 einzelnen Wärmeströme und die geleistete Arbeit sowie Rahmenbedingungen bewertet werden, wobei die  
 23 Speichermasse des Gebäudes im Monatsbilanzverfahren nicht berücksichtigt [10] wird (vgl. Kapitel 5.1.2).

24 Vor allem bei detaillierten Gebäudesimulationen sind weitere, umfangreiche Fachkenntnisse zur  
 25 Zusammensetzung der Bauteile und Rahmenbedingungen notwendig. Im Rahmen des Forschungsprojekts:  
 26 „Thermische Bauteilaktivierung - Entwicklung eines Rechenkerns [11]“ und der Dissertation: „Increasing energy  
 27 efficiency of small residential buildings by solarthermal activation of concrete ceilings [11]“, wurde eine solide Basis  
 28 an Grundlagenwissen zu Detailsimulationen erarbeitet.

### 2.3.2. Mechanische Energie

1        Mechanische Energie ist in der Natur für die Energiewirtschaft brauchbar in zwei Formen vorhanden, erstens der  
 2        potentiellen Energie, welche primär durch Wasserkraft vertreten ist und zweitens in Form von kinetischer Energie,  
 3        welche primär durch Windkraft vertreten ist. Aus energiewirtschaftlicher Sicht spielt mechanische Energie als  
 4        Bereitstellungsform eine untergeordnete Rolle für den Haushaltsenergiebedarf. Hat man ein kleines Wasserkraftwerk  
 5        oder eine Windkraftanlage, verwendet man klassisch mechanische Energie als Energiequelle. Unter die klassischen  
 6        mechanischen Energieformen fallen potentielle und kinetische Energie, welche nach Gleichung (2-12) definiert sind,  
 7        zusätzlich kann man noch zwischen Rotations- und Spannenergie unterscheiden. Aufgrund der untergeordneten  
 8        Bedeutung werden die letzten zwei im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h \tag{2-12}$$

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

9        In beiden Energieformen (2-12) steht die Energie proportional zur Masse, somit muss man viel Masse bewegen,  
 10        um viel Energie zu speichern. Als Beispiel für eine mögliche Energienutzung wäre das Regenwasser, dass auf das  
 11        Dach eines Hauses fällt. Angenommen wird ein Durchschnittsdach mit 140 m<sup>2</sup>, der Niederschlag im Raum Wien im  
 12        Mittel mit rund 650 mm pro Jahr und die mittlere Dachrinnenhöhe bis zum Regensinkkasten mit 6 Metern. Setzt man  
 13        in die Formel für die potenzielle Energie ein, ergibt das:

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h \tag{2-13}$$

$$E_{pot} = 140 \cdot 0,65 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 6 = 8240400 \text{ Joule} \equiv 2,29 \text{ kWh}$$

14        Somit wäre auch bei einer verlustfreien Energieumwandlung, an keine wirtschaftliche Nutzung zu denken. Bei  
 15        der Nutzung klassischer mechanischer Energie wären gewaltige Massenbewegungen erforderlich. Mit der derzeitigen  
 16        erforderlichen Endenergiemenge einer Person in Österreich müsste man 1.000 m<sup>3</sup> Beton, knapp 7 km hochheben.  
 17        Daraus folgt, dass man nur Ressourcen verwenden kann, welche regenerativ erscheinen und in einem Kreislauf  
 18        stehen, bei Wasser und Wind trifft beides ideal zu. Das Einzugsgebiet eines Daches und somit die Menge an Wasser,  
 19        ist klein und verglichen mit einem Staudamm auch die Fallhöhe.

20        Verwertet man theoretisch die ganze potentielle Energie der Wassermengen, die auf die Fläche Österreichs mit  
 21        der Durchschnittsniederschlagsmenge fallen, könnte man ohne Verluste rund 250 TWh/m Fallhöhe erwirtschaften.  
 22        Dieses Gedankenexperiment funktioniert allerdings nicht in der Praxis, da erstens durch Verdunstung viel Wasser in  
 23        die Atmosphäre zurücktransportiert wird und zweitens in jedem natürlichen Bachbett bei der Strömung Reibung  
 24        entsteht, bzw. die Wasserkraft gezielt vernichtet werden muss, um die Sohlerosion zu vermeiden.

25        Die Energie-Control Austria [12] gibt an, dass durch Wasserkraftwerke im Jahr 2014 42.868 GWh brutto Strom  
 26        erzeugt wurde, dieser teilt sich auf die Produktion durch Laufkraftwerke mit 28.290 GWh und auf  
 27        Speicherkraftwerken mit 14.578 GWh auf. Die Leistung der Speicherkraftwerke muss für die Nettoproduktion vom  
 28        Verbrauch für Pumpspeicher mit 5.462 GWh bereinigt werden, dadurch ergeben sich 37.226 GWh an  
 29        Energieproduktion durch Wasserkraft ohne Netzverluste und Kraftwerksbedarf.

30        Die Entwicklung der Windkraftanlagen ist in den letzten 20 Jahren schnell gewachsen, wobei aus physikalischen  
 31        und somit auch aus wirtschaftlichen Überlegungen, der Trend hin zu großen Windkraftanlagen mit hoher Rotornarbe  
 32        und großen Rotorblättern führt. Die durchschnittliche Nennleistung von derzeit umgesetzten Anlagen, liegt bei über  
 33        3 MW und liefert damit einen Jahresenergieertrag von 7 GWh pro Jahr [13]. Es wären also über 5.000 Anlagen in der  
 34        Größenordnung von 3 MW notwendig, um die Energie zu liefern, die durch die Wasserkraft derzeit bereitgestellt  
 35        wird, bzw. über 40.000, um den aktuellen, gesamten Endenergiebedarf von Österreich mit Windkraft zu decken,  
 36        oder anders gesprochen, auf Gemeindeebene umgelegt, rund 20 Windkraftanlagen pro Gemeinde.

1       Wasserkraftwerke, die zur Umwandlung von Energie dienen, besitzen große Einzugsflächen und oder Fallhöhen,  
2 bei denen die Energie mit hoher Dichte konzentriert und mit Hilfe von unterschiedlichen Turbinen verwertet wird.  
3 Nutzbare Energie wird mit großer Durchflussmenge, wie bei den Donaukraftwerken in Melk, Ybbs, Greifenstein,  
4 uvm., produziert oder alternativ über große Höhenunterschiede gewonnen, wie in den Wasserkraftwerken in den  
5 Alpen (Kaprun, Malta, Reifbeck, uvm.).

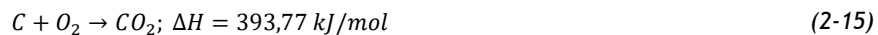
6       Windkraftanlagen werden derzeit im zunehmenden Ausmaß gebaut. Im direkten Vergleich mit  
7 Wasserkraftanlagen ist für den flächendeckenden Ausbau von Windkraftanlagen mehr Potential vorhanden. Durch  
8 das stochastische Windprofil wird ein stochastisches Stromprofil generiert, das ins Netz eingespeist wird und zu  
9 Problemen in der Netzverteilung führt. Windkraftanlagen können an bis zu 85% der Zeit elektrische Energie erzeugen,  
10 allerdings liegen die Volllaststunden an günstigen Standorten nur bei rund 2.000h (-23%) pro Jahr, wobei diese Größe  
11 zur Berechnung der Amortisierung wichtig ist. In Zukunft werden die Auswirkungen der unregelmäßigen  
12 Energieeinspeisungsprobleme größer und müssen durch effiziente Verteilung und Energiespeicherung gelöst werden,  
13 wobei auch „Smart Grid“- Systeme eine Option bilden [14].

### 2.3.3. Chemische Energie

14       Chemische Energie ist jene Energieform, die am meisten verbreitet als Primärenergieträger in der  
15 Energiewirtschaft ist. Betrachtet man chemische Energie auf der mikroskopischen Ebene, kann diese durch  
16 Veränderung der Elektronenstruktur beschrieben werden. Dem gegenüber steht die Kernreaktion, wobei Energie  
17 durch den Massendefekt begründet, in Form von elektromagnetischer Strahlungsenergie, freigesetzt wird (2-14) [15].

$$E = m \cdot c^2 \quad (2-14)$$

18       Für Naturwissenschaftler ist die günstigste Eigenschaft der chemischen Energie, dass Prozesse auf  
19 makroskopischer Ebene vereinfacht beschrieben werden können. Als Beispiel kann man eine exotherme  
20 Verbrennungsreaktion nennen, bei der sich Kohlenstoff mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid verbindet, Wärme  
21 freigesetzt und die Entropie größer wird.



22       Ein kg reiner Kohlenstoff (83,33 mol/kg) liefert bei der Verbrennung mit Sauerstoff daher:

$$393,77 \cdot 83,33 = 32812,85 \text{ kJ/kg} \equiv 9,11 \text{ kWh/kg} \quad (2-16)$$

23       Bei der Umsetzung von Heizöl werden 12,6 kWh/kg nutzbar, eine ziemliche hohe Energiedichte, verglichen mit  
24 der Energiemenge, die man durch Regenwassersammlung am Hausdach (sh. Seite 17) lukrieren könnte. Chemische  
25 Energieträger haben den deutlichen Vorteil der hohen Energiedichte und der einfachen Manipulation. Es ist also  
26 nicht verwunderlich, dass die alten Ägypter Diamanten, die sie nicht bearbeiten konnten, zu Heizzwecken  
27 verwendeten. Bei chemischen Energiemedien gibt es eine Reihe an interessanten Aspekten, wie z.B. das  
28 Wirkungsprinzip von Sorptionsspeicher.

### 2.3.4. Elektrische Energie

29       Elektrische Energie wird im Haushalt und in der Industrie zum Betrieb von viele unterschiedliche Maschinen und  
30 Geräte verwendet. In Zusammenhang mit Photovoltaik-Anlagen wird die Nutzung von elektrischer Energie in  
31 absehbarem Zeitraum zu einer neuen Herausforderung werden. Strom ist unumstritten die kostbarste Energieform,  
32 da einerseits keine Emissionen bei der Verwendung entstehen und andererseits der universelle Einsatz große Vorteile  
33 in der Verwendung bietet. Zahlreiche Entwickler forschen derzeit an Speichermöglichkeiten, die überschüssige  
34 elektrische Energie aufnehmen und bei Bedarf wieder in gleicher Form abgeben.

35       In Österreich wird mehr Energie importiert als exportiert, das gilt für alle Energieträger gleichermaßen. Gemäß  
36 der Statistik Austria [5] werden absolut 328 TWh importiert, dem gegenüber stehen 75 TWh, die exportiert werden.

1 Bemerkenswert ist, dass Strom verhältnismäßig am ausgeglichensten bilanziert. Der Nettostromimport liegt im Jahr  
 2 2014 bei 9,09 TWh, dies entspricht einem Handelswert im Import von rund 350 Millionen Euro (vergl. Tabelle 2-2 und  
 3 Tabelle 2-3). Bezogen auf den durchschnittlichen Personenverbrauch, wie in Abbildung 1-9 dargestellt, von rund  
 4 45.000 kWh, ist der Nettostromimport gleich dem Durchschnittsenergieverbrauch von 202.000 Personen (2,4% der  
 5 Bevölkerung).

6 Der Grund für den Stromhandel liegt im Spitzenenergiebedarf, welcher alleine durch die primär produzierenden  
 7 Kraftwerke, die ständig für den Grundbedarf in Betrieb sind, nicht bewältigt werden kann. Österreich hat, bedingt  
 8 durch die Topografie der Alpen, gute Möglichkeiten, Strom in Form von potenzieller Energie in Wasserkraftwerken  
 9 zu speichern, daher wird der Strom billiger eingekauft als verkauft.

Tabelle 2-2: Energieexporte in Österreich 2014, aufgeteilt in Energiemedien [5]

	relative Energiemenge	Energiemenge TWh	Handelswert Mrd €	Cent/kWh
<b>Energieexporte 2014:</b>				
Elektrische Energie	23,30%	17,47	0,84	<b>4,81</b>
Erneuerbare Energie	8,00%	6,00	kA	
Kohle	0,01%	0,01	kA	
Öl	38,00%	28,49	1,83	<b>6,42</b>
Gas	30,70%	23,02	0,39	<b>1,69</b>
<b>Summe</b>	<b>100,00%</b>	<b>74,98</b>	<b>3,06</b>	

Tabelle 2-3: Energieimport in Österreich 2014, aufgeteilt in Energiemedien [5]

	relative Energiemenge	Energiemenge TWh	Handelswert Mrd €	Cent/kWh
<b>Energieimporte 2014:</b>				
Elektrische Energie	8,10%	26,56	1,02	<b>3,84</b>
Erneuerbare Energie	3,50%	11,48	kA	
Kohle	10,80%	35,42	0,55	<b>1,55</b>
Öl	48,10%	157,73	8,80	<b>5,58</b>
Gas	29,50%	96,74	2,64	<b>2,73</b>
<b>Summe</b>	<b>100,00%</b>	<b>327,92</b>	<b>13,01</b>	

10 Vergleicht man im Jahr 2014 den Nettoimport mit  $327,92 - 74,98 = 252,94$  TWh mit dem Bruttoinlandsverbrauch,  
 11 der 2014 bei 383,56 TWh stand, sieht man, dass ein Großteil des Bruttoinlandsverbrauches von 66 Prozent importiert  
 12 wurde, das heißt, Österreich ist noch weit entfernt von der Energieautarkie. Zum Erreichen dieses Ziels werden noch  
 13 umfangreiche Anstrengungen erforderlich sein, dies wiederum gibt einen Grund, die grundlegenden  
 14 Umwandlungsprozesse zu verstehen, um diese effizient lenken zu können.

### 2.3.5. Elektromagnetische Strahlungsenergie

15 Bei Kernfusions- und Kernspaltungsprozessen kommt es zum sogenannten Massendefekt, wodurch gewaltige  
 16 Energieausstöße entstehen, die mit der Relativitätstheorie erklärt sind und nach Gleichung (2-14) berechnet werden  
 17 können. Im Zuge der Prozesse wird ein großes Spektrum an elektromagnetischer Strahlungsenergie freigesetzt, die  
 18 zwischen ionisierender und nicht ionisierender Strahlung unterschieden werden. Bedingt durch ionisierende

1 Strahlung können Atomkerne durch Photonen angeregt werden, wodurch Atome oder Moleküle wiederum ionisiert  
 2 werden und wieder Photonen freigeben. Der wesentliche Teil der Sonnenenergie, der auf die Erde einfällt, liegt im  
 3 nicht ionisierenden Strahlungsbereich.

4 Die Abbildung 2-1 zeigt die spektrale Leistungsaufteilung der Sonnenenergie, die auf die Erde einfällt. Dabei ist  
 5 die Leistungsdichte nach Wellenlänge unterschiedlich. Man erkennt, dass die Strahlung, die auf Meereshöhe einfällt,  
 6 rund 25 Prozent weniger ist, als jene, die auf die Erdatmosphäre auftrifft. Diese Verluste sind aufgrund  
 7 unterschiedlicher Eigenschaften der Erdatmosphäre gegeben. Der Bereich der optisch sichtbaren Strahlungsenergie  
 8 beträgt einen Großteil der gesamten Strahlungsenergie. Die extraterrestrische Strahlungsintensität aufsummiert,  
 9 ergibt die Solarkonstante  $S_0=1367 \text{ W/m}^2$ , dadurch wird der Energieeintrag auf die Erde pro Flächeneinheit definiert.  
 10 Der Wert der Solarkonstante divergiert in unterschiedlichen Quellen nur geringfügig.

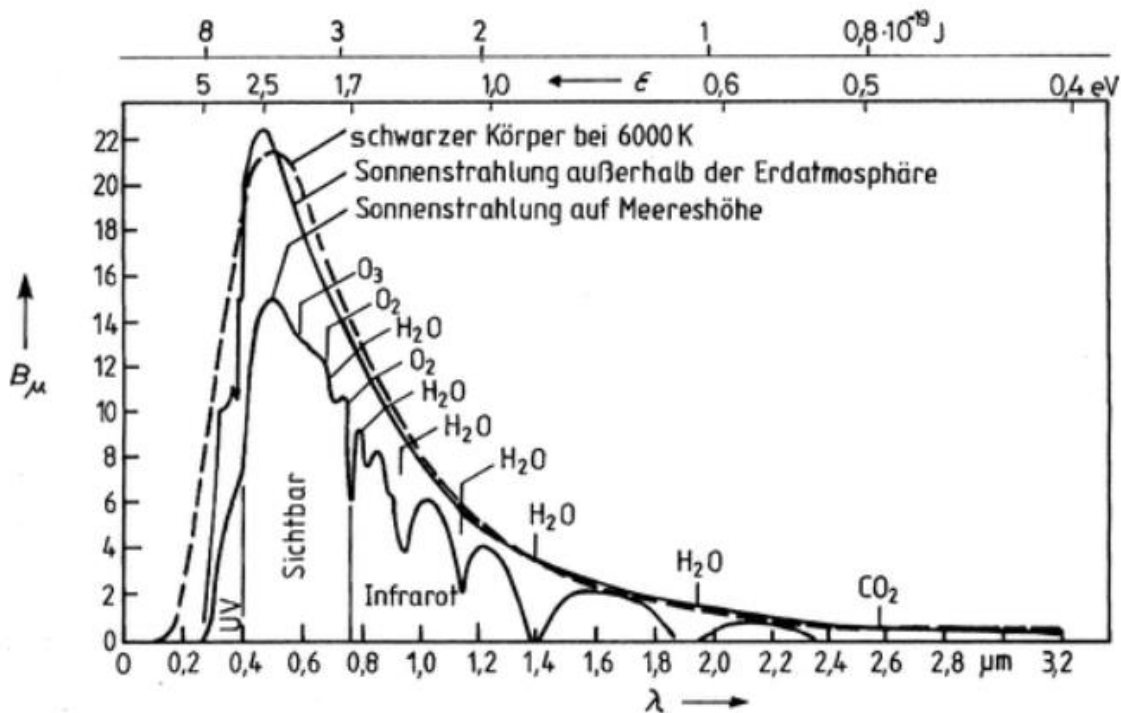


Abbildung 2-1: Spektrale Zusammensetzung der Sonnenstrahlung in Erdnähe.  $B_\mu$  ist die Bestrahlungsleistung in relativen Einheiten pro Wellenlängenintervall,  $\epsilon$  die Energie eines Photons,  $\lambda$  die Wellenlänge der Strahlung. Die angegebenen atmosphärischen Moleküle absorbieren Sonnenstrahlung bei den betreffenden Wellenlängen. [16]

11 Die Energie der Photonen lässt sich nach Plank wie folgt beschreiben:

$$E_{\text{photon}} = h \cdot f \quad (2-17)$$

12 mit Berücksichtigung der Wellenlänge:

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2-18)$$

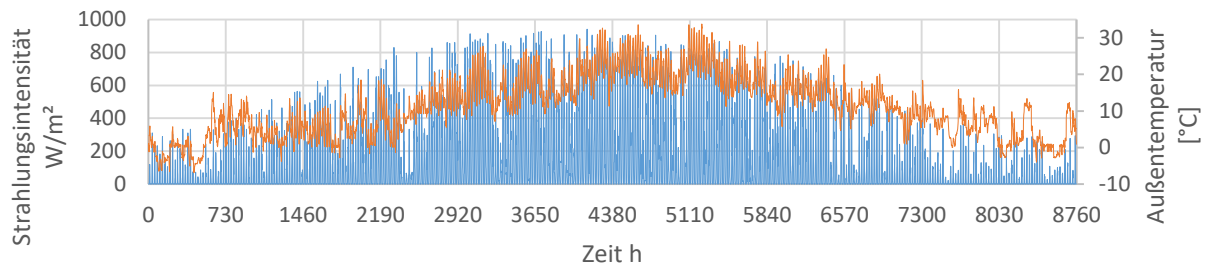
13 Dabei gilt:

$h$  plancksches Wirkungsquantum  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$f$  ... Frequenz des Photons –

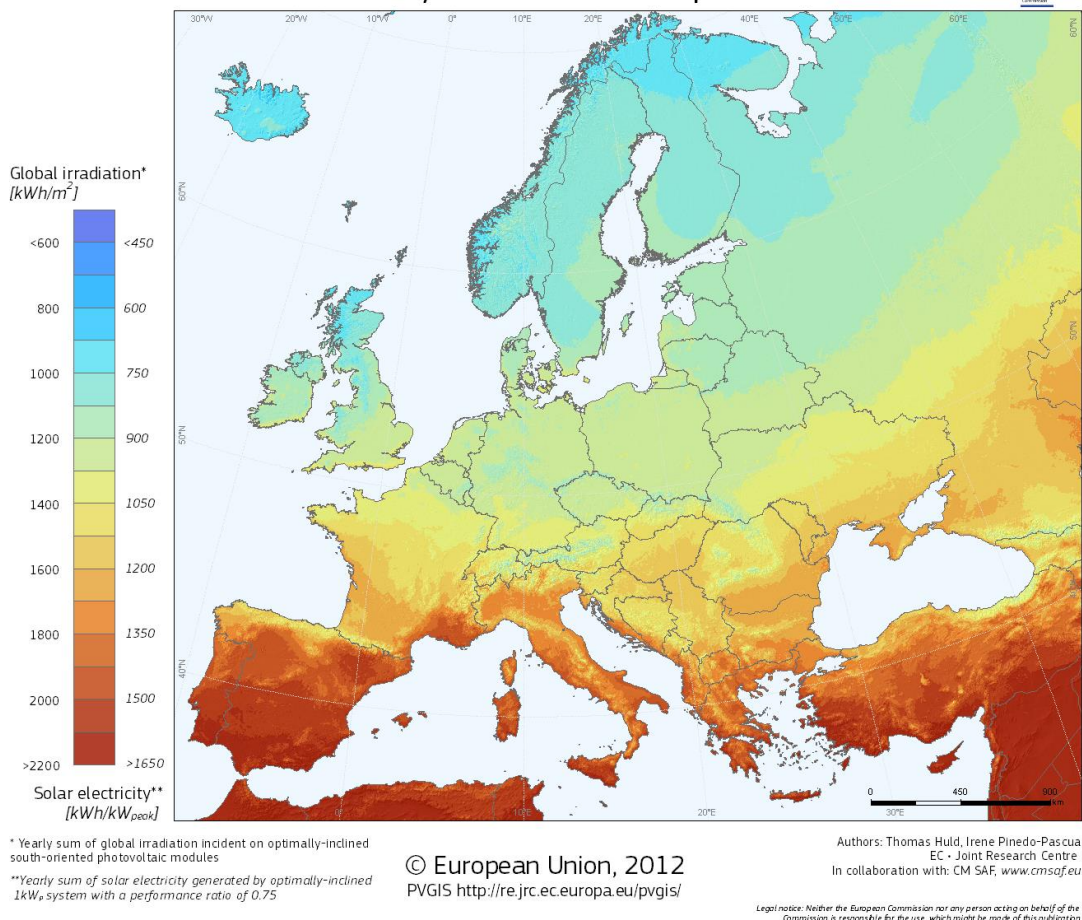
$c$  Lichtgeschwindigkeit  $299.792.458 \text{ m/s}$

$\lambda$  Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung  $\text{m/s}$



**Abbildung 2-2: Strahlungsintensität und Außentemperatur aus den halb synthetischen Klimadaten (kurz HSK-Daten) für den Standort Wien-Schwechat [17]**

### Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



**Abbildung 2-3: Landkarte der Globaleinstrahlung (direkte und diffuse Strahlung) auf optimal geneigte Flächen nach Süden gerichtet; Mittelwert der Datenerhebung von 1996-2011, mit einer Rastergröße von 1x1 km nach [18] und [19]**

1 In der Abbildung 2-2 sieht man den zeitlichen Verlauf der solaren Strahlungsintensität, die sich vereinfacht in  
 2 vier Abschnitte gliedert, die die Jahreszeiten darstellen sollen. Im Winter ist die Strahlungsintensität etwa ein Viertel  
 3 von jener im Sommer und außerdem gibt es Phasen, in denen die Bewölkung stärker ausgeprägt ist und die  
 4 Sonnenstunden aufgrund der Erdumlaufbahn und geneigten Erdachse weniger sind. Dadurch ergibt sich, dass auf den  
 5 Winter lediglich 5% der gesamten Jahresenergie entfallen. In den Übergangszeiten im Frühling und im Herbst,  
 6 erkennt man aufgrund der Änderung der Neigung der Erdachse, dass die daraus resultierende Strahlungsintensität  
 7 zunehmend größer bzw. kleiner wird. Auf die Übergangszeiten entfallen jeweils knapp 25% der gesamten  
 8 Jahresenergie. Der Sommer bringt die größte Ausbeute an Strahlungsenergie mit rund 45% und einer hohen  
 9 Strahlungsintensität mit bis zu 940 W/m<sup>2</sup>.

1 Die aufsummierte Strahlungsintensität ergibt die Jahresleistung pro Flächeneinheit, welche in Wien im Mittel  
 2 1.200 kWh/m<sup>2</sup> beträgt. Bei einem Jahresbedarf an Endenergie von rund 300 TWh pro Jahr (vgl. Abbildung 1-9) in  
 3 Österreich, würde theoretisch die Fläche von 250 km<sup>2</sup> Absorberfläche erforderlich sein um diesen zu decken, wobei  
 4 keine Verluste berücksichtigt sind. 250 km<sup>2</sup> entspricht knapp mehr als der halben Fläche von Wien oder relativ zur  
 5 gesamten Staatsfläche gesehen, 0,3 Prozent.

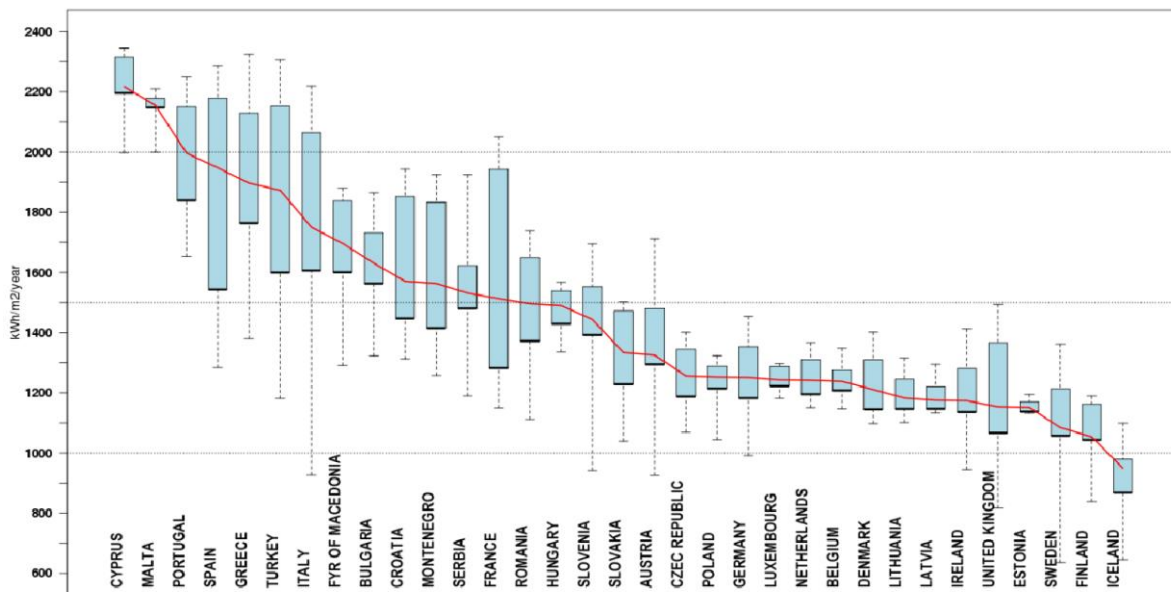


Abbildung 2-4: Verteilung der Globaleinstrahlung (direkte und diffuse Strahlung) auf optimal geneigte Flächen nach Süden gerichtet, unterteilt nach Ländern der EU27; Mittelwert der Datenerhebung von 1996-2011 mit einer Rastergröße von 1x1 km; 90% der Oberfläche liegt im blauen Bereich, die strichlierte Linie begrenzt den gesamten Wertebereich nach [18] und [19]

6 In den Abbildungen 2-3 und 2-4 ist die Verteilung der Globalstrahlung in Europa nach [18] und [19] dargestellt.  
 7 Die Studien, die als Grundlagen dienen, wurden von der Europäischen Union veranlasst und dienen in erster Linie  
 8 zur Abschätzung des Potentials zur Produktion von Photovoltaik-Energie. Diese Studien gelten aber auch allgemein  
 9 und unter anderem für die Nutzung von Solarthermie. In Anhang A ist die detailliertere Karte für Österreich  
 10 abgebildet.

## 2.4. Energieumwandlung und Speicherung

11 Energie ist in den meisten Fällen nicht in geeigneter Form vorhanden, daher ist man gezwungen,  
 12 Primärenergiequellen mit Hilfe von Umwandlungsprozessen nützlich zu machen. Es gibt zahlreiche Methoden, um  
 13 Energie in unterschiedliche Formen umzuwandeln, wobei stets die Effizienz von Interesse ist.

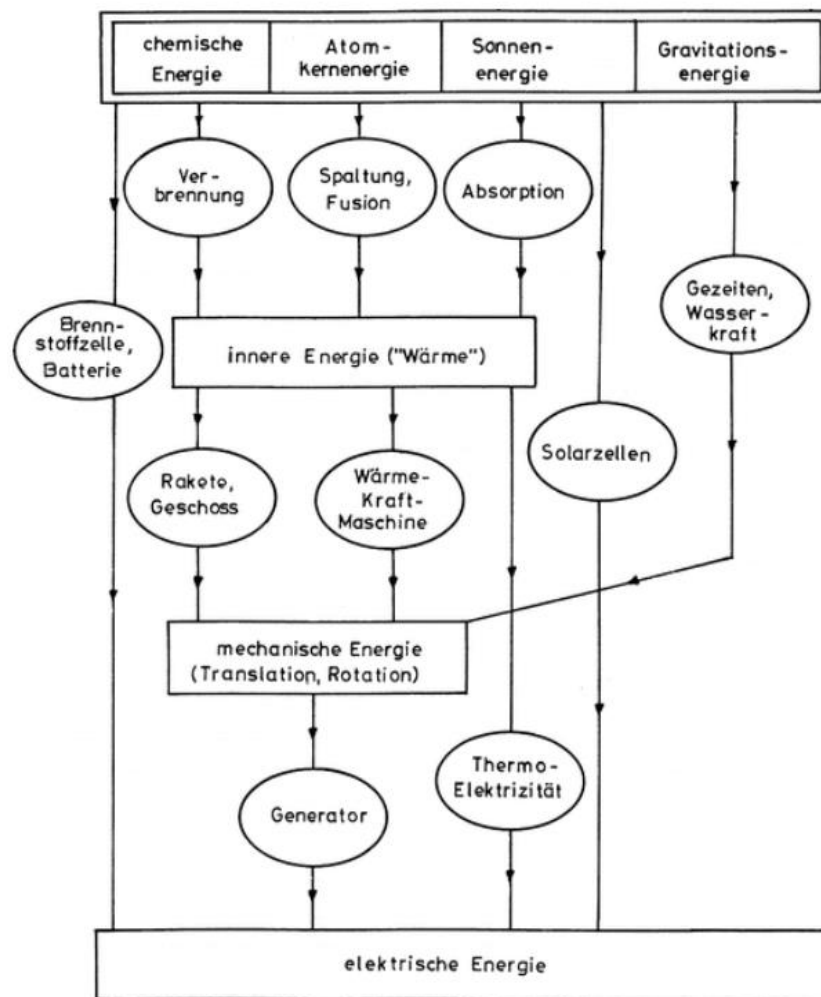
14 Bereits Höhlenmenschen wussten, dass Holz zum Heizen geeignet ist. Das vorhandene Wissen wurde sukzessiv  
 15 ausgebaut, und an den Erscheinungsformen von Energie wurde mittlerweile über mehrere Jahrhunderte intensiv  
 16 geforscht. Besonders erstrebenswert sind jene Formen, die für die geplante Verwendung leicht verwertbar sind,  
 17 denn dadurch soll die Energieform ohne, oder mit einfacher Umwandlung, verwertbar sein. Öl und Kohle haben  
 18 grundsätzlich gute Voraussetzungen und sind ohne viel Wissen über den Prozessablauf einfach verwendbar. Zu Beginn  
 19 der Industrialisierung, als Strom noch kein allgegenwertiges Produkt war, wurden Dampfmaschinen mit der Energie  
 20 von Kohle oder Öl betrieben.

21 Bedingt durch die Industrialisierung und dem Bedarf an einfach zu verwertenden Energiequellen, die Stand der  
 22 Technik waren und noch immer sind, wurde die Atmosphäre ab Anfang des 20. Jahrhunderts zunehmend belastet.  
 23 Um den Treibhauseffekt und der damit verbundenen Erderwärmung entgegenzuwirken, müssen nun alternative  
 24 Energiequellen intelligent genutzt werden.

25 Zur Minderung des Primärenergiebedarfs müssen folgende Kriterien an die Umwandlungsprozesse gestellt  
 26 werden:



- 1 • Möglichst verlustfreier Prozessablauf von Primärenergiequelle bis Einsatzort
- 2 • Möglichst hoher Einsatz von Umweltenergie und Sonnenenergie
- 3 • Möglichst universell einsetzbare Energieform
- 4 In den letzten Jahrzehnten ist mit steigender Treibhausgasbelastung das Bewusstsein zur Schonung der Umwelt
- 5 gestiegen und auf staatlicher Vorgabe müssen vermehrt Energieeinsparungsmaßnahmen umgesetzt werden. Infolge
- 6 vorgegebenen Optimierungen werden Alternativen gesucht, welche erforscht und teilweise umgesetzt werden.
- 7 Mit dem zunehmenden Verständnis und der Verwendung von neuen Technologien, steigt aber auch die
- 8 Wirtschaftlichkeit.



**Abbildung 2-5: Technische Wege der Energieumwandlung; Doppelt eingerahmt sind die verfügbaren Primärenergien, einfach eingerahmt die benötigten Sekundärenergien. Im Oval stehen Umwandlungsprozesse und -maschinen [16]**

9 Speziell elektrische Energie ist eine der Energieformen, die für viele Prozesse leicht zu verwerten ist, daher ist  
 10 diese Energieform besonders attraktiv. Abbildung 2-5 zeigt technische Wege der Umwandlung von  
 11 Primärenergiequellen zu Strom. Für den Einsatz energiesparender Heizsysteme sind vor allem jene Wege interessant,  
 12 die CO<sub>2</sub>-neutral und somit umweltschonend sind. Die Nutzung von Sonnenenergie ist bei den Umwandlungsprozessen  
 13 besonders interessant, da die Sonnenenergie in absehbarer Zeit nicht erlischt. Wasser- und die Gezeitenkraft sind  
 14 ebenfalls permanent vorhandene Ressourcen, die durch Sonnenenergie und der Anziehungskraft des Mondes gegeben  
 15 sind.

16 Abbildung 2-6 zeigt die derzeit möglichen Umwandlungsprozesse anhand des Energiedreiecks. Dabei kann aus  
 17 fast jeder Energieform eine andere Energieform erstellt werden, aber Umwandlungen erfolgen dabei natürlich nicht  
 18 verlustfrei. Die Wärmeenergie ist bei der Energieumwandlung immer ein zentrales Thema, da bei jedem

- 1 unbeabsichtigten Verlust automatisch Wärmeenergie durch die Enthalpie beim Betrieb der Maschine entsteht. Durch
- 2 unbeabsichtigte Kraftwirkung können Maschinen, bei der Energieerzeugung durch Wärme, zerstört werden.

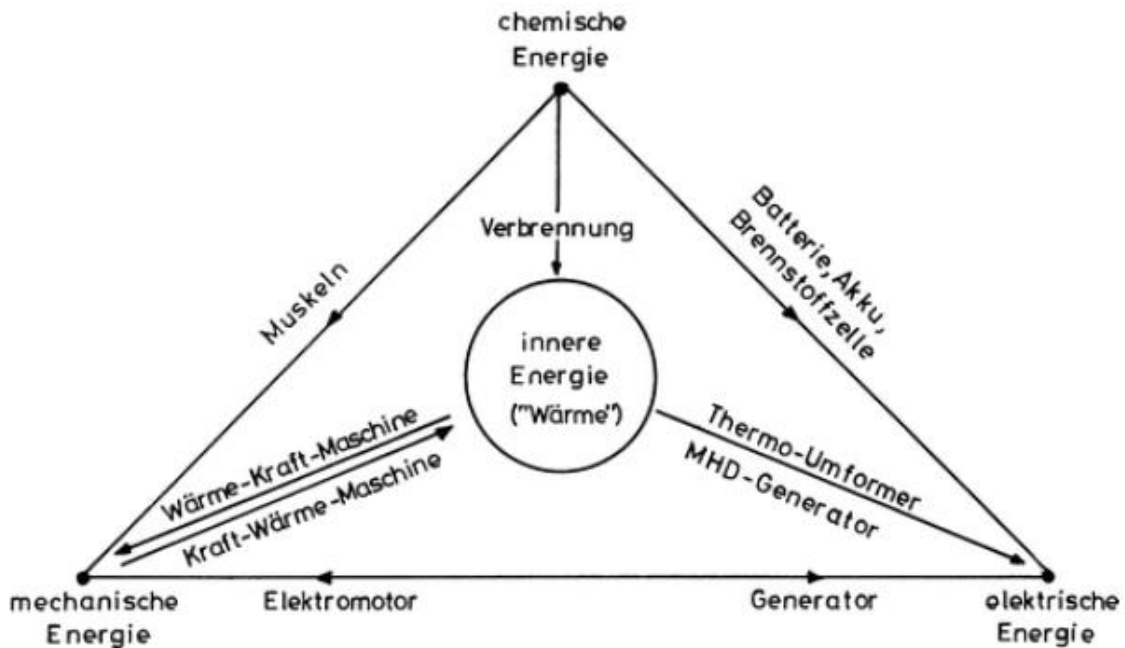


Abbildung 2-6: Energieumwandlungs-Dreieck (MHD steht für Magneto hydrodynamik) [16]

### 2.4.1. Carnot'sche Wirkungsgrad

- 3 Wärmepumpen funktionieren nach dem Prinzip der Kraft- Wärmekoppelung, die durch den Carnot'schen
- 4 Wirkungsgrad beschränkt sind. Der Energiefluss der zyklisch arbeitenden Kraft- Wärmemaschine kann gemäß [16],
- 5 wie in Abbildung 2-7 dargestellt, abgebildet werden.

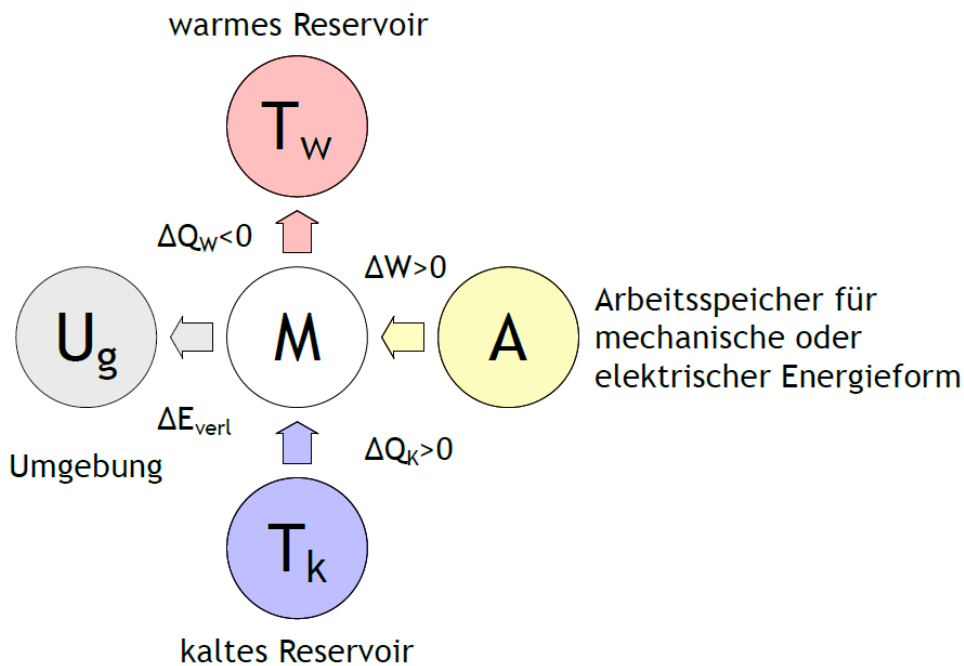


Abbildung 2-7: Energiefluss einer zyklisch arbeitenden Kraft- Wärmemaschine [16]

- 6 Der Wirkungsgrad einer idealen, (verlustfrei) und zyklisch arbeitenden Kraft- Wärmemaschine, wird durch das
- 7 Verhältnis der abgeführten Wärmeenergie zur zugeführten Arbeitsenergie berechnet. Die Gleichung (2-19)

- 1 beschreibt dabei die theoretische Obergrenze des Wirkungsgrades nach Carnot. In dieser Gleichung wird der lineare  
2 Zusammenhang zwischen Wärme- und Energiestrom verwendet.

$$\eta_{Carnot,max} = \frac{-\Delta W}{\Delta Q_w} = \frac{\Delta W}{\Delta W + \Delta Q_k} = \frac{\Delta Q_w + \Delta Q_k}{\Delta Q_w} = \frac{T_w - T_k}{T_w} = 1 - \frac{T_k}{T_w} \quad (2-19)$$

- 3 dabei ist:

$T_w$  Prozesstemperatur warm, bei einer Wärmepumpe Verflüssigungstemperatur absolut gemessen K

$T_k$  Prozesstemperatur kalt, bei einer Wärmepumpe Verdampfungstemperatur absolut gemessen K

$\Delta W$  Arbeitsstrom J

$\Delta E_{vert}$  Verluststrom J

$\Delta Q_i$  Wärmestrom J

- 4 Der Kehrwert des Carnot'schen Wirkungsgrades (2-19) ergibt die Leistungszahl COP (Coefficient of Performance):

$$COP_{max,Carnot} = \frac{T_w}{T_w - T_k} \quad (2-20)$$

- 5 Die Leistungszahl in (2-20) stellt ein theoretisches Maximum dar, dadurch kann man die Leistungszahl als  
6 Ungleichung mit einer theoretischen Obergrenze darstellen:

$$COP_{real} \leq \frac{T_w}{T_w - T_k} \quad (2-21)$$

- 7 Setzt man für die Temperaturspreizung  $\Delta T$  statt  $T_w - T_k$  in (2-21) ein und wandelt die Temperatur statt Kelvin in  
8 Celsius um, erhält man die Obergrenzen der Leistungszahlen in anschaulicher Form:

$$COP_{real}(T_w, \Delta T) \leq \frac{T_w + 273,15}{\Delta T} \quad (2-22)$$

- 9 wobei  $T_w$  und  $\Delta T$  jeweils in Grad Celsius einzusetzen sind. Die Gleichung (2-22) wird grafisch, wie in der Abbildung  
10 folgend, dargestellt.

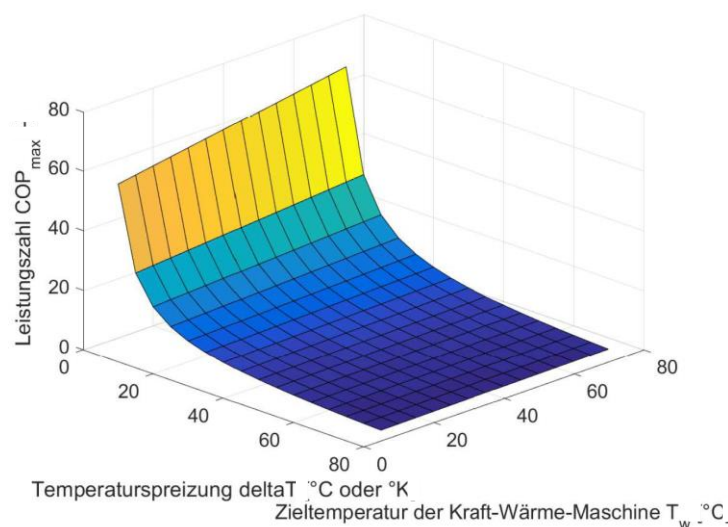


Abbildung 2-8: Maximale Leistungszahl gem. dem Wirkungsgrad nach Carnot

- 11 In Abbildung 2-8 ist die maximale Leistungszahl, abhängig von der Temperaturspreizung und der Zieltemperatur,  
12 abgebildet. Sie zeigt, dass die Temperaturspreizung zwischen kaltem und warmen Reservoir die größte Auswirkung

- 1 auf die Leistungszahl der Kraft- Wärmemaschine darstellt. Die Zieltemperatur des Prozesses spielt nur eine  
 2 untergeordnete Rolle, jedoch steigt die Leistungszahl mit steigender Temperatur.

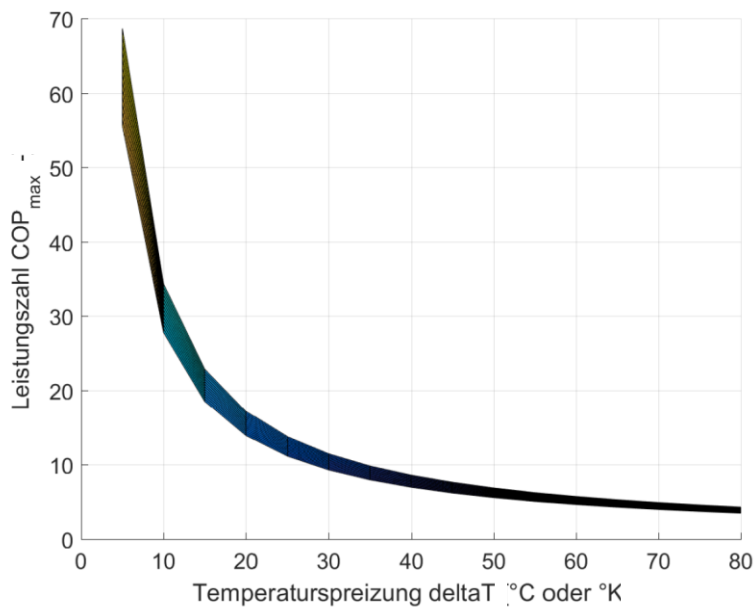


Abbildung 2-9: Maximale Leistungszahl abhängig von der Temperaturspreizung

3 Die Abbildung 2-9 ist die Abbildung 2-8 in der  $\Delta T$ -COP-Ebene betrachtet. In der zweidimensionalen Darstellung  
 4 wird noch deutlicher erkennbar, dass die Temperaturspreizung die Leistungszahl der Kraft-Wärme-Maschine am  
 5 wesentlichsten bestimmt. Für den Betrieb einer Wärmepumpe bedeutet diese theoretische Vorgabe, dass die  
 6 Temperaturspreizung für den effizienten Betrieb niedrig gehalten werden muss. Für die Heizung mit einer  
 7 Niedertemperaturheizung sind in Gebäuden also weit verbreitete Flächenheizsysteme erforderlich.

8 Beim Carnot'schen Wirkungsgrad ist ein streng reversibler Prozess vorausgesetzt, welcher unendlich langsam bei  
 9 verschwindenden Temperaturen und Druckdifferenzen abläuft. Bei real ablaufenden Prozessen sind diese  
 10 Voraussetzungen nicht gegeben. Real betriebene Maschinen laufen nicht verlustfrei, daher müssen auch die Verluste  
 11 berücksichtigt werden. Die Gleichung (2-19) muss daher durch  $\Delta E_{verl}$  erweitert werden.

$$\eta = \frac{\Delta W}{\Delta W + \Delta Q_k + \Delta E_{verl}} \quad (2-23)$$

12 Prozesse, bei denen Entropie zum Beispiel aufgrund von Reibung entsteht, werden als irreversibel bezeichnet.  
 13 Für reale, zyklisch arbeitende Kraft- Wärme- Maschinen mit Wärmeleitung zwischen Arbeitsmedium und kalten  
 14 Reservoirs, wird in [16] nach längerer Herleitung folgender Wirkungsgrad angegeben:

$$\eta_{max,L,max} = 1 - \sqrt{\frac{T_k}{T_w}} \quad (2-24)$$

15 Der Wirkungsgrad, unter Berücksichtigung der Wärmeleitung, ist zirka um den Faktor zwei kleiner als der  
 16 theoretische Wirkungsgrad nach Carnot. Stellt man beide Wirkungsgrade im Verhältnis gegenüber, erhält man:

$$\frac{\eta_{max,L,max}}{\eta_{Carnot}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{T_k}{T_w}}} \quad (2-25)$$

17 Beim Carnot-Prozess, unter Berücksichtigung von Reibungsverlusten, erhält man für den Wirkungsgrad einer  
 18 Kraft-Wärme-Maschine bei maximaler Leistung [20]:

$$\eta_{reib,L_{max}} = \frac{1 - \frac{T_k}{T_w}}{2} \quad (2-26)$$

1 Mittlerweile werden Gütegrade für Wärmepumpen angegeben. Der Gütegrad beschreibt das Verhältnis zwischen  
 2 der realen Leistungszahl und der ideellen Leistungszahl gemäß Gleichung (2-20).

$$\text{Gütegrad} = \frac{COP_{real}}{COP_{ideal}} \quad (2-27)$$

3 Der Gütegrad von modernen Wärmepumpen liegt zum Großteil zwischen 40 und 60 %, abhängig von Fabrikat und  
 4 Betriebssystem. Die physikalisch hergeleiteten Grenzwerte, unter Annahme von vereinfachten Randbedingungen,  
 5 gemäß (2-25) und (2-26), bieten ziemlich gute Anhaltspunkte für die Wirkungsweise von realen Maschinen.

6 Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass moderne Wärmepumpen tendenziell weit entwickelt sind.  
 7 Auch bei der Berücksichtigung von Technologiefortschritten führt der effiziente Einsatz (niedrige  
 8 Temperaturspreizung) zu den größten Ersparnissen beim Primärenergieeinsatz. Eine theoretisch hoch entwickelte  
 9 Wärmepumpe, mit dem Gütegrad von 80 Prozent, könnte trotz des Technologiefortschritts, nicht mit einer gut  
 10 ausgelegten Wärmepumpe, mit dem heutigen Stand der Technik, mithalten (siehe Abbildung 2-10). Mit jeder  
 11 Verringerung der Temperaturspreizung, wird die Leistungszahl überproportional erhöht.

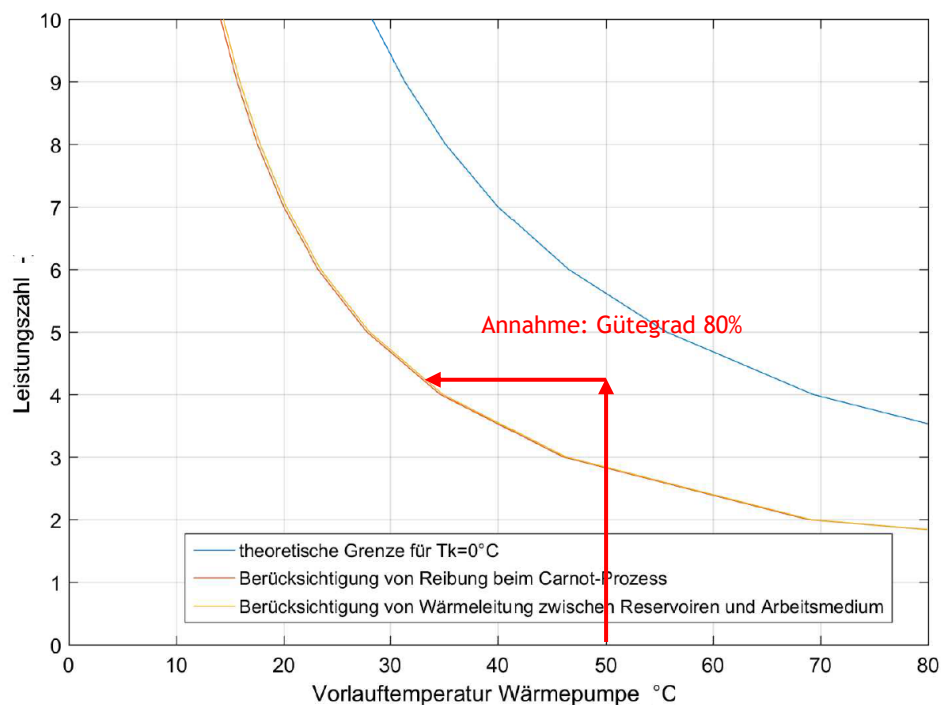


Abbildung 2-10: Leistungszahlen im Vergleich abhängig von der Vorlauftemperatur

12 Im Anhang A sind, zum Vergleich, drei Datenblätter von Wärmepumpen der Firma Ochsner angefügt. In diesen  
 13 werden die Leistungskurven von einer Luft- Wasser-, Sole- Wasser- und einer Wärmepumpe mit Direkterwärmung  
 14 des Arbeitsmittels aufgezeigt. Auf diesen Datenblättern sieht man, dass der Wirkungsbereich der unterschiedlichen  
 15 Wärmepumpen anders ausgelegt ist. In Abhängigkeit des Trägermediums unterscheiden sich die Formen der  
 16 Heizleistungskurve (vgl. Abbildung A.1, A.2 und A.3 im Anhang A), wobei die Bauform mit Sole und Direkterwärmung,  
 17 annähernd ähnliche Leistungszahlen besitzen. Bei einer Temperaturspreizung von 50 Kelvin bei  $T_{soll}=50^{\circ}\text{C}$  wird eine  
 18 Leistungszahl von ungefähr 3 erzielt, etwas abgeschlagen liegt die Luft-Wasser-Wärmepumpe mit ungefähr 2,7.  
 19 Dieser Wert liegt, verglichen mit dem errechneten Wert für die Leistungszahl gemäß Abbildung 2-10, auf der gelb  
 20 dargestellten Kurve.

### 2.4.2. Energiespeicher (Allgemein)

1 Jeder Stoff kann, abhängig von der absoluten Temperatur und der spezifischen Wärmespeicherkapazität,  
 2 unterschiedliche Energiemengen aufnehmen. Dabei ist die spezifische Wärmespeicherkapazität die beschreibende  
 3 Größe für das Material, die jene Energiemenge beschreibt, die erforderlich ist, um einen Stoff um einem Kelvin zu  
 4 erwärmen oder zu kühlen. Wasser hat hier mit der chemischen Konfiguration als Dipolmolekül eine besonders hohe  
 5 Aufnahmefähigkeit.

6 Ein Medium, welches Energie in einer beliebigen Form sammelt und erlaubt, diese Energiemenge zeitversetzt  
 7 wieder abzurufen, ohne verhältnismäßig viel Energie zu verlieren oder aufzuwenden, kann man als Speicher  
 8 bezeichnen. In der klassischen Physik findet man als häufigste Vertreter die chemische, mechanische und  
 9 wärmemäßige Energiespeicherung. Elektrische Energie als Energieform kann nur in untergeordneten Zwecken mit  
 10 Hilfe von Kondensatoren gespeichert werden. Die drei häufigsten Anwendungsgebiete für die Energiespeicherung  
 11 sind hier dargestellt:

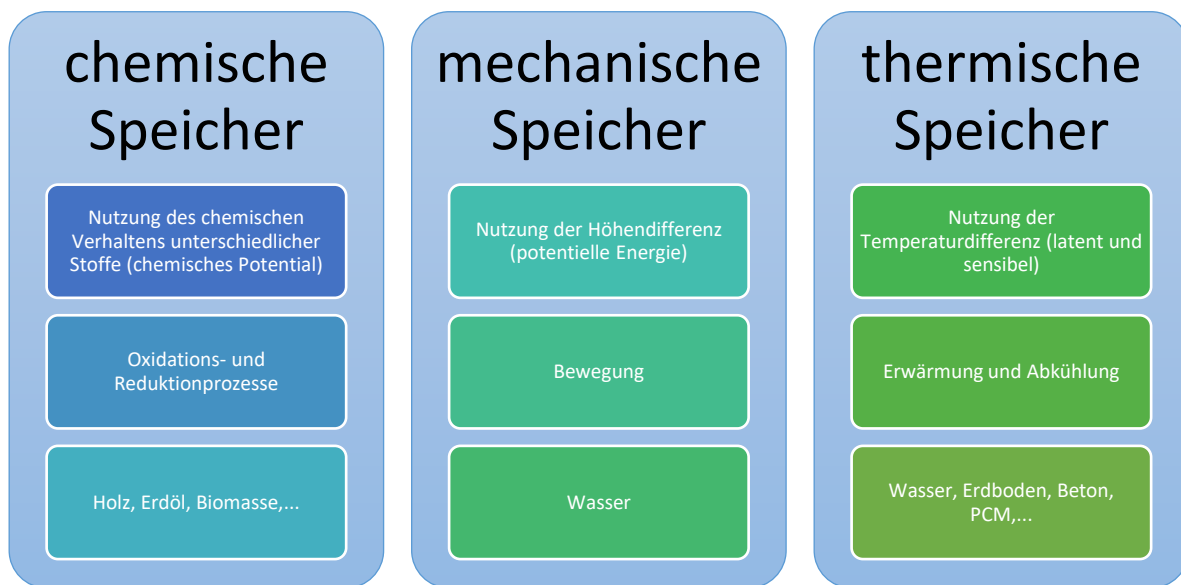


Abbildung 2-11: Die drei häufigsten und größten Energiespeicherarten gegliedert nach Energieform

12 Abbildung 2-11 zeigt die größten Energiespeichermöglichkeiten, gegliedert nach Energieformen, wobei hier die  
 13 wesentliche physikalische Eigenschaft der Speicherungsform beschrieben ist, sowie die Umsetzungsart und die  
 14 typischen Energieträger.

15 Die Gibb'sche Fundamentalgleichung beschreibt die grundlegenden Eigenschaften des chemischen Potentials,  
 16 wodurch in weiterer Folge die Änderung der inneren Energie ermittelt werden kann. Die Werte des chemischen  
 17 Potentials sind durch Experimente bestimmt und zur Anwendung in vielen Tabellenwerken beschrieben. Zum näheren  
 18 Verständnis von chemischen Speichern, sind Grundkenntnisse zu den chemischen Umwandlungsprozessen  
 19 erforderlich, weshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht näher auf diese Art der Speicherung eingegangen wird.

$$dU = T dS - p dV + \sum \mu_i dn_i \quad (2-28)$$

20 mit:

$U$	Innere Energie J
$T$	absolute Temperatur K
$S$	Entropie J/K
$p$	chemisches Potential J/(mol K)
$V$	Volumen $m^3$

$\mu_i$  chemisches Potential  $J/(mol K)$

$n_i$  **Stoffmenge mol**

1 Mechanische Energiespeicher arbeiten mit der Umformung von potenzieller Energie zu kinetischer Energie. Bei  
2 diesen Vorgängen gilt die Bernoulligleichung, die eine Spezialisierung des Energieerhaltungssatzes darstellt (vgl.  
3 Gleichung (2-9)):

$$\frac{\rho v^2}{2} + p + \rho g h = const. \quad (2-29)$$

4 mit:

$m$  Masse  $kg$

$v$  Fließgeschwindigkeit  $m/s$

$p$  Druck  $Pa$

$\rho$  Dichte  $kg/m^3$

5 Im Kapitel 2.3.1 wurden zum Thema Wärmeenergie, die physikalischen Grundlagen zusammengefasst. Die  
6 Gleichung (2-10) beschreibt die Wärmespeicherkapazität von Bauteilen, gemäß diesem Zusammenhang steigt die  
7 innere Energie mit der Temperatur. Im üblichen Anwendungsbereich von Wärmespeichern stimmt dieser  
8 Zusammenhang sehr gut, da die Wärmespeicherkapazität nahezu konstant bleibt. Bei der Annäherung zum absoluten  
9 Nullpunkt konvergiert die Speicherkapazität gegen Null.

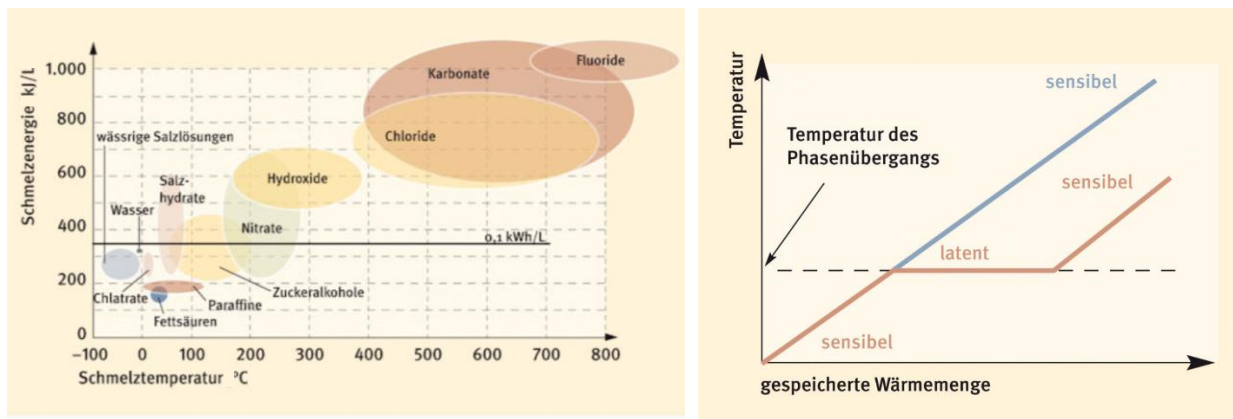
10 Bei Änderungen des Aggregatzustandes können chemische Prozesse den Phasenübergang beeinflussen. Zum  
11 Beispiel entstehen beim Gefrieren von Wasser stabile Eiskristalle. Um diese Eiskristalle wieder aufzulösen, muss eine  
12 beträchtliche Energiemenge (Schmelzenthalpie) zugeführt werden. Bemerkenswert ist bei diesem Prozess, dass die  
13 Temperatur des Stoffes nicht zu- oder abnimmt, sondern annähernd konstant bleibt. Die Reorganisation des Stoffes  
14 im anderen Aggregatzustand erfordert Energie, die wiederum nicht fühlbar ist. Dieses Phänomen bezeichnet man  
15 als latente Wärmespeicherung.

#### 16 Phase Change Materials

17 Phasenumwandlungsmaterialien (in Folge kurz PCM) binden verhältnismäßig viel Energie bei geringer  
18 Temperaturspreizung. Zum Beispiel benötigt man zum Schmelzen von Eis 334 kJ/kg Schmelzenthalpie, was jener  
19 Menge an Energie entspricht, die zugeführt werden muss, um Wasser mit 0°C auf 80°C zu erhitzen (die spezifische  
20 Wärmespeicherkapazität von Wasser liegt bei ungefähr 4,18 kJ/kg.K [21]).

21 In Abbildung 2-12 sind die wesentlichen Anwendungsbereiche links, die Funktionsweise rechts, dargestellt. Durch  
22 die Verwendung unterschiedlicher Stoffe ergeben sich unterschiedliche Anwendungsbereiche der PCM. Technisch  
23 gesehen ist der entstehende Regulierungseffekt für viele Anwendungen von Vorteil, denn auch in Räumen trachtet  
24 man nach einem angemessenen Klima, dass behaglich ist. Zur Vermeidung der sommerlichen Überhitzung von  
25 Leichtbauten, können mit geeigneten PCM zusätzliche Speicherkapazitäten geschaffen werden. Die Energiemengen  
26 werden aufgenommen und in die Phasenumformung kompensiert, anstatt auf das direkte Raumklima einzuwirken.  
27 Durch den Übergang von Aggregatzuständen müssen PCM so beschaffen sein, dass die häufigen Temperaturzyklen  
28 reversibel durchlaufen werden, ohne Schaden zu nehmen. Derzeit gibt es diverse Hersteller am Markt, welche PCM  
29 in unterschiedlichen Baustoffen wie Gipskartonplatten und Putzen integriert.

30 Auch als Eisheizung kann der latente Wärmeübergang nützlich sein, dabei wird einem Wasserbehälter so lange  
31 Wärme entzogen, bis das Wasser im Behälter gefroren ist. Zum Auftauen des Wassers wird Sonnenenergie eingesetzt  
32 und der Zyklus beginnt von Neuem. Zur genaueren Beschreibung müsste man jedoch auf die einzelnen Stoffe speziell  
33 eingehen.



**Abbildung 2-12: links: Schmelzenergie diverser Materialklassen, welche als Phasenübergangsmaterial untersucht und eingesetzt werden mit zugehörigen thermischen Anwendungsbereich; rechts: Temperaturverlauf als Funktion der gespeicherten Wärmemenge bei sensibler und latenter Wärmespeicherung gem. [22]**

1 **Sorptionsspeicher**

- 2 Bei der Sorption wird durch die Verbindung zweier Stoffe, Energie in Form von Wärme frei oder kann dabei  
 3 gespeichert werden. Hier kann zwischen Absorption und Desorption unterschieden werden, wobei die Absorption  
 4 den Aufnahmevorgang des Festkörpers beschreibt, wodurch Bindungsenergie frei wird. Im Gegensatz dazu steht die  
 5 Desorption, bei der die Bindungsenergie überwunden werden muss, um die Stoffe zu trennen.



### 3. Methodische Grundlagen und Anwendung

1 Energieströme in Bauwerken sind die wesentlichen Einflussgrößen zur Bestimmung der Energieeffizienz. Zur  
 2 Ermittlung des Bedarfes stellt sich immer wieder die Frage, wieviel Energie strömt wann, wohin. Die Frage ist oft  
 3 nicht leicht zu beantworten. Jedes Bauwerk ist individuell errichtet, somit muss man eine Reihe an Eigenschaften  
 4 zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Planung kennen.

5 Im Zuge der laufenden Verschärfung der OIB-Richtlinien bis Anfang 2021, werden Fachplaner und Bauphysiker  
 6 gefordert sein, neue Einsparungsmaßnahmen zu treffen. Ab 2017 wird auch das Nachweisformat für Wohngebäude  
 7 verändert, welches sinngemäß bislang nur bei größeren Renovierungen angewendet wurden. Der  $f_{GEE}$ -Faktor  
 8 vergleicht das projektierte Objekt mit einem, welches im Jahr 2007 nach dem damals gültigen Stand der  
 9 Gesetzgebung, errichtet wurde.

10 Im ersten Schritt kann man ein Bauwerk als Verkettung einzelner Bauteile betrachten. Legt man die  
 11 Systemgrenzen über die Gebäudehülle, kann man, wie bereits in Kapitel 2.1.1 beschrieben, die Energiemengen  
 12 bilanzieren und den ersten Eindruck gewinnen. In weiterer Folge kann man die Bilanzierungsregeln Schritt für Schritt  
 13 verfeinern und je nach Anwendungsfall vom Groben ins Feine detaillieren, wobei in den einzelnen Bauteilen  
 14 unterschiedliche Verfeinerungsgrade denkbar sind.

15 Zunächst wird in diesem Kapitel auf den Energieausweis eingegangen, da dieser gesetzlich verankert ist und  
 16 einen klaren Rahmen zur groben Bilanzierung vorgibt. 2012 wurden die Vorgaben zum Energieausweis geändert,  
 17 seitdem müssen neben dem Heizwärmebedarf und dem Endenergiebedarf auch der Primärenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-  
 18 - Belastung ausgewiesen werden, wobei sich beide aus dem Endenergiebedarf ableiten lassen. Die OIB 6 gibt die  
 19 Konversionsfaktoren gemäß Abbildung 3-1 an. Dabei erkennt man, dass aus Sicht der Treibhausgase, Kohle, Heizöl  
 20 und Erdgas klar aus nicht erneuerbaren Ressourcen gewonnen werden und ein hohes Maß an Kohlendioxid durch die  
 21 Verwertung ausgestoßen wird. Der Österreichische Strom-Mix liefert allerdings auch nur bescheidene Resultate. Die  
 22 Fernwärme schneidet im Vergleich verhältnismäßig gut ab und die Biomasse ist mit Abstand am besten zur Reduktion  
 23 der Treibhausgase geeignet.

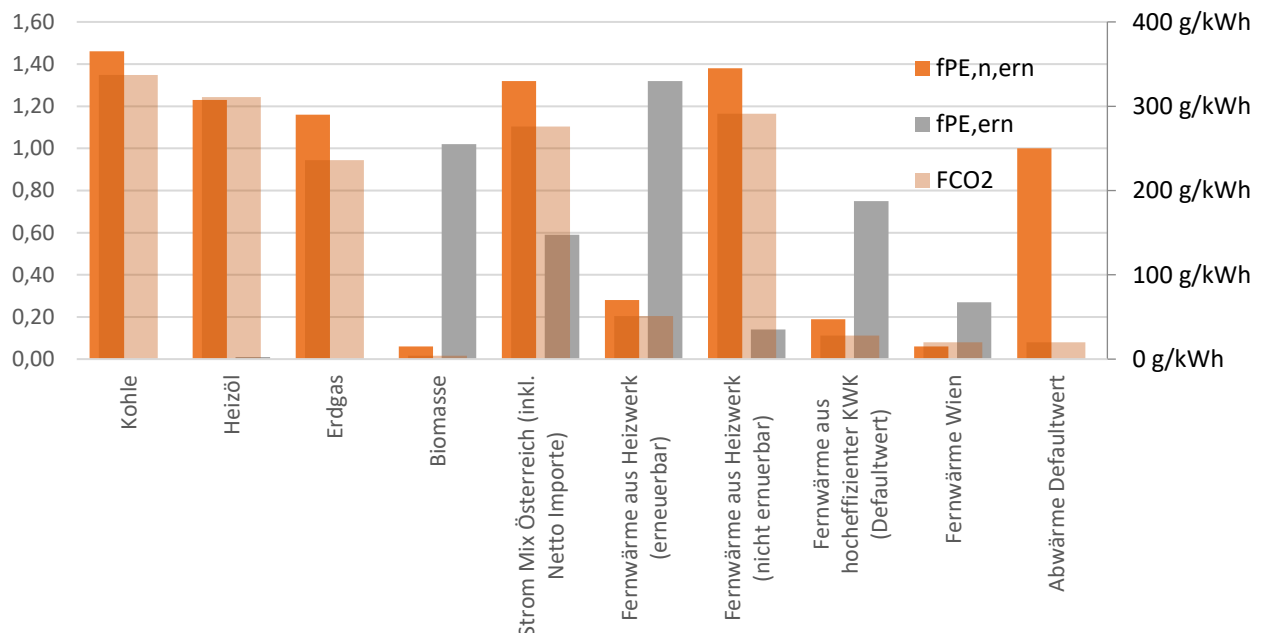


Abbildung 3-1: Vergleich der Konversionsfaktoren nach Energieträger (geteilt in erneuerbaren und nicht erneuerbaren Anteil) und Kohlendioxidbelastung gem. OIB 6 [23]

24 Die Verwendung von Wärmepumpen nimmt derzeit zu, jedoch stellt sich hier die Frage, ob diese Entwicklung  
 25 günstig ist. Im Vergleich zum allgemeinen Strom-Mix in Österreich gibt die EVN an, dass diese im Zeitraum von  
 26 01.10.2013 bis 30.09.2014 nur 116,46 g/kWh Emissionen verursacht haben. Demnach ist ein Einsparungspotential  
 27 von über 50 Prozent an Umweltbelastung gegeben. Bei einer Leistungszahl von ungefähr 6 ( $T_k=8^\circ\text{C}$ ,  $T_w=35^\circ\text{C}$ ), wird

1 beim Heizen eine Belastung von rund 20 g/kWh Heizleistung frei. Mit diesem Wert liegt man in der Nähe der  
2 Fernwärme und der hocheffizienten Kraft- Wärme- Koppelung. Im Durchschnitt liegt die Jahresarbeitszahl niedriger  
3 als 5, somit müssen aus energiewirtschaftlicher Sicht Änderungen erfolgen, um die gleiche Effizienz erreichen zu  
4 können. Derzeit gibt es am österreichischen Markt Stromanbieter, die ausschließlich Strom aus erneuerbaren  
5 Energiequellen produzieren und anbieten, dabei wäre die CO<sub>2</sub> Emission 0 g/kWh. Bei dieser Berechnung ist die  
6 Energie, die während dem Lebenszyklus der Kraftwerke (graue Energie) benötigt wird, jedoch nicht berücksichtigt.  
7 Gemäß Stromkennzeichnungsverordnung § 78 Abs. 1 und 2 ElWOG 2010 ist das aber auch nicht gefordert. Unter  
8 Berücksichtigung der Umweltbelastung, besteht Potential zur Treibhausgasreduktion durch die Anwendung von  
9 Wärmepumpen, allerdings muss der Strom dazu zum Großteil durch erneuerbare Energiequellen geliefert werden.

10 In den vorhergehenden Kapiteln wurden allgemein anthropogene Einflüsse, physikalische Grundlagen und der  
11 urbane Stoffhaushalt behandelt. In den folgenden Kapiteln wird das Systemverhalten von Einfamilienhäusern und  
12 deren Berechnung aufgezeigt. Mit Hilfe von fundiertem Wissen werden weiterführende Verbesserungsmaßnahmen  
13 aufgezeigt und entsprechende Erfordernisse von Systemen abgeleitet, um die Einflüsse auf die globale Erwärmung  
14 zu erkennen.

15 Durch den individuellen Aufbau von Bauwerken und deren Haustechnik, kann die Gebäudetechnik mittlerweile  
16 nicht verallgemeinert werden. Um den Betrieb von Wärmepumpen besser zu verstehen und zu optimieren, wird  
17 zunächst der Energiebedarf für Einfamilienhäuser aufgezeigt, im Anschluss daran die derzeitigen Möglichkeiten von  
18 Solarthermie und Photovoltaik, die notwendige Speicherung und anschließende die Modellbildung behandelt.

### 3.1. Energiebedarf für Einfamilienhäuser

19 Seit der Ölkrise 1973 wurde das Thema rund um den Energiebedarf intensiv aufgearbeitet. Das mangelnde  
20 Aufkommen zeigte damals, wie abhängig Industrieländer von Primärenergie sind. Zusätzlich damit verbunden war  
21 die Erhöhung des Rohstoffpreises. Seit der Ölkrise wurde die Energieforschung in alle Richtungen weiter betrieben,  
22 angefangen vom Rohstoffingenieurwesen, welches bestrebt ist, fossile Energiequellen zu erschließen bis zu den  
23 Bauingenieuren und Maschinenbauern, welche die Nutzung optimieren wollen. So unterschiedlich die Interessen der  
24 einzelnen Wissenschaften auch sind, eines ist allen gemein: Sie dienen der Optimierung und der effizienten Nutzung.

25 Nach der Nachkriegszeit, in der nur die nötigsten Projekte umgesetzt wurden und ein Großteil der Investitionen  
26 in den Wiederaufbau flossen, wurden aufgrund der Ölkrise die ersten Maßnahmen gesetzt, um den Energiebedarf  
27 von Bauwerken zu reduzieren. Die baurechtlichen Anforderungen an Bauwerke sind seitdem sukzessive verschärft  
28 worden und dem wird im Laufe der nächsten Jahre auf Basis der EU- Verordnung weiter Nachdruck verliehen werden.

29 Eine wesentliche Frage der Energiewende sind die alternativen Energiequellen, mit denen die erforderlichen  
30 Energiemengen bereitgestellt werden sollen. Hierbei wird nicht nur die Umstellung der Energieerzeuger erforderlich  
31 sein, sondern auch ein sparsamer Haushalt mit reduzierten Energiemengen.

32 Es stellt sich die Frage, wieviel Energie benötigt wird, um ein Bauwerk zu betreiben. Auf Basis der Grundlagen  
33 in Kapitel 2, kann in erster Linie bilanziert werden, wodurch die Energieströme berechnet werden können. Für eine  
34 gesamtheitliche Betrachtung, müssen alle Energieströme so gut wie möglich aufgearbeitet werden. Nach Erfordernis  
35 kann zur Optimierung eines Gebäudes der Energiebedarf in unterschiedlichen Detaillierungsgraden betrachtet  
36 werden, dabei spielt auch die Zeit eine wesentliche Rolle. Demnach unterscheidet man in kurzzeitige Analysen im  
37 Bereich von wenigen Stunden (1 Woche), bis hin zu Langzeitanalysen, welche über mehrere Jahre Simulationsdauer  
38 laufen (100 Jahre).

39 In folgenden Abbildungen 3-2 und 3-3 wird dargestellt, wie eine Energiebilanz für ein Einfamilienhaus aussehen  
40 kann, dabei wurde zwischen Sommer- und Winterhalbjahr unterschieden. Die Unterscheidung zwischen Sommer und  
41 Winter lässt erkennen, dass Energieflüsse grundsätzlich eine andere Struktur aufweisen.

42 Energieströme welche zur Behaglichkeit im Innenraum erforderlich sind, verschwinden im Sommer vollkommen,  
43 dafür kommen störende Wärmeströme hinzu, die durch Lüftung abgeführt werden oder die bei der sommerlichen  
44 Überhitzung im Bauwerk gespeichert werden.

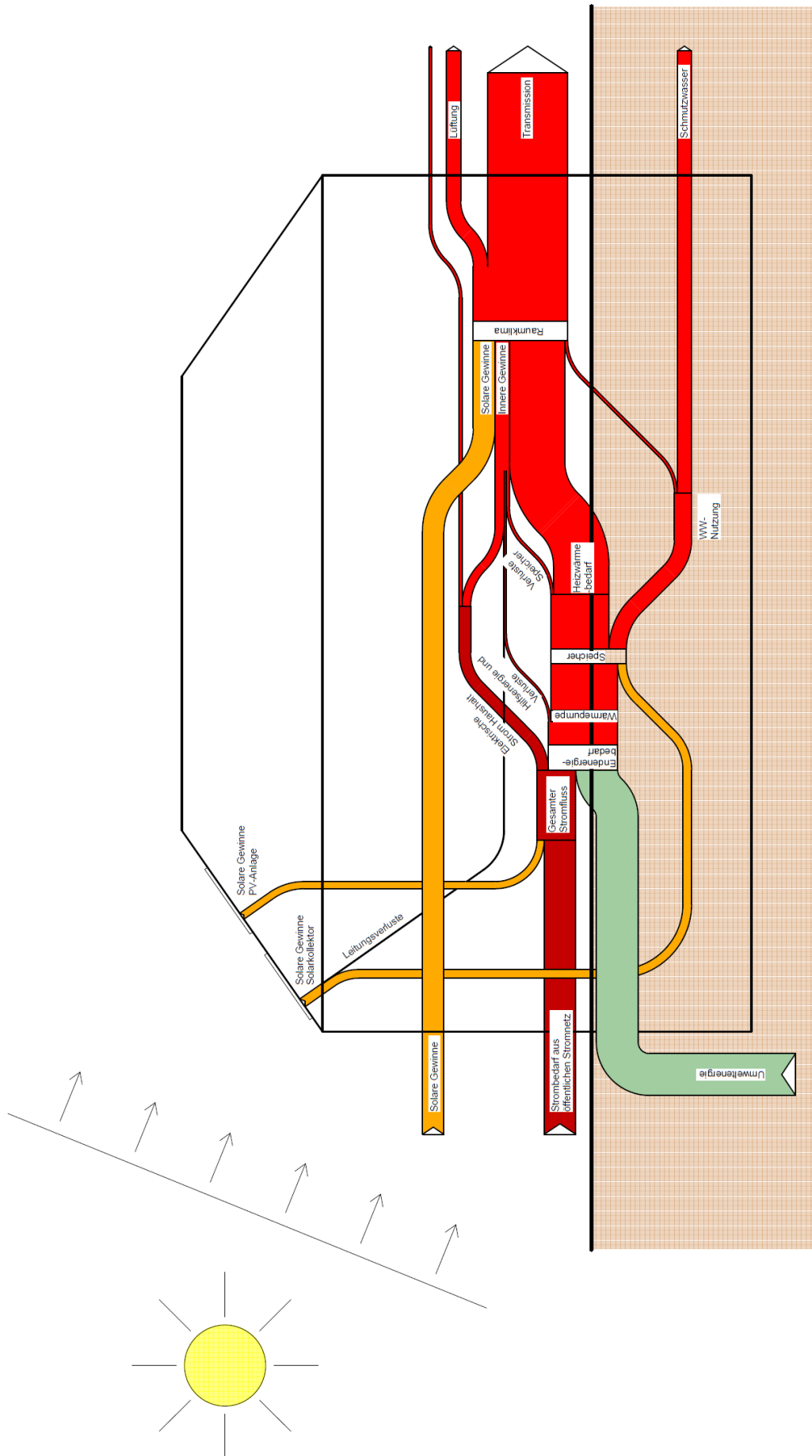


Abbildung 3-2: Energiestromanalyse im Winterhalbjahr von Oktober bis März in einem Einfamilienhaus mit Nutzung von Geothermie, Solarkollektor und PV- Anlage

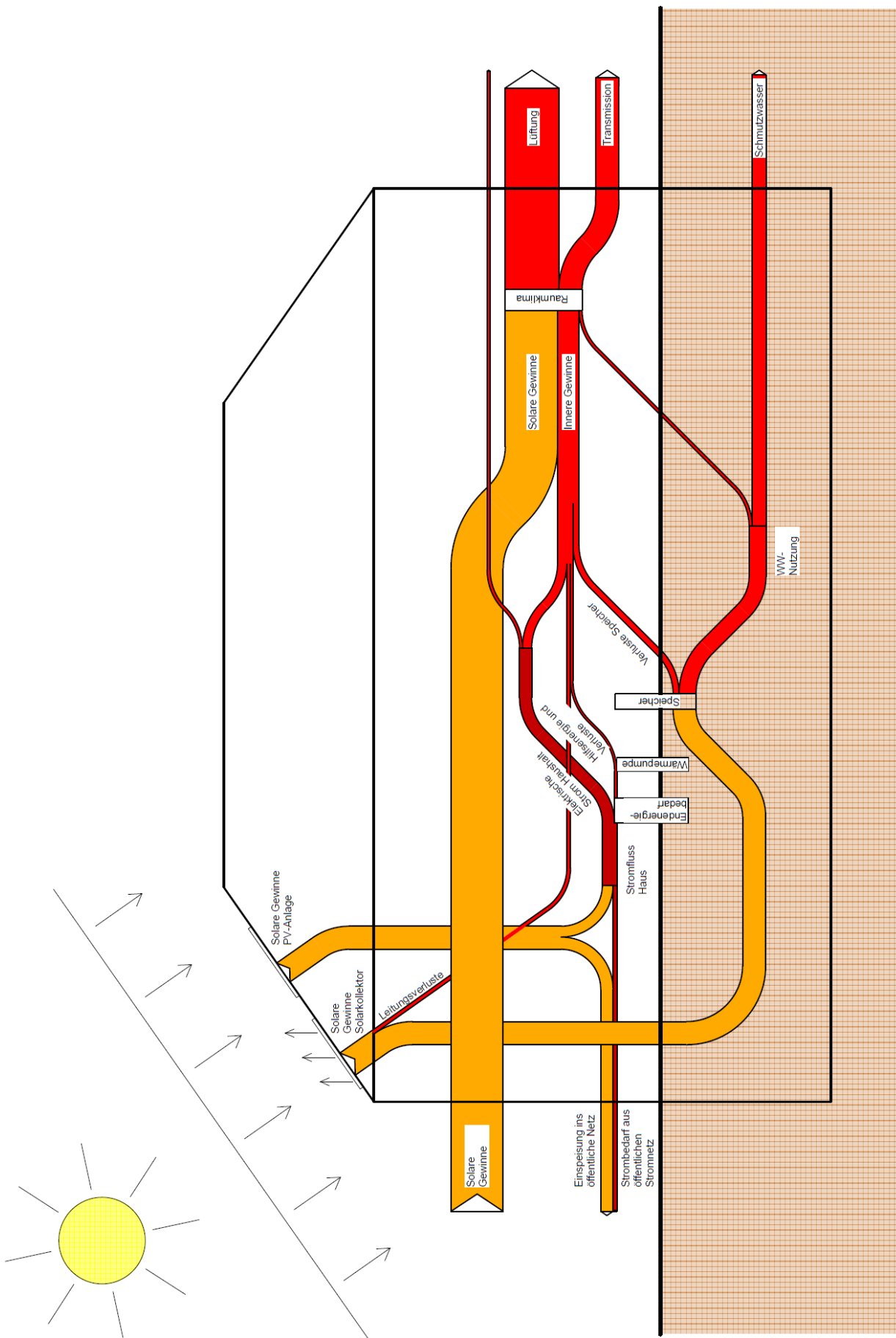
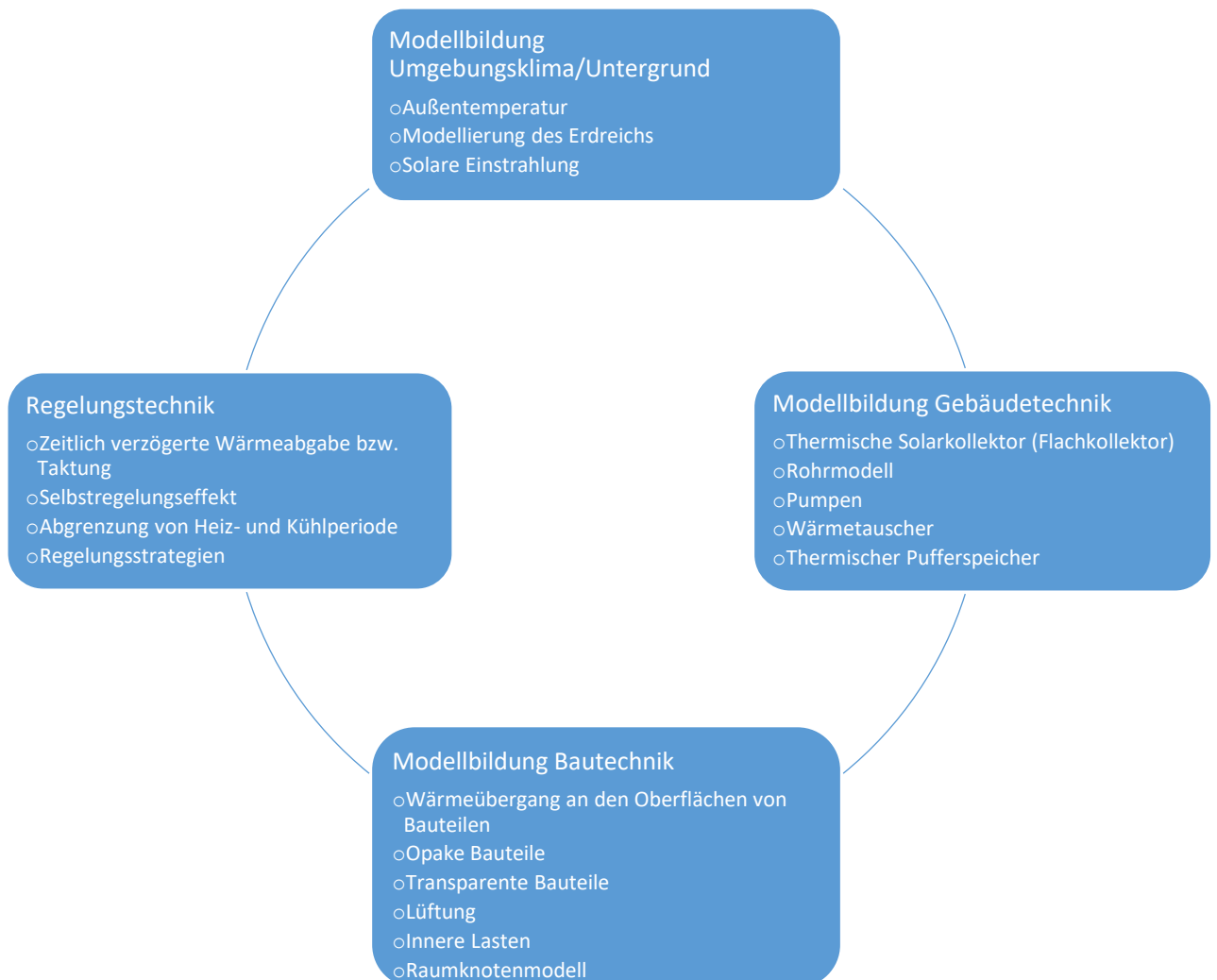


Abbildung 3-3: Energiestromanalyse im Sommerhalbjahr von April bis September in einem Einfamilienhaus mit Nutzung von Geothermie, Solarkollektor und PV- Anlage

1 Wie man in den Grafiken erkennen kann, sind Wärmeströme auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen. In  
 2 den Sommermonaten dominiert der Wärmestrom auf der Eingangsseite durch solare Gewinne, auf der Abgabeseite  
 3 durch Lüftung. In den Wintermonaten hingegen wird Energie in Form von Umweltenergie und Strom benötigt, ein  
 4 Großteil der Energie geht aufgrund von Wärmetransmission durch Bauteile verloren. Weitere erhebliche  
 5 Wärmeströme gibt es aufgrund der Abfuhr von Schmutzwasser und von sonstiger nicht nutzbarer Energie wie bei der  
 6 Stromnutzung. Diese Grafiken könnten nach dem Aufstellungsort der einzelnen Geräte differenziert werden,  
 7 beziehungsweise können auch weitere Fehlerströme eingetragen werden, welche aufgrund der Übersichtlichkeit  
 8 nicht berücksichtigt wurden.

9 Jeder Strom besitzt physikalisch genau vorgegebene Eigenschaften. Die Herausforderung liegt darin, die Ströme  
 10 günstig zu regeln, damit die erforderliche Energie ein Minimum erreicht. Der wichtigste Wert in der Grafik ist der  
 11 Endenergiebedarf, wobei jene Menge an Energie gemeint ist, welche von außen zugeführt werden muss. In  
 12 Verbindung mit dem zugeführten Heizmedium und dem Endenergiebedarf eines Haushaltes, kann man den  
 13 Primärenergiebedarf und die damit verbundene Kohlendioxidbelastung ermitteln.

14 Die grundlegende Frage ist, wieviel Energie von außen ins Haus zugeführt werden muss, damit die  
 15 Raumtemperatur in einem behaglichen Bereich liegt. Zur systematischen Aufbereitung dieses Themengebietes sind  
 16 zur Energieflussanalyse nach [11] und [24] unterschiedliche Teilbereiche zu betrachten (siehe Abbildung 3-4).



**Abbildung 3-4: Einflussparameter für den Energiebedarf von Bauwerken**

17 Angefangen von den bautechnischen Themengebieten, über die Modellierung des Umgebungsklimas, bis hin zur  
 18 Regelungs- und Gebäudetechnik, gibt es viele Einflussparameter, die auf den Energiebedarf Auswirkungen haben.  
 19 Eine Differenzierung der Elemente ist dahingehend sinnvoll, dass Einzelbereiche leichter modelliert und berechnet

1 werden können. Im Groben können diese vier Themenblöcke in Produktion, Verlust und Verteilung gegliedert  
2 werden.

3 Verwendet man Energiebedarf als Begriff, muss man gleichzeitig immer die Systemgrenzen aufzeigen. In den  
4 Abbildungen 3-2 und 3-3 kann man Energiebedarf öfter verwenden. Zum Beispiel ist der Energiebedarf des Gebäudes  
5 im Winter mit Sonnenenergie, Umweltenergie und elektrischem Strom gedeckt. Der Energiebedarf für das Innenklima  
6 wird durch Fehlströme, Sonnenenergie und Heizungsenergie gedeckt. Der Energiebedarf ist immer jene Größe, die  
7 künstlich zugeführt werden muss, damit sich ein gewünschtes Temperaturniveau, in einer gewissen  
8 Schwankungsbreite (Hysterese), einstellt. Die Regelung steuert dabei die zugeführte Energiemenge der künstlich  
9 erzeugten Energieströme. Die Entropie jedes geschlossenen Systems wird mit der Zeit (siehe Kapitel 2.1.2) größer  
10 und erreicht nach der Zeit ein Maximum und somit würde sich die Temperatur in Bauwerken an die  
11 Umgebungstemperatur anpassen.

12 Ein behagliches Raumklima gilt als Voraussetzung zur Nutzung eines Hauses, um das menschliche  
13 Schutzbedürfnisse zu erfüllen. Die Konsequenz ist, dass der Mensch die erforderlichen Energieströme steuern muss.  
14 Wie einleitend in Kapitel 1.1 beschrieben, ist der Energiebedarf bislang stark durch fossile Brennstoffe bereitgestellt  
15 worden. Mit der Energiewende sollen nicht nachhaltige Energiequellen durch nachhaltige Energiequellen  
16 ausgetauscht werden, die die Dekarbonisierung der Energiewirtschaft vollziehen soll.

### 3.2. Sonnenenergie

17 Die Nutzung der Sonnenenergie ist ein zentrales Thema zur Umstellung des Energiehaushaltes, denn mit Hilfe der  
18 Sonnenenergie wird zum Beispiel in vielen Häusern Trinkwasser erwärmt. Soll die Kollektorflächen als  
19 Heizungsunterstützung verwendet werden, muss diese allerdings relativ groß ausgelegt sein. Die Systemgröße und -  
20 konfiguration ist entscheidend, um einerseits einen hohen Deckungsbetrag zu erhalten, andererseits die  
21 Investitionskosten zu amortisieren, beziehungsweise die Effizienz der Anlage.

22 Das große Problem der Sonnenenergie liegt in der jährlichen Verteilung. Im Sommer ist ein Überschuss an Energie  
23 vorhanden, der abgeführt werden muss, um die Überhitzung zu vermeiden und im Winter muss man dagegen  
24 zusätzlich heizen. Über das Jahr betrachtet, sind der Heizwärmebedarf und die vorhandene Sonnenenergie  
25 annähernd sinusförmig, allerdings mit einer halben Phasenverschiebung. In Abbildung 3-5 ist der relative  
26 Gesamtenergiebedarf und die relative Leistung der Sonnenstrahlung, abhängig vom Jahresverlauf, durch eine  
27 Sinuswelle vereinfacht dargestellt. In weiterer Folge wurde die Annahme getroffen, dass die eintreffende  
28 Sonnenenergie gleich groß ist, wie der gesamte Gesamtenergiebedarf. Zieht man die Sonnenenergie von diesem ab  
29 und beschränkt den Wertebereich auf positive reelle Zahlen, dann erhält man den grob vereinfachten  
30 Heizwärmebedarf. Geht man umgekehrt vor und zieht den Gesamtenergiebedarf von der Sonnenenergie ab und  
31 beschränkt den Wertebereich wie zuvor, erhält man in vereinfachter Form den Sonnenenergieüberschuss, welcher  
32 durch Verluste abgeführt werden muss. Man erkennt, dass der Heizwärmebedarf genauso groß ist wie der  
33 Sonnenenergieüberschuss, was eingangs gefordert wurde. In weiterer Folge können die Kurven des Verlustes und des  
34 Überschusses über die Zeit integriert werden und man erhält die Ganglinien wie in Abbildung 3-6. Die  
35 Phasenverschiebung ist demnach genau ein halbes Jahr lang und der Größe nach des kumulierten  
36 Gesamtenergiebedarfes durch  $\pi$ .

$$\int_0^{8760} E_{HWB} dt = \int_0^{8760} E_{verlust} dt = \frac{\int_0^{8760} E_{Gesamt} dt}{\pi} = const. \quad (3-30)$$

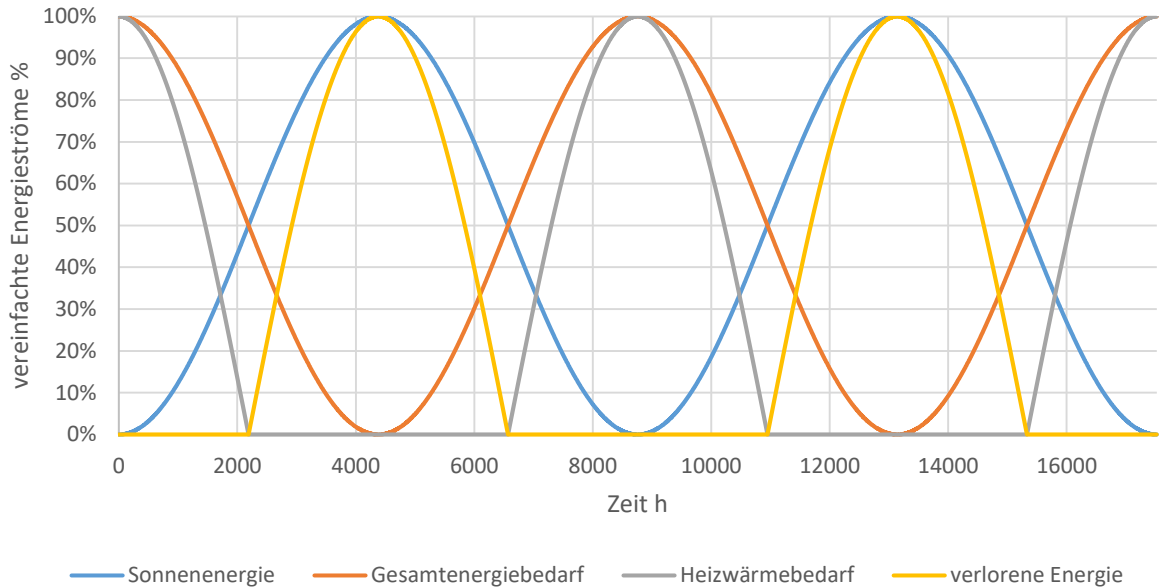
37 Dabei ist:

$E_{HWB}$  Heizwärmebedarf  $W$

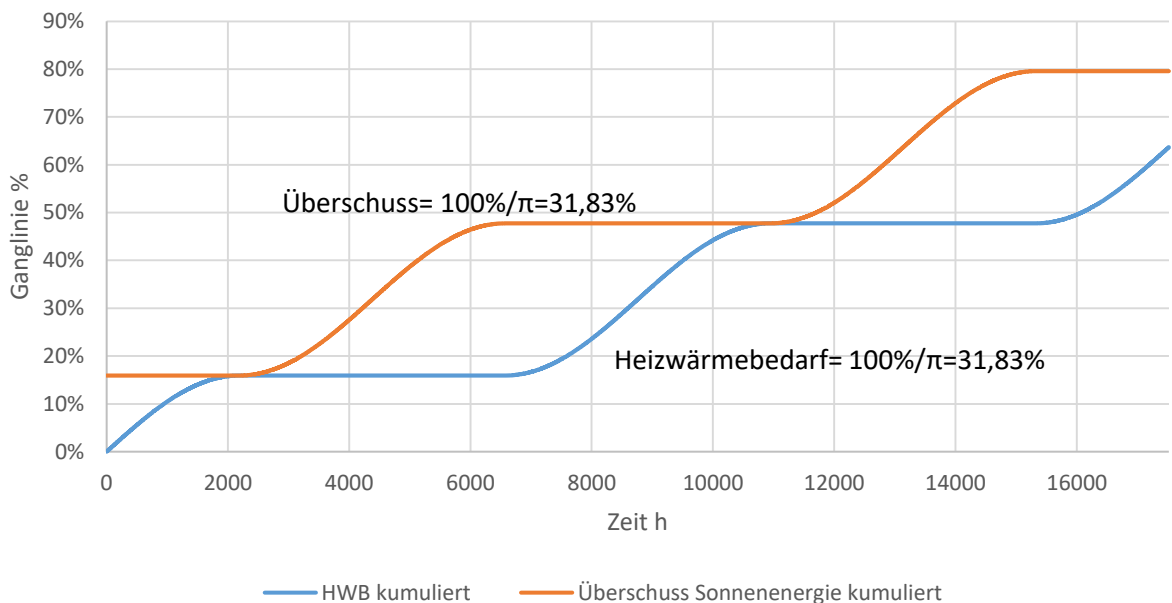
$E_{verlust}$  Nicht nutzbare Sonnenenergie  $W$

$E_{Gesamt}$  Gesamtenergiebedarf  $W$

1



**Abbildung 3-5: Vereinfachte Energieströme eines Hauses bei Annahme, dass der Ertrag der Sonnenenergie so groß ist wie der Heizwärmebedarf**



**Abbildung 3-6: Vergleich der Ganglinien von überschüssiger Sonnenenergie zum Heizwärmebedarf**

2 Der Heizwärmebedarf wurde im vorhergehenden Kapitel systematisch behandelt, in weiterer Folge werden im  
 3 Kapitel 5.1 Modelle zur Ermittlung des Heizwärmebedarfes aufgezeigt, welche eine Quantifizierung ermöglichen.  
 4 Die vorhandene Sonnenenergie wird in weiterer Folge mit halb synthetischen Klimadaten für den Standort Wien  
 5 abgebildet. Die Beschreibung der Sonnenstrahlung ist im Grunde in Kapitel 2.3.5 erfolgt. Im Jahresverlauf treffen  
 6 auf eine horizontale Oberfläche rund  $1.200 \text{ kWh/m}^2$  ein und je nach Größe und Orientierung, ändert sich die  
 7 Ganglinie der Sonnenenergie und somit des Überschusses.

8 Die ProBas- Datenbank (Prozessorientiert Basisdaten für Umweltmanagementsysteme) des Umweltbundesamtes  
 9 in Deutschland [25] gibt für unterschiedliche Prozesskategorien, Kohlendioxidäquivalente Emissionen an, welche  
 10 unter Berücksichtigung der Vorketten, angegeben sind. Für einen durchschnittlichen Solarkollektor mit  $3,77 \text{ m}^2$ ,  
 11 erforderlichen Speicher mit 150 Liter und Pumpe werden  $6.902 \text{ kg}$  Kohlendioxidäquivalente Emission angegeben. Für  
 12 eine PV-Anlage mit der Größe von  $21,7 \text{ m}^2$  und Wechselrichter werden inklusive Vorketten  $35.860 \text{ kg CO}_2$ -Äquivalente-  
 13 Emission angegeben. Bei der Herstellung für einen gewöhnlichen flachen Solarkollektoren mit  $1.830 \text{ kg/m}^2$ , werden

1 geringfügig mehr Luftemissionen produziert, als für PV-Anlagen mit  $1.650 \text{ kg/m}^2$ . Diese Werte sind, abhängig von  
 2 der Produktion und den jeweiligen Anlagenschemen, starken Schwankungen unterworfen. Für eine genauere Aussage  
 3 ist eine gesonderte Studie erforderlich, bei der die einzelnen Anlagenschemen differenziert werden. In weiterer  
 4 Folge werden unterschiedliche Anlagentypen und deren Nutzungsgrade, respektive Emissionsersparnisse, diskutiert.

### 3.2.1. Solarthermie

5 Solarkollektoren werden in unterschiedlichen Bauformen hergestellt, es wird unterschieden in  
 6 Vakuumröhrenkollektoren, Flächenkollektoren, Vakuumflächenkollektoren und Einfachabsorbern, welche für die  
 7 Schwimmbadnutzung gedacht sind. Vorwiegend werden Solarkollektoren zur Warmwasserbereitung verwendet, in  
 8 modernen Heizungssystemen sind diese ein integraler Bestandteil der Heizung, da auch im Niedertemperaturbereich,  
 9 welcher für die Warmwasserbereitung nicht mehr geeignet ist, Energie gewonnen werden kann. Der verringerte  
 10 Temperaturunterschied zwischen Kollektortemperatur und Umgebungstemperatur steigert die Effizienz des  
 11 Kollektors, da weniger Wärmeverluste entstehen.

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{\vartheta_m - \vartheta_e}{I_g} - a_2 \cdot \frac{(\vartheta_m - \vartheta_e)^2}{I_g} \quad (3-31)$$

12 mit:

$\eta$	<i>Kollektorwirkungsgrad</i>
$\eta_0$	<i>Kollektorwirkungsgrad bei <math>\vartheta_m - \vartheta_e = 0 \text{ K}</math></i>
$a_1$	<i>Linearer Wärmedurchgangskoeffizient <math>\text{W/m}^2\text{K}</math></i>
$a_2$	<i>Quadratischer Wärmedurchgangskoeffizient <math>\text{W/m}^2\text{K}^2</math></i>
$\vartheta_m$	<i>Mittlere Temperatur des Wärmeträgermediums <math>^\circ\text{C}</math></i>
$\vartheta_e$	<i>Außenlufttemperatur <math>^\circ\text{C}</math></i>
$I_g$	<i>Strahlungsintensität <math>\text{W/m}^2</math></i>

13 Solarkollektoren wurden früher nach ÖNorm EN 12975-2 [26] geprüft, seit 2014 ist die veraltete Norm durch die  
 14 ÖNorm EN ISO 9806 [27] ersetzt. Im Wesentlichen wird die Kollektorkennlinie über drei Größen beschrieben. Im  
 15 Anhang A sieht man einen vereinheitlichten Testbericht zu einem Bramac Solarkollektor, in welchem die drei Größen,  
 16 welche in Gleichung (3-31) eingesetzt werden, angegeben sind. In ähnlicher Form sind Datenblätter für eine große  
 17 Reihe an Solarkollektoren unter der Solar Keymark Database [28] vorhanden, außerdem findet man zusätzlich  
 18 Prüfberichte zu Solarreglern, Speichern und Gesamtsystemen darin. Die Kollektorkennlinie nimmt gemäß (3-31) mit  
 19 zunehmender Temperaturspreizung ab. Um einen möglichst hohen Energieertrag zu erwirtschaften, soll die mittlere  
 20 Temperatur des Wärmeträgermediums möglichst niedrig gehalten werden.

21 Zur Simulation ist die Betrachtung der zeitlichen Veränderung der gespeicherten Wärme von Bedeutung. Es folgt  
 22 eine Differentialgleichung zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens, welche in ÖNorm EN 12975-2 [26]  
 23 beschrieben ist.

$$\frac{\dot{Q}}{A_{Koll}} = F'(\tau\alpha)_{en} \cdot (I_{b,Koll} \cdot K_b(\theta) + I_{d,Koll} \cdot K_d) - c_1 \cdot \frac{\vartheta_m - \vartheta_e}{I_g} - c_2 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_e)^2 - \frac{C_{Koll}}{A_{Koll}} \cdot \frac{d\vartheta_m}{dt} \quad (3-32)$$

24 Dabei gilt:

$\dot{Q}$	<i>Nutzwärmeleistung des Sonnenkollektors <math>\text{W}</math></i>
$A_{Koll}$	<i>Kollektorfläche <math>\text{m}^2</math></i>
$F'(\tau\alpha)_{en}$	<i>Effektiver optischer Wirkungsgrad für direkte Bestrahlung bei senkrechtem Einfall -</i>



$I_{b,Koll}$	Direktstrahlungsintensität in Kollektorebene $W/m^2$
$I_{d,Koll}$	Diffusstrahlungsintensität in Kollektorebene $W/m^2$
$K_b(\theta)$	Einfallswinkel – Korrekturfaktor für Direktstrahlung in Abhängigkeit des Einfallswinkels -
$K_d$	Einfallswinkel – Korrekturfaktor für Diffusstrahlung -
$c_1$	Wärmedurchgangskoeffizient $W/m^2K$
$c_2$	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient
$C_{Koll}$	Effektive Wärmespeicherkapazität des Kollektors $J/K$
$\frac{d\vartheta_m}{dt}$	Änderung der mittleren Wärmeträgertemperatur mit der Zeit $K/s$

1 Die Wärmeleistung des Solarkollektors hängt gemäß Gleichung (3-32) von der diffusen und direkten  
 2 Sonnenstrahlung ab, bedingt durch den Einfallswinkel werden zusätzliche Korrekturen aufgrund der Reflexion  
 3 berücksichtigt. Die gespeicherte Energie im Kollektor ist proportional mit der Speicherkapazität und der  
 4 Temperaturänderung des Solarkollektors und je nach Betriebszustand können Energiemengen zwischengespeichert  
 5 werden.

6 Zur Bewertung von Solaranlagen samt Solarkollektor, Verteilersystem, Speicher, Bauwerk und anderen  
 7 Komponenten, werden in der Praxis, nach [11], häufig folgende Kenngrößen zur Beurteilung verwendet:

8 **Solarer Deckungsgrad -:**

$$sd = \frac{Q_{sol}}{Q_{aux} + Q_{sol}} \quad (3-33)$$

9 **Systemwirkungsgrad -:**

$$SN = \frac{(HWB + WWWB) \cdot A_{BGF}}{Q_{sol} + Q_{aux}} \quad (3-34)$$

10 **Spezifischer Nachheizbedarf -:**

$$spez. NH = \frac{Q_{aux}}{A_{BGF}} \quad (3-35)$$

11 **Systemnutzungsgrad -:**

$$SN = \frac{Q_{sol}}{I_{g,Koll}} \quad (3-36)$$

12 **Spezifischer Ertrag  $kWh/m^2a$ :**

$$SE = \frac{Q_{sol}}{A_{Koll}} \quad (3-37)$$

13 **Relative Energieeinsparung -:**

$$f_{sav} = 1 - \frac{Bewertungsgröße}{Bewertungsgröße_{rel}} \quad (3-38)$$

1 mit:

$Q_{sol}$	Von der Solaranlage abgegebene Wärmemenge kWh/a
$Q_{aux}$	Von zusätzlichen Wärmeerzeugern abgegebene Wärmemenge kWh/a
$A_{Koll}$	Kollektorfläche (Brutto – oder Nettofläche) $m^2$
$I_{g,Koll}$	Auf die Kollektoroberfläche (Brutto – oder Nettofläche) auftreffende Globalstrahlung kWh/a
$I_{a,Koll}$	Difusstrahlungsintensität in Kollektorebene $W/m^2$
$HWB$	Heizwärmebedarf kWh/ $m^2a$
$WWWB$	Warmwasserwärmebedarf kWh/ $m^2a$
$A_{BGF}$	Bruttogeschoßfläche $m^2$
Bewertungsgröße	Bewertungsgröße (z. B. Nachheiz-, Heizenergie – oder Primärenergiebedarf) kWh/ $m^2a$
Bewertungsgröße <sub>rel</sub>	Bewertungsgröße eines Referenzgebäudes oder – anlage kWh/ $m^2a$

2 Der solare Deckungsgrad beschreibt den Anteil der Solarenergie am gesamten Heizenergiebedarf des Gebäudes.  
 3 Im Gegensatz dazu gibt der Systemwirkungsgrad das Verhältnis von zugeführter zu genutzter Energie an. Liegt der  
 4 Systemwirkungsgrad bei 100 Prozent, würde der Betrieb verlustfrei laufen (=Perpetuum Mobile). Der spezifische  
 5 Nachheizbedarf gibt an, wieviel Energie außer der Sonnenenergie zugeführt werden muss, um den HWB und WWWB  
 6 eines Bauwerkes bereitzustellen. Zur Beschreibung des Kollektors und vielmehr der Anlage, wird der  
 7 Systemnutzungsgrad und der spezifische Ertrag betrachtet. Die relative Energieeinsparung ist ein Faktor, mit dem  
 8 zwei unterschiedliche Systeme verglichen werden können.

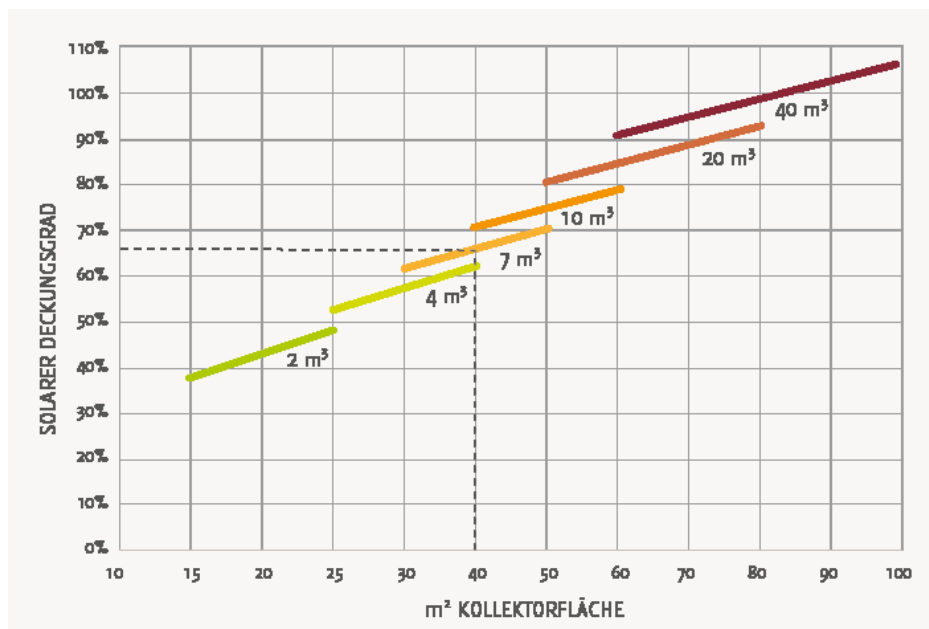


Abbildung 3-7: Solarer Deckungsgrad mit unterschiedlichen Pufferspeichern und Kollektorflächen [29]

9 Das Solarhaus-Institut [29] gibt den solaren Deckungsgrad bei unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen eines  
 10 Hauses mit 160 $m^2$  Wohnnutzfläche, gemäß Abbildung 3-7, an (9.000 kWh/a Wärmebedarf, 4 Personenhaushalt,  
 11 Kollektorneigung 60°, Ausrichtung Süd). Dabei wird die Kollektorfläche überproportional zur Speichergröße  
 12 vergrößert, damit auch im Winter genügend Energie zur Heizung und Warmwasserbereitung lukriert wird. Die  
 13 wirtschaftlich sinnvollste Auslegung des solaren Deckungsgrades liegt zwischen 50 und 70 Prozent. Die

1 Kollektorfläche wird bewusst sehr steil gewählt, um die Energie im Winter besser nutzen zu können, sowie eine  
2 extreme Überhitzung im Sommer zu vermeiden.

3 Die Speicherung der Energie steht bei diesen Anlagen-Schemen eher im Hintergrund, weil über die Kollektorfläche  
4 wesentlich mehr Energie gewonnen, als verbraucht wird. Der Überschuss, der im Sommer lukriert wird, kann im  
5 Winter durch die zeitliche Verschiebung nicht genutzt werden. Diese Tatsache schlägt sich bei den Kennwerten wie  
6 folgt nieder: Aus der Angabe können folgende Werte entnommen werden:

$$(HWB + WWWB) \cdot A_{BGF} = 9000 \text{ kWh/a} \quad (3-39)$$

7 Der solare Deckungsbeitrag beträgt gemäß Grafik 3-7 66%. Bei der Kollektorfläche von 40 m<sup>2</sup> mit 60 ° Neigung  
8 kann man rund 15.000 kWh/m<sup>2</sup> erwirtschaften (abgeleitet aus Anhang A: Solarkollektor 10 m<sup>2</sup> Standort Würzburg,  
9 mittlere Kollektortemperatur 50 °C 4.661 kWh/a.10m<sup>2</sup> und Abminderungsfaktor von 20 Prozent für ungeeignete  
10 steilere Ausrichtung erhält man:  $4.661 \cdot (1 - 0,2) \cdot 4 \sim 15.000 \text{ kWh/a}$ ). Eingesetzt in Gleichung (3-33) ergibt das

$$sd = \frac{Q_{sol}}{Q_{aux} + Q_{sol}}$$

$$0,66 = \frac{15000}{Q_{aux} + 15000} \quad (3-40)$$

$$Q_{aux} = \frac{15000 \cdot (1 - 0,66)}{0,66}$$

$$Q_{aux} = 7727 \text{ kWh}$$

11 Und es folgt der Systemwirkungsgrad von:

$$SN = \frac{(HWB + WWWB) \cdot A_{BGF}}{Q_{sol} + Q_{aux}}$$

$$SN = \frac{9000}{15000 + 7727} \quad (3-41)$$

$$SN = 0,39 \rightarrow 39\%$$

12 Man erkennt in der Berechnung (3-40) und (3-41), dass der solare Deckungsgrad hoch ist, dafür ist jedoch der  
13 Systemwirkungsgrad ziemlich niedrig. Im Solarertrag wurde eine Temperatur von 50 °C vorausgesetzt. Im Winter  
14 kann das schon gut stimmen, aber im Sommer wird der Kollektor über weite Strecken über dieser Temperatur liegen  
15 und teilweise die Stagnationswärme erreichen, weil die Wärme, anlagentechnisch bedingt, nicht mehr abgeführt  
16 werden kann. Auf lange Sicht gesehen, ist die angestaute Hitze für die Lebensdauer der Solarkollektoren nicht  
17 förderlich.

18 Um der Überhitzung der Solarkollektoren vorzubeugen und die Energie effizient abführen zu können, müssen  
19 entsprechende Speichermassen bereitgestellt werden. Umso geringer die Temperaturspreizung ist, desto mehr  
20 Energie kann gewonnen werden, denn der Systemnutzungsgrad und der spezifische Ertrag der Solarkollektoren wird  
21 umso effizienter, je größer die angehängte Speichermasse ist, diese wiederum muss den Ertrag des Solarspeichers  
22 aufnehmen. Auf der einen Seite wird durch einen größeren Speicher die Durchschnittstemperatur, die zum  
23 Solarkollektor zurückläuft, kleiner, auf der anderen Seite steigt der Systemnutzungsgrad. Betrachtet man die  
24 Energiemengen, die auf den Solarkollektor einfallen, werden gewaltige Speichermassen benötigt, um den Ertrag  
25 aufzubewahren.

26 Die einfallende Strahlung bildet die theoretische Obergrenze des Energieertrages von Solarkollektoren. Die  
27 Strahlungsintensität ist in Abbildung 2-2 beschrieben, gemäß den HSK-Daten fallen rund 1.200 kWh/m<sup>2</sup>a auf die Erde  
28 ein. Die Richtung der Sonnenstrahlung ist immer von der Sonne ausgehend, die Werte der Sonnenstrahlung auf eine

1 bestimmte Ebene müssen mit Hilfe der Winkelbeziehungen zurückgerechnet werden, außerdem werden zusätzliche  
2 Verluste durch Reflexionen berücksichtigt. Betrachtet man einen Solarkollektor mit 10 m<sup>2</sup> Oberfläche, könnte dieser  
3 bei günstiger Auslegung über 10.000 kWh Wärmeenergie im Jahr liefern. Diese Menge ist so groß, dass kein  
4 gewöhnlicher Warmwasserspeicher die Energie aufnehmen kann. Im folgenden Kapitel 6 wird anhand des  
5 Kollektormodells nach ÖNorm EN 12975-2 [26] aufgezeigt, wieviel Energie durch einen Kollektor im Jahr erzeugt  
6 wird und wie die Temperaturverhältnisse des Trägermediums darauf Einfluss nehmen.

7 Zur idealen Ausrichtung von Solarthermie- Anlagen gibt es unterschiedliche Ansätze. Zum Erreichen hoher solarer  
8 Deckungsgrade geben unterschiedliche (z.B. [11] und [29]) Quellen eine Neigung für den Azimutwinkel von 60°,  
9 Richtung Süden orientiert, an. Die Kollektorfläche wird ziemlich groß ausgelegt und steil aufgestellt, damit speziell  
10 im Winter, wo der Bedarf am größten ist, große Gewinne lukriert werden können. Im Gegensatz dazu ist die  
11 Ausführungsvariante mit kleiner Absorberfläche für die Warmwasserbereitung im Sommer ausgelegt, dabei ist der  
12 solare Deckungsgrad zwar niedriger, aber der Anlagenwirkungsgrad höher.

13 Thermische Energie hat den Vorteil, dass diese durch Erwärmung eines Körpers leicht speicherbar ist. Der  
14 Nachteil liegt in der eingeschränkten Verwendbarkeit. Ein Großteil der produzierten Sonnenenergie kann im Sommer  
15 nicht verwendet werden und verteilt sich in eine nicht brauchbare Form. Dem gegenüber steht die Photovoltaik-  
16 Anlage, mit der elektrische Energie gewonnen werden kann und die um ein Vielfaches einfacher als thermische  
17 Energie verwertbar ist.

#### 3.2.2. Photovoltaik Anlagen

18 Der photoelektrische Effekt erzeugt aus elektromagnetischer Strahlungsenergie Strom. Dabei werden Elektronen  
19 durch kurzwellige Strahlung aus der Oberfläche eines Körpers herausgelöst und nachdem diese aus dem Gitter  
20 herausgelöst wurden, können sie durch gezielte Leitung, elektrischen Strom erzeugen.

21 Der klare Vorteil gegenüber der Solarthermie besteht darin, dass der Strom durch Netzeinspeisung auch dann  
22 verwendet werden kann, wenn keine weitere Energie im Haus verwendet wird. Im Sommer müssen, wie in Kapitel  
23 3.1 beschrieben, große Mengen an Wärmeenergie abgeführt werden. Derzeit steht die Entwicklung von elektrischen  
24 Speichersystemen im Schwerpunkt der Forschung. Speicher für elektrischen Strom können in Häuser und Fahrzeugen  
25 eingebaut werden. In Ersteren dienen diese nicht nur der besseren Verteilung, sondern auch der  
26 unterbrechungsfreien Stromversorgung (kurz: USV).

27 Aus energiewirtschaftlicher Sicht ist die Entwicklung von PV-Anlagen in Kombination mit Solarbatterien ein  
28 Fortschritt, da in Haushalten untertags ungefähr ein Viertel des Strombedarfs verbraucht wird. Bei dem derzeitigen  
29 Einsatz an Forschungsmitteln werden mittel- und langfristig preiswerte Technologielösungen am Markt vorhanden  
30 sein.

31 Aus bautechnischer Sicht ist es empfehlenswert, Vorkehrungen für Energiespeicher und PV-Anlagen vorzusehen,  
32 um eine einfache Nachrüstung durchführen zu können. Zum Beispiel reichen oft nur eine Leerverrohrung zwischen  
33 Technikraum und Aufstellort von PV-Anlagen, die gegen Kleintierbisse sicher ist und eine geringfügige Erhöhung der  
34 Nutzlast eines Daches, damit eine PV-Anlage nachgerüstet werden kann.

35 Im Bereich des Brandschutzes liegen derzeit keine umfangreichen Langzeiterfahrungen mit Solarbatterien und  
36 PV-Anlagen vor. Speziell problematisch sind im Umgang mit dem Brandschutz jene Anlagenkomponenten, die nicht  
37 kurzfristig stromfrei geschaltet werden können und bei denen auch keine zusätzlichen Sicherheitsmechanismen im  
38 Falle eines Defektes schützen. Dazu zählen die Verbindungsleitungen der PV- Anlage bis zum Wechselrichter und der  
39 Batterie bis hin zum Einspeisungsmodul. Diese dauerstromführenden Leitungen müssen mit einer Signalfarbe  
40 gekennzeichnet werden, baulich gelten aber keine speziellen Brandschutzbestimmungen. Die Ausrichtung der  
41 Photovoltaik- Anlage ist in Anlehnung des vorigen Kapitels ideal bei 35° Azimutwinkel und südlicher Ausrichtung.

42 Das american national renewable energy laboratory gibt gemäß Abbildung 3-8, eine Aufstellung zu den  
43 Wirkungsgraden von PV-Anlagen mit unterschiedlichem Aufbau an. Mittlerweile können mit Hilfe von mehrfach  
44 vernetzten Zellen, Wirkungsgrade von bis zu 46 Prozent der gesamten Sonnenenergie aufgenommen werden.  
45 Typische, am Markt erhältliche, Anlagen, besitzen einen Wirkungsgrad von ungefähr 10%, ein Großteil der

- 1 auftreffenden Sonnenenergie kann nicht umgewandelt werden. Das Problem liegt in der spektralen Bandbreite des
- 2 Lichts, die nur gezielt umgewandelt werden kann.

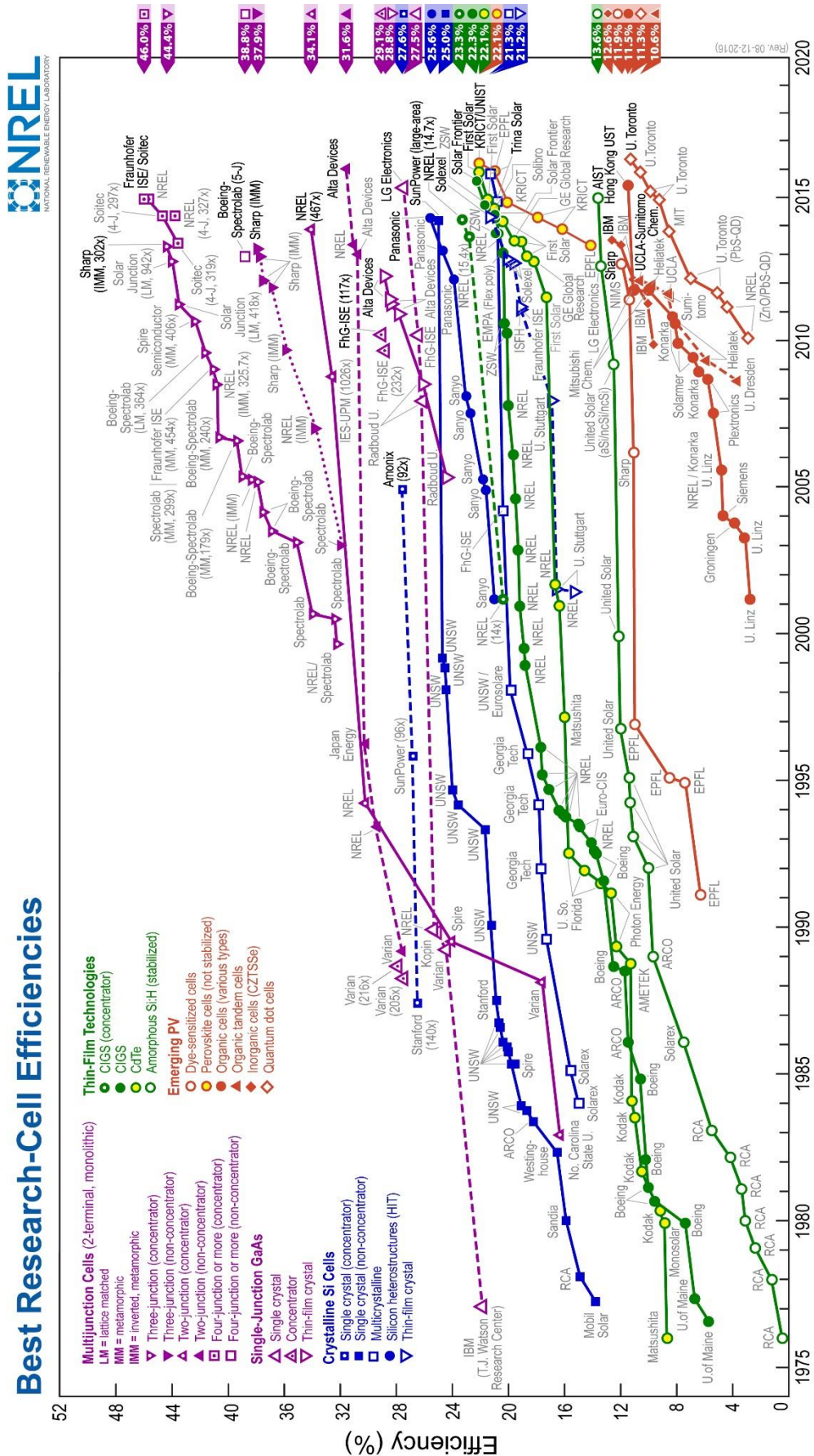


Abbildung 3-8: Entwicklung der Wirkungsgrade unterschiedlicher Photovoltaik- Zellen in Abhängigkeit der verwendeten Technologie unter einheitlichen Prüfbedingungen (Referenzstrahlungsspektrum gem. ASTM G173 oder IEC 60904-3 und einer Umgebungstemperatur von 25 °C) [30]

1 In Haushalten können Energiemengen in der Größenordnung vom täglichen Verbrauch in Solarbatterien  
 2 gespeichert werden. Die Fa. Fronius erstellt Speichersysteme, bei der Speicher zu einer PV- Anlage je nach Größe  
 3 um 1.200-1.700 €/kW am Markt erhältlich sind. Der Preis ist inkl. MwSt, exkl. Installation; effektive  
 4 Speicherkapazität von 3,6 bis 9,6 kW bei 80% DoD (Depth of Discharge, Entladungstiefe). Beim aktuellen Strompreis  
 5 von rund 18,5 Cent/kWh sind beim kleinsten Modell rund 9.200 Ladzyklen bei 80%-iger Entladetiefe erforderlich,  
 6 damit sich der Speicher in der Anschaffung amortisiert. Hierbei ist nicht berücksichtigt, dass bei der Einspeisung ins  
 7 öffentliche Stromnetz ein Teil der eigenen Stromkosten rückvergütet wird. Auch nicht berücksichtigt ist hier die  
 8 jährliche Teuerungsrate in Folge von Inflation. Für die Solarbatterie der Fa. Fronius wird eine Zyklenfestigkeit von  
 9 8.000 Ladezyklen (bei 80% DoD) vorgegeben, das entspricht im normalen Betrieb über 20 Jahre Lebensdauer (ein  
 10 Ladezyklus pro Tag). Betrachtet man bei Solarbatterien die Ladzyklen in Abhängigkeit der Entladetiefe, stellt man  
 11 fest, dass die Energiemenge, die über den gesamten Lebenszyklus zugeführt und entnommen wird, annähernd  
 12 konstant bleibt. In Tabelle 3-4 wird der Anteil an deckbarem Strombedarf durch eine Photovoltaik-Anlage  
 13 beschrieben und durch eine Speicherung kann dieser Anteil über die OIB- Richtlinie hinaus verbessert werden.

**Tabelle 3-4: Maximal deckbarer Strombedarfsanteil durch Photovoltaik- Anlagen nach OIB- Richtlinie 6 [23]**

Bestandteile	Deckbarer Anteil*)
Raumheizung, Wärmebereitstellung	25 %
Raumheizung, Hilfsenergie	75 %
Warmwasser, Wärmebereitstellung	50 %
Warmwasser, Hilfsenergie	75 %
Kühlenergiebedarf	25 %
Haushaltsstrombedarf / Betriebsstrombedarf	75 %
Solarthermie, Hilfsenergie	100 %
Beleuchtungsenergiebedarf	0 %
Befeuchtungsenergiebedarf	0 %
*) ... nur unter der Voraussetzung, dass Photovoltaik-Anlage und Stromverbraucher im selben Stromkreis sind!	

### 3.3. Wärmepumpen

14 Die Wärmepumpe wurde bereits Anfang des 19. Jahrhunderts entwickelt, wofür Carnot, Perkins und Kelvin die  
 15 Grundlagen schufen. Nach dem ersten Weltkrieg wurden Kühlschränke, welche nach dem gleichen Prinzip wie die  
 16 Wärmepumpen funktionieren, immer populärer. 1912 erhält der Schweizer Zoelly sein Patent für eine Wärmepumpe,  
 17 die dem Boden Wärme entnimmt. Seit der ersten Wärmepumpe mussten allerdings einige Umweltaspekte  
 18 berücksichtigt werden, die zunächst unbekannt waren und trotz der Verwendung von Mitteln mit ungünstigeren  
 19 Eigenschaften, wurden die Leistungszahlen der Wärmepumpen laufend optimiert.

20 Die EU-Richtlinie zur Energieetikettierung von Raumklimageräten [31] hat heutzutage die Normung von  
 21 Luftkonditionierern, Flüssigkeitskühlsätzen und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die  
 22 Raumheizung und -kühlung veranlasst (ÖNorm EN 14511). Diese Norm gliedert sich in vier Teile und hat den Rang  
 23 einer Verordnung [32]:

- 24 • Teil 1: Begriffe
- 25 • Teil 2: Prüfbedingungen
- 26 • Teil 3: Prüfverfahren
- 27 • Teil 4: Anforderungen

28 Nachfolgend sind die wichtigsten Grundlagen aus der Norm für diese Arbeit zusammengefasst:

#### Teil 1: Begriffe

29 Die Definition des Coefficient of Performance (COP) erfolgt analog nach Carnot (Siehe Absatz 2.4.1). Die  
 30 gebräuchlichsten Wärmepumpen können gemäß Tabelle 1, EN 14511-1-1, 2004-08-01 eingestuft werden.  
 31 Wärmepumpen mit Erdsonden können als Sole- Wasser oder Wasser-Wasser -Wärmepumpe ausgeführt werden. Die  
 32

1 Sole hat dabei den Vorteil, dass die Soleflüssigkeit erst bei tieferen Temperaturen friert. Mittlerweile gibt es  
2 Hybridwärmepumpen, die mehrere Energiequellen nutzen, je nachdem, welches Medium gerade wirtschaftlicher ist.

### 3 Teil 2: Prüfbedingungen

4 Zur Vergleichbarkeit wurden die Prüfbedingungen harmonisiert und zum schnellen Überblick ist eine  
5 Etikettierung vorgesehen. Die Prüfung erfolgt an einem Mustergerät, das nach Herstellerangaben aufgebaut ist.  
6 Wenn die erste Prüfung nicht entspricht, muss die zweite Prüfung an einem anderen Gerät durchgeführt werden und  
7 es gilt, mindestens 85 % des angegebenen COP zu erreichen.

$$\text{geprüfter COP} \geq 0,85 \cdot \text{angegebenen COP} \quad (3-42)$$

8 Nach Gleichung (3-42) kann eine Abweichung von 15 Prozent bestehen. Für die Auslegung der Anlage müssen  
9 somit zusätzliche Reserven einkalkuliert werden.

### 10 Teil 3: Prüfverfahren

11 Die Heizleistung bei der Prüfung von Wärmepumpen ergibt sich aus der Messung der Eintritts- und  
12 Austrittstemperatur, Eigenschaften des Trägermediums und dem Massenstrom. Nach Teil 3 der Normenreihe wird  
13 nach allgemein physikalischen Grundsätzen vorgegangen. Bei dieser Form der linearen Berechnung der Heizleistung  
14 ist Voraussetzung, dass das Trägermedium keine Umwandlung des Aggregatzustandes erfährt, da sonst eine latente  
15 Wärmespeicherung eintreten kann und eine Unschärfe in der Berechnung entsteht.

$$P_H = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (3-43)$$

16 Dabei gilt:

$P_H$  die Heizleistung  $W$

$q$  der Volumendurchfluss  $m^3/sek$

$\rho$  die Dichte  $kg/m^3$

$c_p$  die spezifische Wärme bei konstantem Druck  $J/kg K$

$\Delta t$  die Differenz zwischen Eintritts – und Austrittstemperatur  $K$

17 Zur Prüfung der Heizleistung muss die Wärmepumpe genau nach Herstellerangaben aufgebaut werden. Messungen  
18 gelten als valide, wenn der Beharrungszustand erreicht ist. Dabei muss eine Reihe von Messgrößen für 60 Minuten,  
19 unter Mittelung der periodischen Schwankungen, mit gewissen Toleranzen zu einem konstanten Wert eingehalten  
20 werden. Die Messung der Heizleistung erfolgt, nachdem der Beharrungszustand abgeschlossen ist, für mindestens 35  
21 min. In diesem Zeitraum werden Messwerte alle 30 Sekunden aufgenommen, anschließend kann die durchschnittliche  
22 Heizleistung ermittelt werden. Die praktische Messung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Für Wasser-Wasser-  
23 Wärmepumpen ist der Kalorimeterraum empfohlen, der Messaufbau ist in der Norm genau beschrieben.  
24 Messunsicherheiten sind im Rahmen dieser Norm genau behandelt.

### 25 Teil 4: Anforderungen

26 Der COP muss mindestens an 3 Punkten angegeben und die Leistung als Schaubild oder als Tabelle dargestellt  
27 werden. Jede Wärmepumpe muss eine Kennzeichnung aufweisen und folgende technische Angaben liefern:

- 28 • Allgemeine Angaben (Handelsmarke, Typenbezeichnung, etc.)
- 29 • Leistungsmerkmale (Kühlleistung EER, Heizleistung COP, etc.)
- 30 • Elektrische Kenngrößen (maximaler Anlaufstrom, gesamte Leistungsaufnahme, etc)
- 31 • Einsatzbereich (Einsatzgrenzen (Temperaturen und Volumendurchflüsse), Sicherungseinrichtungen)

32 Für die Modellierung von Wärmepumpen im Heizbetrieb sind, durch die gesetzlich geforderten Angaben, gute  
33 Voraussetzungen gegeben, um Wärmepumpen, genauer den COP, mit Hilfe mathematischer Modelle zu beschreiben.

Im Anhang A- Datenblätter) sind dazu unterschiedliche Wärmepumpen durch Leistungskurven dargestellt. Interessant dabei ist, dass unterschiedliche Arbeitsmittel, unterschiedliche Ergebnisse liefern und die Leistungskurven sowohl konkav als auch konvex gekrümmt sind. Nach Carnot müssten alle Kurven bei ideellen Maschinen eine konvexe Krümmung besitzen. Teile der Leistungskurven können in guter Näherung durch Geraden approximiert werden. Hierbei muss bedacht werden, dass die angegebenen Werte mit einer 15 prozentigen Abweichung falsch sein könnten.

Das Fraunhofer Institut hat eine umfassende Feldstudie zu Wärmepumpen durchgeführt [33]. Im Zeitraum von 2008 bis 2010 wurden installierte Erdwärmepumpen untersucht und mit einem Anteil von 87% wurden Erdreich-Sonden und 13% Erdreich- Kollektoren Daten aufgezeichnet. Das Ergebnis über die 2 Heizsaisons war eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl von 4,09.

Für Wärmepumpen wird vom Land Salzburg eine Energie-Informationsplattform [34] zur Verfügung gestellt, die Angaben zu unterschiedliche Produkten gibt. In dieser Produktdatenbank sind Daten unter anderem auch von weiteren Produktkategorien vorhanden:

- Biomasseheizung
- Speicher und Warmwasserbereitung
- Solarenergie/ Stromspeicher
- Lüftung
- Baustelle

### 3.4. Speichermöglichkeiten für Einfamilienhäuser

Energiespeicher dienen zur Erhaltung von Energie mit einem ausreichenden Potential zur Wiederverwendung. Die entscheidende Frage liegt in der Lenkung der Energieströme, das Ziel dabei ist einen möglichst hohen Systemnutzungsgrad zu erhalten, der den Bedarf an Endenergie und Primärenergie reduziert. Derzeit sind viele unterschiedliche Speicherformen in Gebrauch und in Zukunft werden noch einige mehr dazukommen. Jede Lösung hat einen individuellen Charakter und muss auf das entsprechende Energieflusssystem angepasst werden (siehe auch Kapitel 2.3 und 2.4.). Das Verständnis über die Funktionsweise ist bei jedem Speicher dabei grundlegend von Bedeutung. In den folgenden Kapiteln werden Grundlagen zu Wärmespeichern behandelt, um die Einflüsse auf die Effizienz beurteilen zu können.

#### 3.4.1. A/V-Verhältnis

Neben den Energieströmen ist die Kompaktheit des Bauwerks und generell von Speicherkörpern, einer der wichtigsten beschreibenden Größen. Ein Einfamilienhaus hat, bezogen zur Gebäudehüllfläche eine verhältnismäßig kleine Speichermasse und somit kühlt es verhältnismäßig schnell aus. Anders beschrieben ist das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, mit zunehmendem Volumen, bei gleichbleibender Form, kleiner. Das beste Beispiel ist eine Kugel oder ein Tetraeder, welcher in eine Kugel eingeschrieben ist. Für die Kugel mit dem Radius  $r_k$  gilt, gemäß Gleichung (3-44), dass das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen mit dem Kehrwert des Radius abnimmt.

$$\frac{A_K}{V_K} = \frac{4 \pi r_k^2}{\frac{4}{3} \pi r_k^3} = 3 \frac{1}{r_k} \quad (3-44)$$

Geometrisch betrachtet ist die Kugel der kompakteste Körper, im Vergleich dazu ist der Tetraeder, jener Körper, der bei gleicher Kantenlänge die größte Oberfläche hat und somit sind beide Körper Grenzfälle des A/V- Verhältnisses (Vorausgesetzt alle Kantenlängen sind gleich) und die Kugel bildet den Grenzübergang eines n-Ecks mit unendlich vielen Ecken. Für einen Tetraeder mit der Kantenlänge  $a$  ergibt sich das A/V- Verhältnis mit Gleichung (3-45).

$$\frac{A_{Tet}}{V_{Tet}} = \frac{a^2 \sqrt{3}}{\frac{a^3}{12} \sqrt{2}} = \frac{12}{a} \sqrt{\frac{3}{2}} \quad (3-45)$$



1 Dabei kann der Umkugelradius mit  $r_{UK}$  beschrieben werden:

$$r_{UK} = \frac{a}{4} \sqrt{6} \rightarrow a = 4 \frac{r_{UK}}{\sqrt{6}} \quad (3-46)$$

2 Daraus folgt:

$$\frac{A_{Tet}}{V_{Tet}} = \frac{12}{\frac{r_{UK}}{\sqrt{6}} 4 \sqrt{\frac{3}{2}}} = \frac{9}{r_{UK}} \quad (3-47)$$

3 Um den Vergleich zwischen Tetraeder und Kugel zu objektivieren, muss der Tetraeder das gleiche Volumen  
4 besitzen wie die Kugel. Dafür wird das Verhältnis zwischen dem Volumen des Tetraeders und jenem der umhüllenden  
5 Kugel verwendet, dabei soll das Volumen des Tetraeders gleich dem Volumen der Kugel sein:

$$V_K = V_{Tet} = V_{UK} \frac{2}{9\pi} \sqrt{3} \quad (3-48)$$

6 Umgelegt auf den Radius der umhüllenden Kugel bedeutet das, eine Steigerung des Radius:

$$V_K = V_{UK} \frac{2}{9\pi} \sqrt{3}$$

$$\frac{4}{3} \pi r_k^3 = \frac{4}{3} \pi r_{UK}^3 \frac{2}{9\pi} \sqrt{3} \quad (3-49)$$

$$r_{UK} = r \sqrt[3]{\frac{9\pi}{2\sqrt{3}}}$$

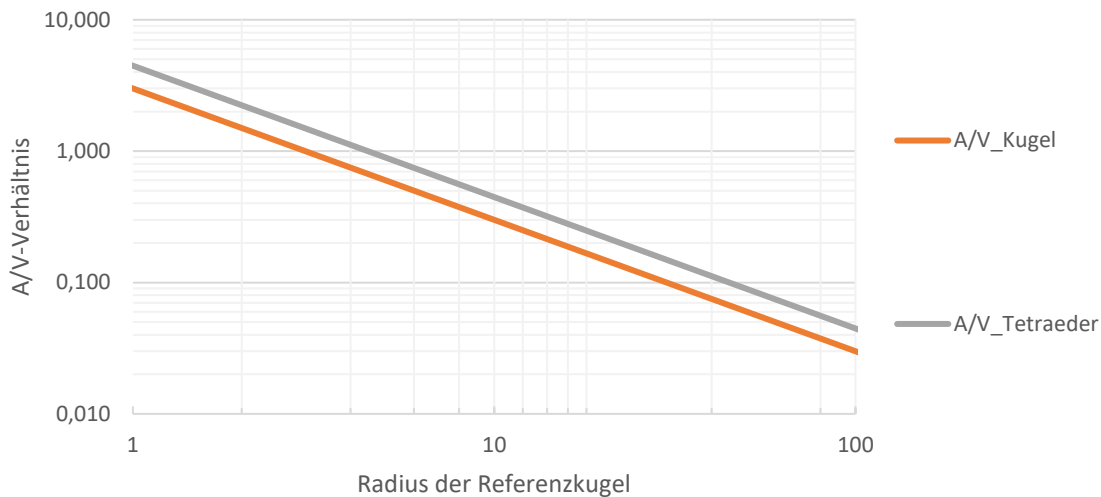
7 Das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche bleibt gleich und ergibt durch Einsetzen von (3-49) in (3-47) folgendes  
8 Ergebnis:

$$\frac{A_{Tet}}{V_K} = \sqrt[3]{\frac{2\sqrt{3} 9^2}{\pi}} \frac{1}{r_k} \approx 4,47 \frac{1}{r_k} \quad (3-50)$$

9 Im direkten Vergleich ist die Oberfläche des Tetraeders bei gleichem Volumeninhalt um 49 % größer. Die  
10 praktische Bedeutung für Beide A/V- Verhältnisse ist, dass der spezifische Energiestrom, abhängig von der Größe,  
11 immer kleiner wird. Der Term vor dem Kehrwert des Radius ist eine Konstante, beim Grenzübergang gegen unendlich  
12 sogar 0.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} c \frac{1}{r} = 0 \quad (3-51)$$

13 In der Abbildung 3-9 ist das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen für eine Kugel und für einen Tetraeder  
14 dargestellt. Abhängig von der Ausdehnung des Objektes sinkt die spezifische Oberfläche indirekt proportional, daher  
15 sind größere Objekte aufgrund der Ausdehnung von Vorteil und funktionieren energetisch effizienter. Für die Praxis  
16 bedeutet das, dass eine große Speichermasse vieler kleiner vorzuziehen ist. Da man jedes Objekt mit einer endlichen  
17 Ausdehnung in eine umhüllende Kugel, bzw. mit einer n-eckigen Form beschreiben kann, gilt allgemein: Je größer  
18 das Bauwerk, desto weniger Energie geht verloren! Eine Stadt, die eine dicht bebaute Struktur besitzt, ist im Sommer  
19 immer wärmer als eine ländliche, dünn besiedelte Struktur.



z

Abbildung 3-9: Entwicklung des Oberflächen-Volumsverhältnisses in Abhängigkeit der Objektausdehnung

### 3.4.2. Dämmung

1 Unabhängig von der Form des Speicherkörpers, ist die Hülle des Speichers für die Verlustströme zur Umgebung  
 2 verantwortlich. Je besser die Überdämmung ist, desto besser hält der Speicher den Energieinhalt und damit auch  
 3 das Wirkpotential. Nach der delegierten EU- Verordnung [35] wurden Energieeffizienzfaktoren für  
 4 Warmwasserspeicher unter genauen Randbedingungen definiert (siehe Tabelle 3-5). Ab 26. September 2017 darf die  
 5 Energieeffizienzklasse C nicht mehr überschritten werden.

Tabelle 3-5: Energieeffizienzklassen von Warmwasserspeichern nach [35]

Energieeffizienzklasse	Warmhalteverluste S in Watt mit Speichervolumen V in Litern
A+	$S < 5,5 + 3,16 \cdot V^{0,4}$
A	$5,5 + 3,16 \cdot V^{0,4} \leq S < 8,5 + 4,25 \cdot V^{0,4}$
B	$8,5 + 4,25 \cdot V^{0,4} \leq S < 12 + 5,93 \cdot V^{0,4}$
C	$12 + 5,93 \cdot V^{0,4} \leq S < 16,66 + 8,33 \cdot V^{0,4}$
D	$16,66 + 8,33 \cdot V^{0,4} \leq S < 21 + 10,33 \cdot V^{0,4}$
E	$21 + 10,33 \cdot V^{0,4} \leq S < 26 + 13,66 \cdot V^{0,4}$
F	$26 + 13,66 \cdot V^{0,4} \leq S < 31 + 16,66 \cdot V^{0,4}$
G	$31 + 16,66 \cdot V^{0,4} \leq S$

6 In Abbildung 3-9 sind die Werte der Tabelle 3-5 doppellogarithmisch dargestellt. Bei näherer Betrachtung fällt  
 7 auf, dass sich die Warmhalteverluste konvex verhalten. Dagegen ist das Oberflächen- Volums- Verhältnis eine Gerade  
 8 in der doppellogarithmischen Projektion, das Verhältnis zwischen dem spezifischen Speicherverlust in Folge des A/V-  
 9 Verhältnisses zur erforderlichen Wärmedämmung nach [35], divergiert. Die Konsequenz ist für die Auslegung von  
 10 Speichern, dass große Speichersysteme günstiger funktionieren als kleine und der Einfluss der Größe mehr bestimmt  
 11 wird als der Dämmung des Speichers. Bei der idealisierten Speichervorstellung ist nicht berücksichtigt, dass  
 12 Schwachstellen vorhanden sind, um die Energie aus dem Speicher zu transportieren. [36] gibt für Warmhalteverlust  
 13 von Warmwasserspeichern, die 2013 am Markt vorhanden sind, bestmögliche Werte gemäß Gleichung (3-52) an.

$$S_{\text{Markt,best}} \sim 5 + 4,16 \cdot V^{0,4} \tag{3-52}$$

14 In Abbildung 3-11 sind die maximalen Warmhaltverluste zu den unterschiedlichen Energieeffizienzklassen, welche  
 15 ab kommenden Jahr zulässig sind, dargestellt. Die besten Wärmespeicher, die derzeit erhältlich sind, entsprechen  
 16 ungefähr der Klasse A, somit sind für die derzeit am Markt erhältlichen Speicher bis zur Klasse A+, zusätzliche  
 17 Entwicklungsmaßnahmen erforderlich.

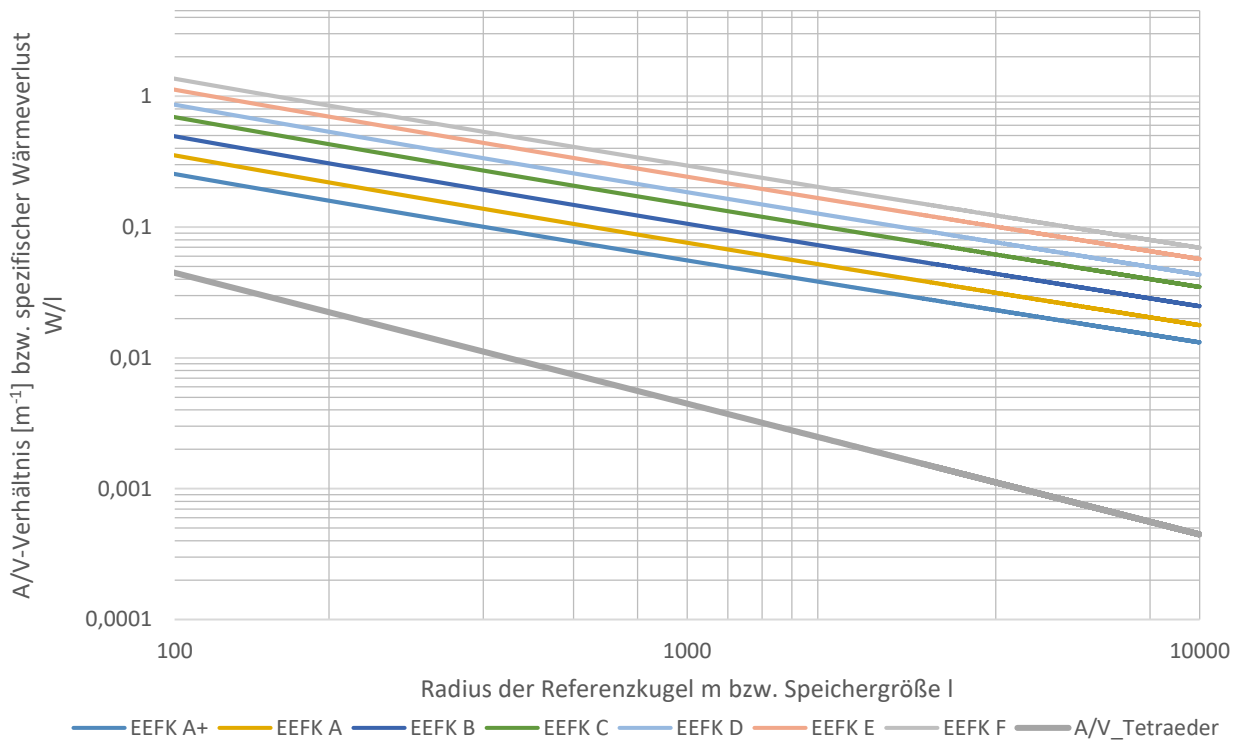


Abbildung 3-10: spezifischer Wärmeverlust nach Energieeffizienzklassen A bis F im Vergleich zum A/V-Verhältnis einer Kugel

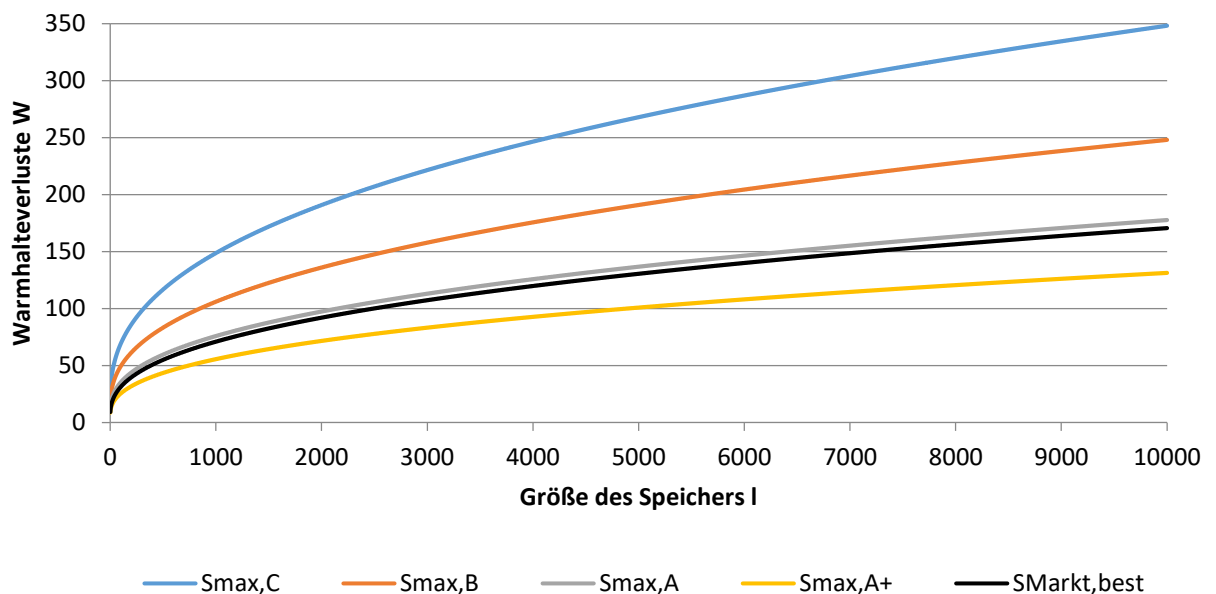


Abbildung 3-11: Warmhalteverlust in Abhängigkeit der Speichergröße, verglichen mit den besten Speichern, die 2013 am Markt erhältlich waren

### 3.4.3. Speicherformen

- 1 Die nutzbare Energiemenge, die in einem Speicher gehalten werden kann, hängt von einigen Faktoren ab.
- 2 Einerseits kann man die Energiemenge und das Temperaturniveau betrachten, die zugeführt werden, andererseits
- 3 die Energiemenge und das Temperaturniveau, die abgeführt werden. Betrachtet man die Energiedichte des
- 4 Speichers, kann man feststellen, je mehr Energie auf kleinem Raum aufgenommen wird, desto weniger Raum
- 5 benötigt man für die Speicherung der vorgesehenen Energiemenge. Das wiederum bedeutet: Je größer die
- 6 Speichergröße, desto mehr Kosten entstehen. Die Quantifizierung der Kosten ist im Folgenden in Abbildung 3-14
- 7 anhand von gebauten Beispielen ersichtlich.

1 Wärmeenergie kann man, abhängig von der Wärmespeicherkapazität und den chemischen Eigenschaften des  
2 einzelnen Stoffes, in diversen Aggregatzuständen speichern. Wesentlich dabei ist, die Energie in der gespeicherten  
3 Form auch nutzen zu können. Typischerweise verwendet man Wasser gerne als Speichermedium, da seine spezifische  
4 Wärmespeicherkapazität höher ist als bei anderen Materialien, abgesehen von Wärmespeichern in Verbindung mit  
5 chemischen Umwandlungsprozessen. Man kann aber auch andere Stoffe zur Wärmespeicherung heranziehen, wie  
6 zum Beispiel mineralische Stoffe (Erdkörper, Beton, oder Ähnliches) oder organische Stoffe. Mineralische Stoffe, die  
7 man zur Wärmespeicherung verwendet, sind chemisch nicht reaktionsfreudig, dadurch bleiben sie auch bei  
8 mehrmaliger Erwärmung und Abkühlung stabil erhalten. Bei den organischen Stoffen wird Wärmeenergie in den  
9 meisten Fällen chemisch gespeichert, wie zum Beispiel in Holz oder Rapsöl.

10 Prinzipiell steigt bei Speichermedien die aufgenommene Energiemenge linear zur Temperatur des  
11 Speichermediums, ausgenommen davon sind die Phasen-Wechsel-Materialien. Bei den Phasen-Wechsel-Materialien  
12 finden chemische Umwandlungsprozesse statt, die eine latente Wirkung auf die Speicherkapazität haben (siehe  
13 Abbildung 2-12). Sorptionsspeicher funktionieren nach dem Prinzip der Sorption, was die Wechselwirkung zwischen  
14 zwei chemisch reagierenden Stoffen beschreibt, wie zum Beispiel bei der Lufttrocknung, bei der Wärme entsteht.

15 Wie man bei der Energiespeicherung schnell merkt, sind viele unterschiedliche Optionen denkbar, wichtig dabei  
16 ist, den Überblick zu behalten. Bei einigen Anwendungsfällen kann Energie auch in einer Form gespeichert werden,  
17 in der diese erst durch Umwandlung oder einen Prozess nutzbar wird. Da der Fokus dieser Arbeit auf saisonaler  
18 Speicherung liegt, werden in weiterer Folge primär Möglichkeiten zur saisonalen Wärmespeicherung aufgezeigt.

19 Seit den 90er Jahren gibt es in Schweden diverse Forschungsprojekte zu saisonalen Warmwasserspeichern (um nur  
20 ein Beispiel zu nennen [37]). In Deutschland wurden im Rahmen der Solarthermie 2000plus von 2000 bis 2008  
21 Forschungsprojekte gefördert, wobei auch Pilotanlagen realisiert wurden. Unter anderem wurde bei der Sanierung  
22 eines Schul- und Sportzentrums in Eggenstein- Leopoldhafen bei Karlsruhe, ein großer Kies/Wasser-Wärmespeicher,  
23 der 4.500 Kubikmeter umfasst, errichtet [38]. Der Verein Deutscher Ingenieure hat zur thermischen Nutzung des  
24 Untergrundes die VDI- Richtlinie 4640 mit 5 Blättern erstellt [39], in der Grundlagen, Genehmigung, Umweltaspekte,  
25 erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, unterirdische thermische Energiespeicher, direkte Nutzung und der Thermal  
26 Response Test behandelt werden. Das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart hat,  
27 gemeinsam mit EnErChem, im Juli ein Forschungsprojekt zu saisonalen Wärmespeichern aus Zeolithe abgeschlossen,  
28 was eine Wärmespeicherkapazität von 2 bis 10 MWh besitzt. Mit dieser Energiespeichermenge kann ein kleineres  
29 Haus über den Winter leicht beheizt werden [40]. Abgesehen von den angeführten Studien und umgesetzten  
30 Projekten, gibt es auch viele andere realisierte Projekte.

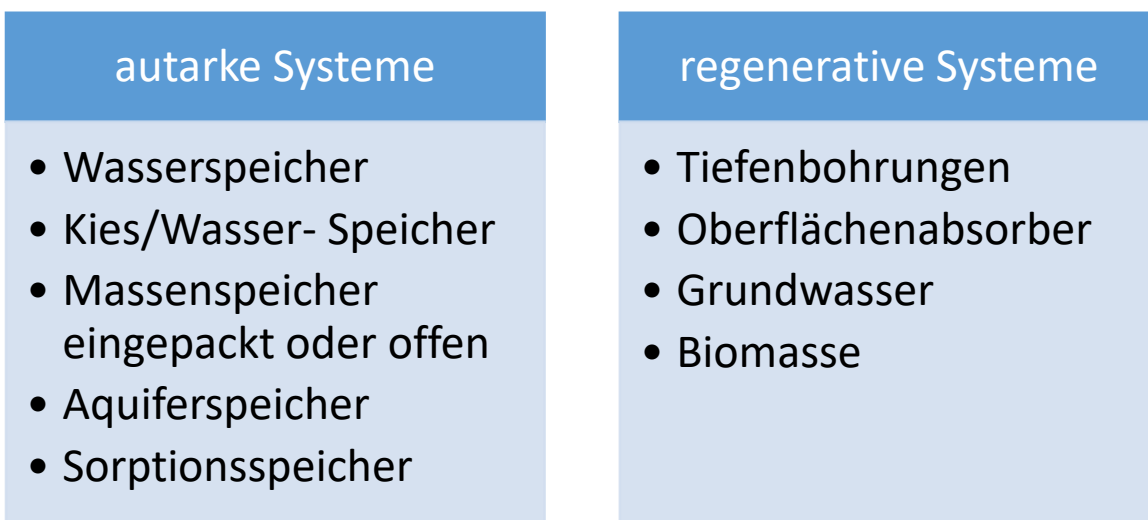


Abbildung 3-12: Einteilung von Speichersystemen in Abhängigkeit der Bewirtschaftung

31 Bei den Speichern kann zwischen autarken und regenerativen Systemen unterschieden werden (siehe Abbildung  
32 3-12). Autarke Systeme sind so isoliert, dass kein externer Energiezufluss besteht, der nicht anthropogen gesteuert  
33

1 wird. Bei regenerativen Systemen erfolgt der Zufluss der Energie innerhalb eines absehbaren Zeitraums, natürlich  
 2 ohne anthropogene Beihilfe. Im weitesten Sinne kann man auch den Brennholzkreislauf zu den regenerativen  
 3 Systemen zählen, allgemeiner betrachtet sei hier die gesamte Biomasse erwähnt.

4 Gemäß Abbildung 3-13 sind weitere Speicherkapazität unterschiedlicher Speicher angegeben. Bei den  
 5 Speichermedien ohne chemische Umwandlung, liegt Wasser durch die Eigenschaften des Dipolmoleküls an erster  
 6 Stelle. Bei der Nutzung von Phasenübergängen und Sorption, können noch weit größere Speicherdichten erzielt  
 7 werden. Im Vergleich dazu liegt der Brennwert von Holz mit einer relativen Holzfeuchtigkeit von 10% bei 4,5 kWh/kg.  
 8 Bei Buchenholz liegt die Energiedichte durch Verbrennung mit 480kg/m<sup>3</sup> Schüttdichte bei 2.160 kWh/m<sup>3</sup>.

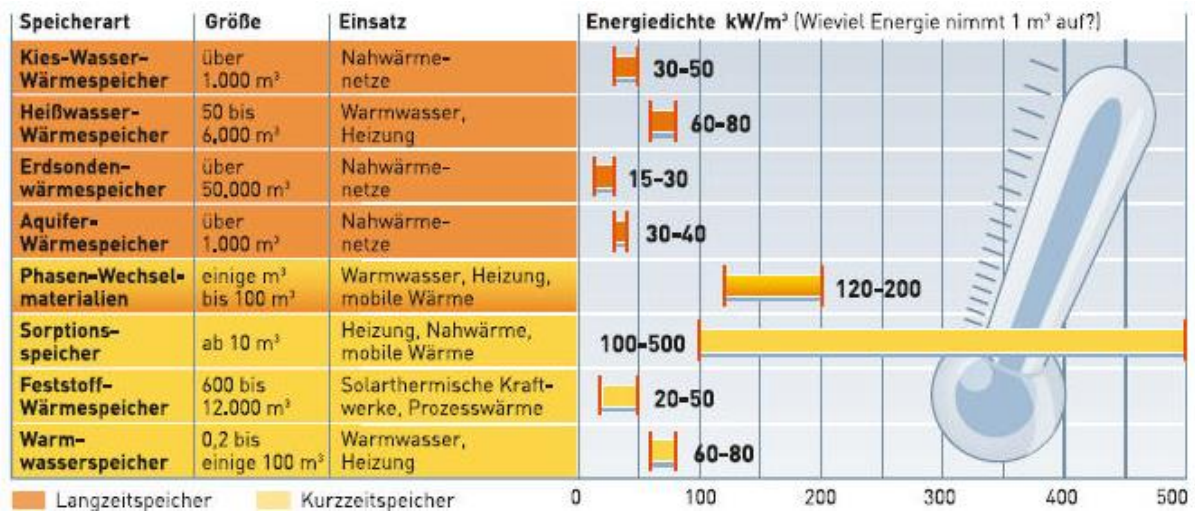


Abbildung 3-13: Energiedichte verschiedener Wärmespeicher [41]

9 Die Größenordnung von saisonalen Speichersystemen sollte so ausgelegt werden, dass die auftreffende Energie  
 10 über den Sommer bis in den Spätherbst gesammelt werden kann und im Winter, im besten Fall, ohne Heizung  
 11 abgegeben wird, damit fossile Brennstoffe vermieden werden. Für die Berücksichtigung in der Planung variiert der  
 12 Speicherraumbedarf, stark abhängig von der verwendeten Heiztechnologie.

### 3.5. Warmwasserspeicher

13 Für die Auslegung von Warmwasserspeichern ist die Anlagengröße und der gewünschte solare Deckungsgrad  
 14 entscheidend. Im Wesentlichen kann man Wasserspeicher in drei Größen einteilen: kleine Speicher in normalen  
 15 Haushalten gebräuchlich (rund 200-5.000 Liter), mittlere Speicher mit 5-100 m<sup>3</sup> und große Speicher ab 100 m<sup>3</sup>, so  
 16 wie sie in Nah- und Fernwärmenetzen verwendet werden, z.B. wie jener im Kraftwerk Theiß bei Krems in  
 17 Niederösterreich, mit 50.000 m<sup>3</sup> Wasser [42], über den 5.000 Haushalte in der Region mit Fernwärme versorgt.

#### 3.5.1. Pufferspeicher/ Solarspeicher

18 Bei gewöhnlichen Warmwasserspeichern in Haushalten sind bis rund 2.000 Liter keine gesonderten baulichen  
 19 Maßnahmen erforderlich und das Kippmaß ist in den meisten Fällen die bestimmende Größe für den Einbau der  
 20 Schichtspeicher. In einen 2.000 Liter großen Schichtspeicher kann man nur eine beschränkte Menge an Energie  
 21 einbringen. Sollen größere Speicher eingebaut werden, kann man bis etwa 5.000 Liter mit moderaten Mehrkosten  
 22 für Manipulation und bauliche Anpassung rechnen. Mittlere Speicher über 5.000 Liter fordern hingegen eine integrale  
 23 Planung und müssen gesondert angefertigt werden.

24 Um eine Größenvorstellung für normale Solarspeicher zu erhalten, kann als Beispiel ein Warmwasserspeicher  
 25 herangezogen werden, der mit einer Wärmepumpe geheizt wird und dazu solarunterstützt ist. Das Temperaturniveau  
 26 der Wärmepumpe liegt für Warmwasser bei 60 °C und jenes der Solarkollektoren im Sommer bei über 80 °C, wenn  
 27 das System dies zulässt. Auf alle Fälle liegt die Wassertemperatur unter dem Siedepunkt, da entstehendes Gas über  
 28 diverse Sicherungsventile abgeführt werden müsste. Wasser hat bei 20 °C eine spezifische Speicherkapazität von  
 29 ungefähr 4,18 kJ/kgK [21], das entspricht 1,16 kWh/m<sup>3</sup>K. Wenn man voraussetzt, dass die Speichertemperatur zur  
 30 Heizung mindestens 30 °C betragen muss und maximal 80 °C betragen darf (aufgrund der begrenzten thermischen

1 Belastbarkeit, der heutzutage eingesetzten Kunststoffwasserleitungen), kann man eine Speicherkapazität von rund  
 2  $1,16 \times 50 = 58 \text{ kWh/m}^3$  nutzen. Werden Metalle verwendet, kann man den Speicher weiter erhitzen und lukriert  
 3 dadurch weitere  $23 \text{ kWh/m}^3$  (vergl. auch Abbildung 3-13). Ein Speicher mit 2.000 Liter Inhalt hätte demnach maximal  
 4  $160 \text{ kWh}$  Heizenergie, die gespeichert werden kann. Bei einem gewöhnlichen Schichtspeicher kann im Regelbetrieb  
 5 nicht davon ausgegangen werden, dass dieser voll beladen wird, vor allem nicht im Winterbetrieb [43]. Vergleicht  
 6 man die Speicherkapazität mit der auftreffenden Strahlungsenergie im Sommer, so erkennt man, dass mit einem  
 7 Solarkollektor (mit  $10 \text{ m}^2$  Absorberfläche) rund vier Sonnentage reichen, um den Speicher vollkommen aufzuladen.  
 8 Für eine grobe Abschätzung wird ein Wirkungsgrad von 40 Prozent angenommen, dabei sind die Verluste von realem  
 9 Strahlungsverlauf, sowie der bessere Wirkungsgrad im niedrigeren Temperaturbereich vernachlässigt.

$$E_{Solar} \sim \eta_{SK} \cdot I_{Sonne} \cdot A_{SK} \cdot t \quad (3-53)$$

$$E_{Solar} \sim 0,40 \cdot 940 \cdot 10 \cdot 12,4 \sim 180.000 \equiv 180 \text{ kW}$$

10 Mit:

$E_{Solar}$	Abschätzung des Solarertrags $W$
$\eta_{SK}$	Wirkungsgrad des Solarkollektors –
$I_{Sonne}$	Maximale Strahlungsintensität gem. HSK – Daten (siehe Abbildung 2-2)
$A_{SK}$	Absorberfläche Solarkollektor $\text{m}^2$
$t$	Zeit $h$

11 Im Vergleich zu den Erträgen, ist im Sommer nur der Energiebedarf für Warmwasser (WWWB) erforderlich. Pro  
 12 Kopf sind 50 Liter Warmwasser mit  $60^\circ\text{C}$  bereitzustellen, der Warmwasserwärmebedarf liegt bei rund  $13 \text{ kWh/Tag}$   
 13 in einem 4-Personen-Haushalt. Tendenziell wird aber im Winter mehr Warmwasser verbraucht als im Sommer, man  
 14 sieht also, dass bei der konventionellen Anlagenkonfiguration eine beträchtliche Menge an Solarenergie nicht genutzt  
 15 werden. Die Steuerung des Solarkollektors schaltet bei vollem Speicher in den Stagnationsbetrieb und kann keine  
 16 Sonnenenergie vom Kollektor mehr in den Speicher fördern, da sonst die Anlagenkomponenten Schaden nehmen  
 17 würden.

### 3.5.2. Saisonale Wärmespeicherung

18 Will man überschüssige Sonnenenergie vom Sommer im Winter nutzen, ist man zwangsläufig dazu aufgefordert,  
 19 die Energie in geeigneter Form zu speichern. Wie kann also so ein Speicher aussehen? Die Energiemenge wird  
 20 einerseits durch das Bauwerk bestimmt, andererseits durch das Nutzungsverhalten der Bewohner. Die klassischen  
 21 Überlegungen zum Bauwerk sind die Energieverluste aufgrund von Wärmeleitung (durch opake und transluzente  
 22 Bauteile), Wärmekonvektion durch beabsichtigten und unbeabsichtigten Luftwechsel, Energiegewinne durch  
 23 Strahlung und in untergeordneter Rolle auch durch Wärmeleitung allgemein. Die technische Gebäudeausrüstung  
 24 spielt im Zusammenhang mit dem Nutzerverhalten die zweite Hauptrolle. Der wesentlichste Punkt bei der  
 25 Berücksichtigung der Energiemenge ist jedoch vor allem die Gebäudegröße und das Verhältnis von Außenfläche zu  
 26 Volumen. Diese Größen kann man mit dem Gesamtenergiebedarf des Gebäudes zusammenfassen. Im Wesentlichen  
 27 zusammengefasst, werden diese Punkte durch den Energieausweis behandelt (vgl. Kapitel 5.1.2).

28 Für die häusliche Warmwasserbereitung kann man zwei erforderliche Temperaturniveaus unterscheiden. Erstens  
 29 die Temperatur des Warmwassers an sich und außerdem die Temperatur, die für die Heizung benötigt wird. Zweitere  
 30 ist wiederum stark vom verwendeten Heizsystem abhängig. Ein Niedertemperatursystem benötigt großflächige  
 31 Aufteilung der Wärmeenergie, da die Temperaturdifferenz gering ist und gemäß der Wärmeleitgleichung wenig  
 32 abgegeben werden kann. Bei saisonalen Speichern müssen zur Steigerung der Effizienz also Fußbodenheizungen  
 33 verwendet werden. Der Trend geht aber auch in Richtung Betonkernaktivierung, die für große Hallen ohne  
 34 Fußbodenaufbau zum Beispiel, wirtschaftlich von Vorteil sind. Alternativ dazu werden lokal auch Wandheizungen

1 alleine oder in Kombination mit Fußbodenheizungen verwendet. Der Nachteil liegt hier jedoch bei der Stärke des  
 2 Verputzes, der sich dadurch erhöht und in Folge teurer wird. Abgesehen davon, ist die Nutzung der Wandfläche  
 3 durch dieses System stark eingeschränkt bzw. ausgeschlossen (Regale, Bilder, etc.). Die Energieverteilung bei  
 4 Hochtemperatursystemen funktioniert über Plattenheizkörper, Konvektoren, Radiatoren, etc.  
 5 Niedertemperatursysteme benötigen eine Temperatur von rund 35 Grad Celsius, die zur Verfügung gestellt werden  
 6 muss, Hochtemperatursysteme hingegen benötigen mindestens 60 Grad Celsius. In Kombination mit Solarkollektoren  
 7 sind also Niedertemperatursysteme zur Heizenergieverteilung klar von Vorteil.

8 Bei der Bewirtschaftung eines Wärmespeichers muss man die Faktoren Beladung, Entladung und Verweilzeit  
 9 beachten, was bedeutet, dass die zugeführte und abgeführte Wärmemenge berücksichtigt werden muss, genauso  
 10 wie die Vorhaltung dieser über die Speicherdauer. Typische Formen der Bewirtschaftung sind die kurzfristige  
 11 Speicherung über wenige Stunden (<3 Tage) bis hin zur saisonalen Speicherung (1/2 Jahr), bei der die  
 12 Wärmemengenänderung, im Verhältnis zur Gesamtspeicherkapazität, klein ist.

13 Je nach Speichermedium und Beladung stellt sich das Temperaturniveau im Speicher ein. Dabei haben  
 14 Wasserspeicher die Eigenschaft, dass sich eine Schichtung im Speicher einstellt - bei ungünstiger Beladung oder  
 15 Speicherbauweise, kann diese durch Strömung zerstört werden und sich die Temperatur des Speichers  
 16 homogenisieren. Bei Festkörperspeichern treten keine Schichtungen durch Strömung auf, weshalb diese  
 17 Wärmeausbreitungsprozesse einfacher zu berechnen sind als jene im Wasser. Zur Temperaturverteilung im Wasser  
 18 gibt es umfangreiche Studien, welche sich mit einer günstigen Be- und Entladung befassen [38].

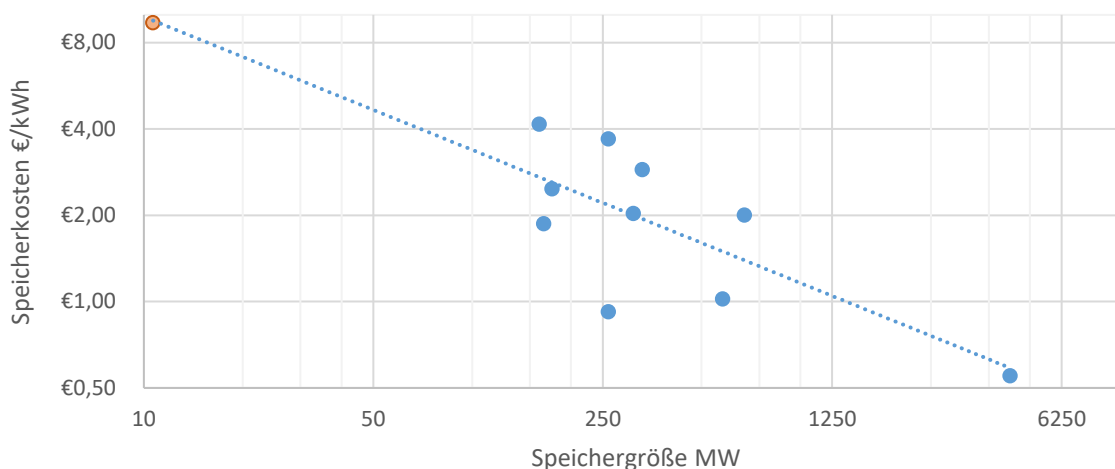
19 Die Auslegung der Größe ist ebenfalls ein wichtiger Bestandteil der Planung. Der gesamte Energiebedarf sollte  
 20 im Idealfall mit einem saisonalen Speicher abgedeckt werden, wobei die erforderlichen Energiemengen nicht  
 21 unerheblich sind und zusätzlich müssen noch Verluste berücksichtigt werden, die durch die lange Verweilzeit  
 22 entstehen.

**Tabelle 3-6: Kosten zum Wandaufbau eines Warmwasserwärmespeichers exkl. MwSt.**

Aufbau:	Einheitspreis exkl. MwSt €/m <sup>2</sup> :
EPDM-Folie	40,00
XPS-G 70 (druckfest und hitzebeständig bis 70 °C) d=25cm	50,00
Betonwände, -decken und Fundamentplatte d=25cm	95,00
EKV5 2-lagig geflämmt	40,00
XPS-G d=3cm	8,00
Summe	233,00

23 Angenommen ein Haus benötigt eine Heizenergie in der Höhe von 8.000 kWh/a und der Warmwasserspeicher  
 24 besitzt eine Wärmekapazität von 50 kWh/m<sup>3</sup>, die effektiv genutzt werden kann, dann müsste der  
 25 Warmwasserspeicher ohne Verluste eine Größe von  $8000/50=160$  m<sup>3</sup> besitzen. Bei einem sehr guten Nutzungsgrad  
 26 von 75 % ergibt sich, dass rund 215 m<sup>3</sup> Speichervolumen vorhanden sein müssten, ein Würfel in diesem Ausmaß  
 27 müsste also eine Seitenlänge von 6 Meter haben. Würde der Speicher unter einem Haus stehen, um auf einem  
 28 Grundstück Platz zu sparen, so müssten seine Wände betoniert werden. Bei einem Wandaufbau von 50 cm ergibt das  
 29 eine Oberfläche des Speichers von 294 m<sup>2</sup>. Nimmt man für die Hülle des Speichers Kosten gemäß Tabelle 3-6 für den  
 30 Wandaufbau von 280 €/m<sup>2</sup> inkl. Steuern an, so kostet die Hülle ohne Baggerarbeiten rund 82.000 €. Setzt man für  
 31 einen großen 40 Tonnen Bagger eine Woche Arbeitszeit an und muss den Aushub verführen, kann man mit weiteren  
 32 13.000 € rechnen. Mit dem Be- und Entladesystem kann man die Kosten für den Endverbraucher bei einem derartig  
 33 großen Warmwasserspeicher auf ungefähr 100.000 € ±20 % annehmen.

1 [44] gibt zu saisonalen Speichern an, dass das A/V- Verhältnis von wesentlicher Bedeutung ist und Speicher mit  
 2 moderater Dämmstoffstärke erst ab 1.000 m<sup>3</sup> betrieben werden können. Unabhängig von dieser Studie, wurde im  
 3 Rahmen dieser Diplomarbeit eine Abschätzung für den Speicherbedarf eines Einfamilienhauses erstellt, wobei im  
 4 Wesentlichen die gleichen Ergebnisse erzielt wurden (siehe Kapitel 6.1).



**Abbildung 3-14: Speicherkosten Wärmespeicher in Abhängigkeit der Speichergröße; die blauen Punkte sind realisierte Projekte nach [44], der orange Punkt ist das Beispiel von weiter oben**

5 Betrachtet man die realisierten Projekte, die in [44] vorgestellt werden, so erkennt man einen Zusammenhang  
 6 zwischen der Speichergröße und den Speicherkosten. In Abbildung 3-14 sind die blau hinterlegten Punkte die  
 7 tatsächlich realisierten Projekte, der orange Punkt symbolisiert das oben angenommene Beispiel des  
 8 Warmwasserspeichers für ein Einfamilienhaus. Vergleicht man die Kosten mit dem A/V- Verhältnis gem. Abbildung  
 9 3-9, erkennt man den Zusammenhang. Im Wesentlichen werden die Kosten des Speichers durch die Hüllfläche  
 10 bestimmt. Auffällig waren 2 Musteranlagen, die sehr preiswert errichtet wurden, die jeweils rund 1€/kWh  
 11 Speicherkapazität gekostet haben. Die erste Anlage wurde 2007 in Crailheim- Deutschland errichtet und die zweite  
 12 2012 in Braedstrup Dänemark, wobei beide als Erdsondenwärmespeicher ausgeführt sind. Die Behälter-  
 13 Wärmespeicher und Erdbeckenwärmespeicher sind klar teurer als die Erdsondenspeicher. Bei der Größenordnung  
 14 wie einer Anlage im dänischen Marstal, hat aufgrund der Dimension mit 4.350 MWh die günstigsten Kosten. Die Größe  
 15 des Speichervolumens ist 75.000 m<sup>3</sup>, das entspricht einem Würfel mit der Kantenlänge von gut 42 Metern, in dieser  
 16 Größenordnung liegt auch der Fernwärmespeicher der EVN in Theiß (50.000 m<sup>3</sup>).

17 Außer den Kosten, die zur Errichtung des Speichers erforderlich sind, müssen bei der Bewirtschaftung so großer  
 18 Speicher auch die Kosten berücksichtigt werden, die für die integrale Planung und die Einstellung der komplexen  
 19 Regelungstechnik erforderlich sind. Ein saisonaler Speicher ist ein individuelles Produkt und muss in den Jahren nach  
 20 der Inbetriebnahme in der Regel optimiert werden, um effizient zu funktionieren.

21 Alle Wärmespeicher mit sensibler Wärmespeicherung unterliegen viel mehr dem zweiten Hauptsatz der  
 22 Thermodynamik (siehe Kapitel 2.1.2) als latente Wärmespeicher, da die Temperaturdifferenz bei gleicher  
 23 Energiespeichermenge höher ist als bei sensiblen Speichern. Die Wärmeenergie verteilt sich so lange, bis die  
 24 Speichertemperatur homogen mit der Umgebung ist. Verluste können mit starken Dämmungen und günstigen  
 25 Speicherformen gut beeinflusst werden, aber die Wärmeströme sind mit einer vorgegebenen Temperaturgradienten  
 26 der Wirkung nach nicht zu verhindern. Die umschließenden Bauteile müssten eine adiabatische Wirkung besitzen,  
 27 die aber real nicht existiert.

28 In weiterer Folge stellt sich die Frage, wie man Energie besonders effizient speichern kann. Lässt man die  
 29 Forderungen nach der sofortigen Nutzbarkeit der Wärmequelle fallen, kann man Energie in Tiefenbohrungen  
 30 speichern. In weiterer Folge kann man die Energie mit Hilfe einer Wärmepumpe entnehmen, was auch eine typische  
 31 Technik bei großen Speichersystemen ist. Öffentliche Netze haben den Nachteil, dass diese Energie mit hoher  
 32 Vorlauftemperatur liefern müssten.



### 3.5.3. Tiefenbohrungen

1 Heutzutage werden viele Wärmepumpen mit Hilfe von Geothermie betrieben, dabei geht der Trend zunehmend  
 2 zu Tiefenbohrungen. Diese funktionieren als Energiequelle im Grunde genauso wie eine Quelle, die mit Wasser gefüllt  
 3 ist und je nach Mächtigkeit kann man aus dieser Quelle schöpfen. Wie stark eine Tiefenbohrung ist, wird in der Praxis  
 4 mit Hilfe des Thermal Response Tests durchgeführt. Parallel zu der experimentellen Ermittlung der  
 5 Bohrlocheigenschaften, kann der TRST auch mit Hilfe von Bodenkennwerten durchgeführt werden. Hierzu sind  
 6 Kenntnisse zur Tiefenbohrung und zum Boden erforderlich, genauer genommen zur Diffusivität, die die  
 7 Temperaturleitfähigkeit des Bodens beschreibt. Diese Größe setzt sich zusammen aus der Wärmeleitfähigkeit, der  
 8 Rohdichte und der spezifischen Wärmekapazität.

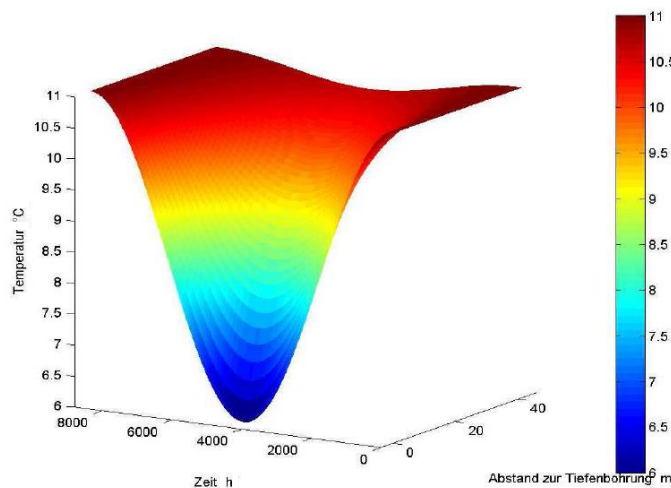
$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (3-54)$$

9 Die Diffusivität ist ein Kennwert, der vor allem bei der zeitlichen Modellierung verwendet wird. Die VDI 4640-  
 10 Blatt 4 gibt gem. Tabelle 3-7 Werte für die Diffusivität, die Werte liegen alle innerhalb einer Zehnerpotenz.

**Tabelle 3-7: Thermische Stoffdaten gem. VDI 4640- Blatt 4 [45]**

Bodenart	Wärmeleitfähigkeit		Rohdichte $\rho_E$ in $10^3 \text{ kg/m}^3$	Volumen- bezogene spezifische Wärmekapazität $\rho_E \cdot c_E$ in $\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$	Temperaturleit- fähigkeit $a$ in $\text{m}^2/\text{s} \cdot 10^{-6}$
	in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\lambda_E$ Typischer Rechenwert			
Sand, trocken	0,3 bis 0,8	(0,4)	1,16 bis 1,7	1,3 bis 1,6	0,28
Sand, wassergesättigt	1,7 bis 5,0	(2,4)	1,6 bis 2,2	2,2 bis 2,9	0,94
Kies, trocken	0,4 bis 0,5	(0,4)	1,5 bis 1,8	1,4 bis 1,6	0,27
Kies, wassergesättigt	ca. 1,8	(1,8)	ca. 2,2	ca. 2,4	0,75
Ton/Schluff, trocken	0,4 bis 1,0	(0,5)	0,93 bis 1,3	1,5 bis 1,6	0,32
Ton/Schluff, wassergesättigt	0,9 bis 2,3	(1,7)	1,2 bis 1,7	1,6 bis 3,4	0,68
Torf	0,2 bis 0,7	(0,4)	n.a.	0,5 bis 3,8	0,19

11 In Abbildung 3-15 ist die Temperaturabsenkung durch eine Entnahme dargestellt. Dabei ist das Lastprofil der  
 12 Entnahme sinusförmig und die Temperatur in Abstand zum Bohrloch ist mit einer exponentiellen Funktion dargestellt.  
 13 Im Regelbetrieb senkt sich das Temperaturfeld um die Tiefenbohrung und die Temperatur der entnommenen Energie  
 14 sinkt konsequent. Nach einer Entnahme regeneriert sich das Temperaturfeld nach dem zweiten Hauptsatz der  
 15 Thermodynamik wieder.



**Abbildung 3-15: Die Energieentnahme entspricht einer Energiesenke, bei der die Temperatur des Bodens abgesenkt wird. Die Regeneration erfolgt mit der Zeit.**

## 4. Forschungsfrage

1 Allgemein betrachtet, muss bei der derzeitigen Lage der globalen Erwärmung, das Ziel verfolgt werden, den  
2 Endenergiebedarf von Häusern auf null zu reduzieren und nicht nur das, denn zum vollständigen Erreichen der  
3 Energiewende muss auch ein Nettoüberschuss produziert werden, der in Zukunft im Bereich des Transports  
4 verwendet werden kann. Bauingenieure können im Bereich des Strombedarfs nur in eingeschränktem Maße zur  
5 Energiewende beitragen, da das Stromnetz mit allen Anforderungen berücksichtigt werden muss, dafür können  
6 jedoch alle thermodynamischen Wissensgebiete bearbeitet werden. Nun stellt sich unter anderem die Frage, wie  
7 Sonnenenergie saisonal gespeichert werden kann.

8 In vielen Haushalten werden Solarkollektoren zur Nutzung der Solarenergie verwendet. Dabei wird das Wasser  
9 von einem gewöhnlichen Pufferspeicher entnommen und über den Solarkollektor erhitzt. Durch das erforderliche  
10 Temperaturniveau, das weit über der Umgebungstemperatur liegt, gibt es im Zuge der Nutzung beträchtliche  
11 Energieverluste. In der Regel können nur rund 40% der auftreffenden Strahlungsenergie auf die Absorberfläche des  
12 Kollektors, für die häusliche Warmwasserbereitung erzeugt werden. Darüber hinaus gibt es Verluste bei der  
13 Anbindeleitung zwischen Solarkollektor und Warmwasserspeicher, sowie bei der Speicherung.

14 Der wesentliche Nachteil bei der Nutzung von Solarenergie in der derzeitigen Standardkonfiguration ist, dass  
15 diese nur vom Frühjahr bis in den Herbst in ausreichender Form zur Verfügung steht. Im Sommer kommt es zu einem  
16 ausgeprägten Energieüberschuss, der Ausmaße annimmt, die für die Anlage schädlich werden können und die  
17 Lebensdauer dieser erheblich beeinflussen. Nicht nur auf die Solarkollektoren wirkt sich das Leistungsmaximum der  
18 Sonnenenergie im Sommer negativ aus, auch die sommerliche Überhitzung ist oftmals verantwortliche für die  
19 Unbehaglichkeit in Wohnräumen.

20 Die Dissertation zur Steigerung der solaren Deckung [11] und das Sonnenhausinstitut [29] kommen bei der Neigung  
21 des Solarkollektors auf das gleiche Ergebnis: die größte solare Deckung wird bei einer Kollektorneigung von 60° und  
22 einer Ausrichtung Richtung Süden erzielt. Abweichend zu den Ergebnissen von beiden Projekten wird hinterfragt, ob  
23 man nicht mit einem großen Speicher doch bessere Ergebnisse erzielen könnte. In Norwegen und Schweden wurden  
24 einige saisonale Speicher ausgeführt, obwohl im skandinavischen Raum weniger Sonnenenergie vorhanden ist als in  
25 Mitteleuropa (vgl. Abbildung 2-3).

26 Wie kann man also solare Energie effizient speichern, damit der solare Deckungsgrad optimiert und die  
27 Phasenverschieb zwischen Energieüberschuss und -bedarf möglichst verlustfrei und kosteneffizient überbrückt wird?  
28 Wieviel Energie muss gespeichert werden, um auch die saisonalen Verluste zu überbrücken? Die Verwendung von  
29 Solarkollektoren amortisiert sich im Kohlendioxidhaushalt innerhalb von 1/2 bis zu 2 Jahren und die Fläche zur  
30 Gewinnung der Sonnenenergie ist nahezu unbegrenzt vorhanden.

31 In Kapitel 2 und 3 sind die am häufigsten verwendeten Möglichkeiten aufgezeigt, unter Verwendung dieser  
32 werden Optionen untersucht, mit denen Energie saisonal gespeichert werden kann, wobei möglichst wenig  
33 Speicherverluste entstehen und die Lebenszykluskosten ein Minimum betragen sollen. Die derzeit  
34 vielversprechendsten Möglichkeiten zur sensiblen Wärmespeicherung sind einerseits Warmwasserspeicher und  
35 andererseits Tiefenbohrungen, hier stellen sich die Fragen: mit welchen Modellen kann das Speicherverhalten  
36 simuliert werden, wie ist das Verhalten bei der Be- und Entladung und in welcher Detaillierung müssen diese  
37 abgebildet werden um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen?

## 5. Modellierung

Die Abbildung eines realen Sachverhalts mit Hilfe eines physikalischen Modells, dient der Prognose von Ergebnissen und hat den Vorteil, dass langwierige und kostenintensive Tests vermieden werden. Mit Hilfe echtzeitbasierter EDV-Begleitung können Prototypen überwacht und im laufenden Betrieb optimiert werden. Nun stellt sich die Frage, welche Aussagekraft eine EDV-basierte Simulation hat und in welchem Rahmen Simulationsprogramme helfen können und wo deren gegebenen Grenzen der Anwendbarkeit liegen.

Die Anforderungen an Modelle jeglicher Art liegen hoch und Modellierungskonzepte müssen kritisch hinterfragt werden, da die kostenintensive Entwicklungszeit von Forschungsprojekten von der ersten Idee bis zur Marktreife oft 10 Jahre oder länger dauert. Rechnerunterstützte Modelle können schneller als Feldstudien umgesetzt werden und auch Optimierungen sind in einem EDV-basierten Modell einfacher umzusetzen und mit einer Datenaufbereitung nachvollziehbar.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der verbesserten Ausnutzung der Sonnenenergie, mit Reduktion des Endenergiebedarfes. Bei der Modellierung muss dementsprechend eine Reihe von Bauteilen berücksichtigt werden. Im Folgenden werden dazu zwei Themengebiete behandelt, einerseits der Bedarf der Energie durch das Bauwerk und andererseits die saisonale Energiespeicherung, bei der auf die Modellbildung eingegangen wird, die bauliche Ausführung jedoch wird nur am Rande gestreift. Abbildung 5-1 gibt einen Überblick zur Strukturierung von Gebäudemodellen, die mit Speichermodellen verknüpft sind. Durch den Endenergiebedarf können mit Hilfe des Konversionsfaktors die Emissionen ermittelt werden.

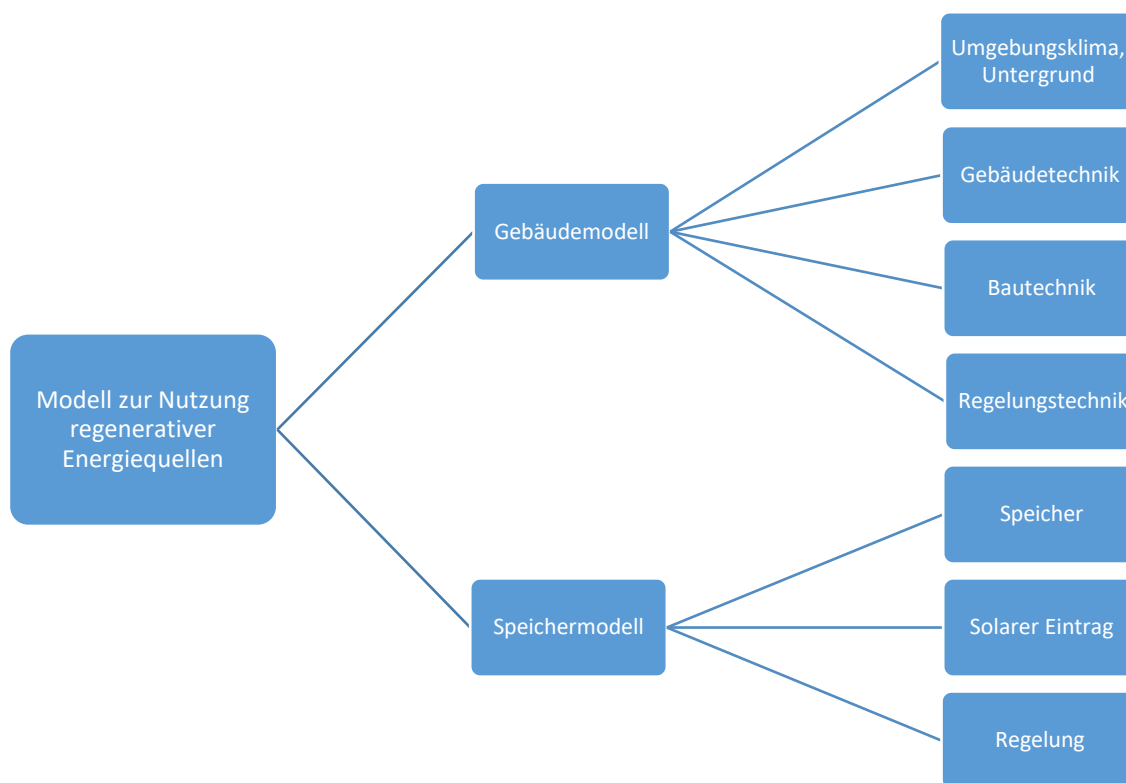


Abbildung 5-1: Strukturierung von Gebäudemodellen zur Nutzung von regenerativen Energiequellen

### 5.1. Berechnungsmodelle zur Ermittlung des Endenergiebedarfes

#### 5.1.1. Anforderungen

Grundlegend kann die physikalische Modellierung von Gebäuden in 4 Bereiche gegliedert werden (siehe auch Abbildung 3-4): zunächst die Rahmenbedingungen, die vom Standort abhängig sind, das Bauwerk mit den einzelnen Bauteilen, wie die Außenwände, Fenster, etc., weiters die Gebäudetechnik und die Regelungstechnik. Außer den Rahmenbedingungen gibt es sehr viele Einflussfaktoren, die vom Projektanten und dem Investor entschieden werden müssen.

### Modellbildung Umgebungsklima/Untergrund

- Außentemperatur
- Modellierung des Erdreichs
  - Erdreich im Bereich von Bauteilen
  - Erdreichmodell für Flächenkollektoren
  - Tiefenbohrfeld
- Solare Einstrahlung
  - Grundlagen zur Sonnenstrahlung
  - Berechnung des Sonnenstandes
  - Solare Einstrahlung auf horizontalen Flächen
  - Berechnung der Strahlungsintensität auf beliebig orientierte und geneigte Oberflächen

### Modellbildung Gebäudetechnik

- Thermischer Solarkollektor (Flachkollektor)
- Rohrmodell
- Pumpen
- Wärmetauscher
- Wärmepumpen
- Tiefenbohrungen
- Thermischer Pufferspeicher
  - Ein-Kapazitäten-Modell
  - Multi-Kapazitäten-Modell
- Wärmetauscher
  - Tiefenbohrungen
  - Warmwasserspeicher

### Modellbildung Bautechnik

- Wärmeübergang an den Oberflächen von Bauteilen
  - Wärmeübergang an der Außenseite eines Bauteils
  - Wärmeübergang an der Innenseite eines Bauteils
- Opake Bauteile
  - Randbedingungen für Bauteilmodelle
  - Modell für nicht-aktive Bauteile
  - Modell für aktivierte/nicht-aktivierte Bauteile
  - TABS-Modell (Thermisch aktivierte Bauteile)
- Transparente Bauteile
- Lüftung
  - Infiltration
  - Hygienischer Luftwechsel
  - Fensterluftwechsel
- Innere Lasten
- Raumknotenmodell

### Regelungstechnik

- Zeitlich verzögerte Wärmeabgabe bzw. Taktung
- Selbstregelungseffekt
- Abgrenzung von Heiz- und Kühlperiode
- Regelungsstrategien

#### Abbildung 5-2: Einflussfaktoren zur thermischen Simulation von Bauwerken nach [24] mit Erweiterungen

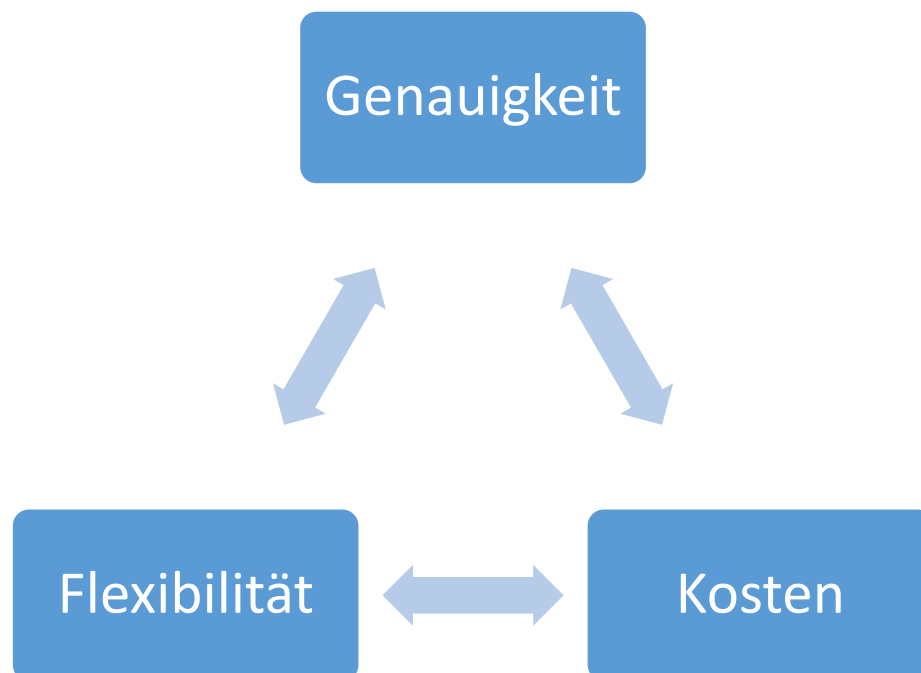
- 1 Entgegen der Idealvorstellung der integralen Planung, die Lebenszykluskosten minimieren soll, wird im Bereich
- 2 der Einfamilienhäuser bereits der Einreichplan und der Energieausweis oft als notwendiges Übel betrachtet, um die
- 3 Baubewilligung zu erhalten. Nun ist die Anforderung an eine Berechnung, wie jene des Energieausweises oder
- 4 allgemein von Ingenieurleistungen, dass diese für den Laien möglichst kostengünstig sein sollen. Mitunter ist diese
- 5 Tatsache auch der Grund dafür, dass das Energieausweisvorlagegesetz in der aktuellen Fassung entstanden ist. Ohne
- 6 dass Leistungen bezahlt werden, gibt es auch keine Leistungen in der freien Marktwirtschaft. Das heißt, die erste
- 7 Anforderung an ein Modell, das bestehen möchte, sind die Kosten, die im Wesentlichen vom Entwicklungsaufwand,

1 vom Eingabeaufwand und, bei komplexen Modellen, der Rechenzeit abhängen. Der zweite Faktor wurde indirekt  
 2 zuvor erwähnt, dabei handelt sich um die universale Einsetzbarkeit. Aus technischer und wissenschaftlicher Sicht  
 3 wird ein möglichst reales Modell gefordert, welches den vorliegenden Sachverhalt abbildet.

4 Zur gesamtheitlichen Modellierung von Gebäuden gibt es gemäß Darstellung 5-2 Bauteile, die man  
 5 berücksichtigen muss und die im Wesentlichen die gesamte Gebäudeausrüstung und alle Bauteile widerspiegeln.  
 6 Auf der einen Seite stehen die Randbedingungen, wie zum Beispiel Sonneneinstrahlung, Außentemperatur,  
 7 Materialkennwerte oder das Klima, auf der anderen Seite stehen die Übergangsbedingungen, wie das  
 8 Bauteilverhalten oder das Verhalten von einzelnen Simulationsblöcken, die technische Sachverhalte beschreiben.

9 Modelle, mit begleitenden Untersuchungen der gebauten Bauwerke, mit Rückführung der Messergebnisse,  
 10 erzielen den höchsten Genauigkeitsgrad, da eine Rückführung der Messwerte eine reale Genauigkeit liefert. Mit  
 11 zunehmenden Versuchsreihen können die Modelle immer präziser definiert werden. In Abbildung 3-8 kann man die  
 12 Entwicklungskurve von unterschiedlichen Photovoltaik-Technologien beobachten, dies ist in ähnlicher Form auf  
 13 Berechnungsmodelle und Simulationsmodelle anzuwenden. Grundsätzlich gibt es immer viele Wege, um ein Problem  
 14 zu lösen, dabei sind manche mehr und manche weniger günstig. Mit Erfahrungswerten allerdings findet man meist  
 15 die Lösung, die am besten geeignet ist und robust funktioniert.

16 Zu Beginn einer Technologie ist der Erkenntniszuwachs sehr hoch und Optimierungen können einfach  
 17 durchgeführt werden. Im Anschluss klingt die Steigerung des Erkenntniszuwachses ab und konvergiert gegen einen  
 18 Endwert. Oft sind naturwissenschaftliche Grenzen für thermodynamische Probleme schwer zu bestimmen, da den  
 19 Leistungsgrenzen, vor allem in der Festkörpermechanik, komplexe Herleitungen zugrunde liegen. Die vereinfachten  
 20 verwendeten Modelle sind so ausgelegt, dass eine Berechnung mit geringem Aufwand möglich ist, somit ist auch klar,  
 21 dass die Lösung bereits durch eine Näherung abgebildet wird und diese keine exakte Aussage zu technologischen  
 22 Grenzen geben kann.



23 **Abbildung 5-3: Einflussgrößen auf Berechnungsmodelle**

24 Ein Beispiel dazu ist der Wirkungsgrad eines Solarkollektors. Zunächst fällt die Sonnenstrahlung auf die Erde ein  
 25 und bereits in der Atmosphäre sorgen unterschiedliche Prozesse für die Brechung und Reflexion des Lichtes und somit  
 26 auch des Energiestromes. Am Boden angekommen, wird die Strahlung nochmals reflektiert, der Reflexionsanteil wird  
 27 mit einem Prozentsatz Albedo stochastisch in alle Richtungen reflektiert, das heißt, es gibt einen direkten  
 28 Strahlungsanteil und einen diffusen Strahlungsanteil, die auf den Solarkollektor einfallen. Der Einfall beider  
 29 Strahlungsanteile trifft auf die Deckscheibe des Solarkollektors, hier wird die Strahlung gebündelt, eine allgemein  
 30 Aussage zur spektralen Verteilung ist nur auf stochastischer Basis möglich, da die Umgebung um ein Haus sehr

1 unterschiedlich aussehen kann und zeitlicher Veränderung unterworfen ist. Bei der Berechnung müssen Aussagen  
2 getroffen werden und diese können gerade bei solchen Problemstellungen nur mit vereinfachten Annahmen  
3 geschätzt werden.

4 Außer dem oben genannten Beispiel kann eine Reihe an weiteren Lösungsansätzen nur als Näherungslösung  
5 betrachtet werden. Im Bereich der Anwendung muss man die Lösungsmodelle genau kennen, um auch die  
6 Leistungsgrenzen dieser zu verstehen. Außerdem muss auch auf die Dateneingabe und Funktionsweise des Modells  
7 geachtet werden. Letzten Endes liegt das Vorgehen am planenden Ingenieur, der auch die Haftung und  
8 Gewährleistung für die korrekte Berechnung trägt, demzufolge ist ein Überblick und eine Zuordnung des Problems  
9 im ersten Schritt wichtig.

10 In Abbildung 5-3 sind die wesentlichen Einflussgrößen an Berechnungsmodelle und Programme gegeben. Bei der  
11 Entwicklung von Modellen muss der Fokus stark auf die problemorientierte Lösung gelegt werden. Eine der drei  
12 Einflussgrößen zu verändern, hat direkte Auswirkungen auf die anderen zwei. Folgende Eigenschaften haben  
13 Auswirkung auf die Komplexität der mathematischen Berechnung und somit auf die Rechenzeit:

- 14 • Bei der Beschreibung eines Sachverhaltens kann zwischen analytischen Lösungen oder  
15 Näherungsmodellen mit numerischen Lösungen gewählt werden. Analytische Modelle haben den  
16 Vorteil, dass die Lösung exakt ermittelt werden kann, dagegen sind numerische Lösungen bei der  
17 Berechnung nicht so stabil und können divergieren. Allerdings ist bei komplexen Problemen oft keine  
18 analytische Lösung möglich und es müssen numerische Lösungswege gesucht werden, die in  
19 Teilabschnitten analytisch berechnet werden können. Zur Vermeidung der Fehlerfortpflanzung muss  
20 man Konvergenzkriterien bestimmen und einhalten, bei den verwendeten Lösungsverfahren hat die  
21 Fehlertoleranz hohen Einfluss auf die Rechenzeit [46].
- 22 • Die Ordnung der Differentialgleichung hat linearen Einfluss auf die Rechenzeit. Differentialgleichungen  
23 höherer Ordnung werden zum Lösen über die Matrixschreibweise in gewöhnliche  
24 Differentialgleichungen erster Ordnung zurückgeführt, somit muss nur mehr eine Matrix invertiert  
25 werden.
- 26 • Die Verkettung der Problemstellung entspricht einer Verkettung von Differentialgleichungssystemen,  
27 dies führt zu einer zusätzlichen Vergrößerung der Matrix, welche zur Lösung des Problems invertiert  
28 werden muss. Im Wesentlichen wird die Rechenzeit bei der numerischen Lösung zum Invertieren einer  
29 Matrix aufgewendet und diese steigt mit der Größe zum Quadrat [46]. Bei dünn besiedelten Matrizen  
30 kann durch vorhergehender Diagonalisierung zusätzlich Rechenzeit gespart werden. Mit Hilfe eines  
31 Petri-Netzes, wie in Simulink verwendet, kann man die Problemstellung auf übersichtliche Weise  
32 grafisch verknüpfen. In der Automobilindustrie ist die Anwendung von Simulink weit verbreitet, da  
33 Bauteile einfach verkettet werden können und einzelne Bauteile, wie Ersatzteile, ohne langwierige  
34 Suche nach Größen in das Modell integriert werden können. Außerdem können Bauteile vorweg mithilfe  
35 gesonderten Testläufen geprüft werden, bevor diese in ein Gesamtmodell eingebaut werden.
- 36 • Die Simulationsschrittweite gibt praktisch an, wie oft das Differentialgleichungssystem gelöst werden  
37 muss (häufig verwendete Schrittweiten: Minuten für Detailsimulationen mit haustechnischen Anlagen,  
38 Stunden für Gebäudemodelle ohne Haustechnik mit Wetterdaten, Monate für den Energieausweis). Je  
39 öfter ein Gleichungssystem gelöst werden muss, desto höher ist der Rechenaufwand.

40 Nachfolgend werden Modelle mit unterschiedlichen Genauigkeitsgraden vorgestellt. Ein Teil der Modelle ist  
41 bereits in Normen erfasst und entspricht dem Stand der Technik, der zweite Teil ist auf Basis bisheriger  
42 Forschungsarbeiten entstanden (Stand des Wissens) und ein Teil, vor allem zur saisonalen Speicherung von Energie,  
43 wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Die zu Grunde liegenden Forschungsmodelle sind im Rahmen der  
44 Rechenkernentwicklung validiert worden [24], aus diesem Grund wurde keinen genaueren Studien in diese Richtung  
45 durchgeführt.

### 5.1.2. Monatsbilanzverfahren gemäß Energieausweis

1 Bei der statischen Berechnung der Wärmeleitung wird die Energiemenge berechnet, die bei einer  
 2 Temperaturdifferenz von einem Kelvin zwischen Innen- und Außentemperatur, durch die Gebäudehülle geleitet wird.  
 3 Durch die ÖNorm B 8110-5 [47] werden 20°C Innenraumtemperatur und standortbezogene Außentemperaturen  
 4 angegeben. Die Ermittlung des Heizwärmebedarfes erfolgt nach ÖNorm B 8110-6 [48], dadurch kann die  
 5 Energiemenge berechnet werden, die durch die Gebäudehülle und durch Lüften entweichen. Bei der Gebäudehülle  
 6 wird zwischen den Fenstern, den Außenwänden (erdanliegend oder luftanliegend), der Fundamentplatte und dem  
 7 Dach unterschieden. Die solaren Gewinne werden abhängig von der Verschattung der Fenster ermittelt, dagegen  
 8 werden die inneren Gewinne durch Haustechnik und Bewohnung (Stromverbrauch+ Wärmeabgabe durch Personen),  
 9 abgeschätzt. In ÖNorm B 8110-6 [48] wird nur der Heizwärmebedarf vom Bauwerk behandelt, aus diesem Grund wird  
 10 der jährlicher Endenergiebedarf gemäß OIB-Leitfaden „energietechnisches Verhalten von Einfamilienhäusern“, [49]  
 11 auf Basis der ÖNorm H 5056 [50], ermittelt und die restlichen Anteile entfallen gem. Gleichung (5-55).

12 Die Genauigkeit der Eingabedaten dient als Grundlage und hat direkten Einfluss auf die Ergebnisse. Es liegt auf  
 13 der Hand, dass der Energieausweis die Absicht hat, Gebäude unter genormten Bedingungen zu bewerten, da  
 14 ansonsten kein Vergleich möglich wäre. Durch das tatsächliche Benutzerverhalten entstehen Abweichungen, die in  
 15 dieser Berechnung keinen Platz finden können. Die Kohlendioxidemissionen können, abhängig vom Energieträger,  
 16 mit Konversionsfaktoren berechnet werden, die Bestimmung dieser ist von vielen Faktoren abhängig und in Kapitel  
 17 5.3 kurz zusammengefasst.

$$Q_{EEB} = Q_{HEB} + Q_{KEB} + Q_{BFEB} + Q_{QLFEB} + Q_{LENI} \quad (5-55)$$

18 Mit:

$Q_{HEB}$  Jährlicher Heizenergiebedarf gemäß ÖNorm H 5056 [50] kWh/a

$Q_{KEB}$  Jährlicher Kühlenergiebedarf gemäß ÖNorm H 5058 [51] (nur bei Nicht – Wohngebäuden) kWh/a

$Q_{BFEB}$  Jährlichen Energiebedarf für die Befeuchtung gemäß ÖNorm H 5058 [51]  
(nur bei Nicht – Wohngebäuden) kWh/a

$Q_{LFEB}$  Jährlicher Energiebedarf für mechanischer Luftförderung gemäß ÖNorm H 5058 [51]  
(nur bei Nicht – Wohngebäuden) kWh/a

$Q_{LENI}$  Jährlicher Energiebedarf für Beleuchtung gemäß ÖNorm H 5058 [51]  
(nur bei Nicht – Wohngebäuden) kWh/a

19 Gemäß Gleichung (5-55) entfallen für Nicht- Wohngebäude die vier rechten Terme und der Endenergiebedarf  
 20 gemäß OIB- Leitfaden entspricht dem Heizenergiebedarf gemäß ÖNorm H 5056 [50]:

$$Q_{HEB} = Q_l \cdot f_H + Q_{tw} + Q_H + Q_{TW} + Q_{LH} - Q_{Sol,N} - Q_{Umw,WP,H} - Q_{Umw,WP,TW} + Q_{ges,HE} - \eta_{HT} \cdot (Q_g \cdot f_H) \quad (5-56)$$

$$+ Q_{H,beh} + Q_{TW,beh} + Q_{Sol,beh} + Q_{LH,beh} = Q_{HEB,H} + Q_{HEB,TW} + Q_{ges,HE}$$

21 mit:

$Q_{HEB}$  monatlicher Heizenergiebedarf kWh/M

$Q_l$  monatliche Wärmeverluste gemäß ÖNorm B8110 – 6 [48] kWh/M

$f_H$  Anteil der monatlichen Heiztage, bezogen auf die Monatstage

$Q_{tw}$  monatlicher Warmwasser – Wärmebedarf kWh/M

$Q_H$  monatliche Verluste der Raumheizung kWh

$Q_{TW}$	<i>monatliche Verluste der Warmwasserbereitung kWh/M</i>
$Q_{LH}$	<i>monatliche Verluste der Luftheizung kWh/M</i>
$Q_{Sol,N}$	<i>monatlicher Netto – Wärmeertrag des Solarkollektors kWh/M</i>
$Q_{Umw,WP,H}$	<i>monatlicher Netto – Wärmeertrag der Wärmepumpe für Raumheizung aus Umweltwärme kWh/M</i>
$Q_{Umw,WP,H}$	<i>monatlicher Netto – Wärmeertrag der Wärmepumpe für Warmwasser aus Umweltwärme kWh/M</i>
$Q_{ges,HE}$	<i>gesamter monatlicher Hilfsenergiebedarf kWh/M</i>
$\eta_{HT}$	<i>monatlicher Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne</i>
$Q_g$	<i>monatliche Wärmegewinne gemäß ÖNORM B 8110 – 6 [48] kWh/M</i>
$Q_{H,beh}$	<i>zurückgewinnbare monatliche Verluste der Raumheizung kWh/M</i>
$Q_{TW,beh}$	<i>zurückgewinnbare monatliche Wärmeverluste für Warmwasser in beheizten Räumen kWh/M</i>
$Q_{Sol,beh}$	<i>zurückgewinnbare monatliche Verluste der Rohrleitung zwischen Solarkollektor und Speicher kWh/M</i>
$Q_{LH,beh}$	<i>zurückgewinnbare monatliche Wärmeverluste der Luftheizung kWh/M</i>
$Q_{HEB,H}$	<i>monatlicher Heizenergiebedarf für Raumheizung ohne Hilfsenergie kWh/M</i>
$Q_{HEB,TW}$	<i>monatlicher Heizenergiebedarf für Warmwasser kWh/M</i>

1 Zusammenfassend ist die Berechnung für den Energieausweis eine schnelle Berechnungsvariante, in der einige  
 2 Parameter aus Normen definiert sind. Der Heizenergiebedarf wird monatlich bilanziert und die Summe des  
 3 monatlichen Heizenergiebedarfes ergibt den jährlichen Heizenergiebedarf, dabei sind die solaren Gewinne aus  
 4 tabellierten monatlichen Mittelwerten entnommen. Für Bauteile, die unter der Geländeunterkante liegen, werden  
 5 Abminderungsfaktoren verwendet, die auf den Leitwert der einzelnen Bauteile angewendet werden. Die Heiztechnik  
 6 wird in der Berechnung nur grob erfasst, Aussagen über die Effizienz der Haustechnik sind nicht möglich. In Tabelle  
 7 5-8 sind die wesentlichen Eckdaten der Berechnungsmethode gesammelt beschreiben.

**Tabelle 5-8: Einteilung des Monatsbilanzverfahrens gemäß gesetzlichen Rahmenbestimmungen**

<b>Modelbasis:</b>	<b>Berechnung:</b>	<b>Verwendung:</b>
Energieausweisvorlagegesetz, Landesgesetze, Leitfaden der OIB-Richtlinie, ÖNorm B 8110, ÖNorm H 5056	Rechenschritt: Monatlich, ohne Berücksichtigung der Speichermasse, Bilanzierung gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik	Energieausweis zur Baueinreichung, Verkauf und Vermietung
<b>Flexibilität:</b>	<b>Genauigkeit:</b>	<b>Kosten:</b>
Niedrig, da viele Vorgaben gegeben sind	Niedrig, die Vorgaben der Norm können zum realen Benutzerverhalten abweichen	Niedrig, viele Softwareanbieter und Energieausweisersteller vorhanden

8 Derzeit sind am Markt viele Programme zur Erstellung des Energieausweises vorhanden. Nachfolgend ist eine  
 9 kleine Liste mit den derzeit gängigsten Berechnungsprogrammen, außer diesen gibt es aber noch einige andere.

- 10 • GEQ- Zehentmayer Software GmbH
- 11 • Ecotech, BuildDesk Österreich Gesellschaft m.b.H. & Co.KG
- 12 • ArchiPHYIK, A-NULL Development GmbH, Wien
- 13 • Gebäudeprofi, ETU GmbH



Mittlerweile werden Plusenergiehäuser gebaut, diese bilanzieren über das Jahr gesehen positiv. Der Nachteil ist, dass der Energieertrag vor allem in den Sommermonaten, wo bereits ein Energieüberschuss vorhanden ist, die meiste Energie gewonnen wird. Vor allem ist die sommerliche Überwärmung ein Thema, das zunehmend berücksichtigt werden muss.

Die ÖNorm H 5058 [51] teilt die Arten der Kühlung in Nur- Luft- Anlagen, Luft- Wasser- Anlagen, Flächenkühlung, Kombisysteme und passive Kühlsysteme. Oft werden Klimaanlage verwendet, die die Raumluft über eine Inneneinheit abkühlen und die Energie über eine Außeneinheit abführen, diese Art der Kühlung ist jedoch eine der energieintensivsten. Passive Kühlsysteme funktionieren ohne zwischengeschaltete Kältemaschinen, aus diesem Grund wird nur Energie für eine Umwälzpumpe benötigt, allerdings sind große Verteilungssysteme erforderlich, die zum Beispiel durch Betonkernaktivierung in Gebäuden vorhanden sind. Die ÖNorm nennt folgende Möglichkeiten:

- Kühltürme (Verdunstungskühler)
- Kaltwasserkühlung (z.B. mit Brunnenwasser)
- freie Kühlung über ein Erdreichregister

Im Gegensatz zur elektrischen Energie, gibt es in den seltensten Fällen Abnehmer für Wärmeenergie im Niedertemperaturbereich, die zum Beispiel durch Betonkernaktivierung abgeführt werden. Kühlsysteme sind dementsprechend lokal begrenzt. Wie bereits erwähnt, ist der Energieertrag bei den erneuerbaren Energien durch Sonnenstrahlung zeitlich versetzt zum Energiebedarf. Bei der Einspeisung von erneuerbarer Energie in das Netz des Energieversorgungsunternehmers (kurz: EVU), wird nicht einmal 1/3 des Einkaufspreises bezahlt, da das Netz in erster Linie nicht für die Einspeisung von Energie ausgelegt ist und der Energieertrag nicht stetig berücksichtigt werden kann.

### 5.1.3. Stündliche Bilanzierung mit halb synthetischen Klimadaten in Anlehnung an ÖNorm H 5056

Auf Basis der ÖNorm H 5056 ist der Endenergiebedarf mit dem Heizenergiebedarf gleichgesetzt. Unter Berücksichtigung von halb synthetischen Klimadaten (kurz: HSK-Daten) [47], kann die Berechnungen auf eine stündliche Basis umgelegt werden, somit wird die Berechnung nicht monatlich, sondern stündlich durchgeführt.

Gemäß Vorgabe der Norm, ist in Abhängigkeit der Bauweise zur Bilanzierung, ein Ausnutzungsgrad für die Wärmegewinne im Monatsbilanzverfahren zu verwenden. Dieser Korrekturfaktor kann allerdings bei der stündlichen Bilanzierung nicht angewendet werden, da das Ergebnis verfälscht werden würde. Zur besseren Beschreibung des Problems wurde der Heizwärmebedarf und der Heizenergiebedarf mit dem Monatsbilanzverfahren und der stündlichen Bilanzierung mit HSK-Daten an einem gebauten Objekt ermittelt. Die bautechnischen Eckdaten sind im Anhang B- Referenzobjekt), beschrieben.

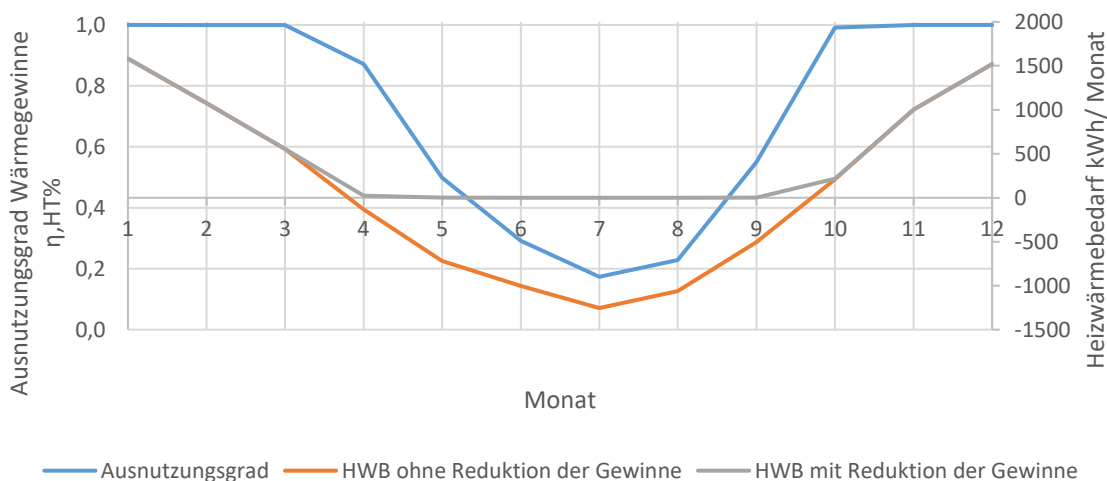


Abbildung 5-4: Wirkungsgrad für Wärmegewinne und deren Einfluss auf den Heizwärmebedarf

1 Der jährliche Heizwärmebedarf des Referenzgebäudes liegt bei 5.978 kWh mit Reduktion des Wirkungsgrades und  
 2 ohne Reduktion des Wirkungsgrades bei 5.945 kWh. Das entspricht einer Abweichung von einem halben Prozent, bei  
 3 dem der Heizwärmebedarf unterschätzt wird.

4 Zur Veranschaulichung und Abschätzung des Energieüberflusses und -bedarfes wurde im Rahmen dieser Arbeit  
 5 ein gleitender Mittelwert über die Energiebilanz erstellt. Der gleitende Mittelwert muss ein ganzzahliges Vielfaches  
 6 von einem Tag (24 Stunden) sein, um eine optimale Glättung der Kurve zu erhalten. Im dargestellten Modell ist keine  
 7 Speichermasse vorhanden, die die schnelle Erhitzung unterbindet und die damit verbundene Wärmeleitung zeitlich  
 8 verzögert. Zur Berechnung der zeitlichen Verzögerung ist die Speichermasse des Bauwerks interessant. In Tabelle  
 9 B.1 ist die Wärmespeicherkapazität des Bauwerks grob berechnet, diese beträgt rund 75 kWh/K für langzeitige  
 10 Erwärmungsprozesse. Zur Erwärmung des Gebäudes von 22°C auf 27°C müssten also 5°C Temperaturspreizung  
 11 überwunden werden, dabei nehmen die Bauteile 375 kWh Energie auf, das entspricht den solaren Gewinne über die  
 12 Fenster, ohne Verschattung, im Monat Juli auf der Südostseite (vergleich Abbildung B.2). Im gesamten Juli fallen  
 13 über 1.270 kWh an Sonnenstrahlung über die Fenster ein. Im täglichen Durchschnitt sind das rund 43 kWh/Tag, somit  
 14 kann die Änderungen der Bauwerkstemperatur in 2 Tagen bei ungefähr 1°C liegen. Tatsächlich wird die operative  
 15 Raumtemperatur höher liegen, da die Sonnenenergie in den Raum einfällt und nach einiger Zeit, wenn eine  
 16 ausgeprägte Temperaturgradienten vorhanden ist, in die Speichermasse der Bauteile strömt. Bis dorthin sind nur die  
 17 Speichermassen der obersten Bauteilschichten von Bedeutung.

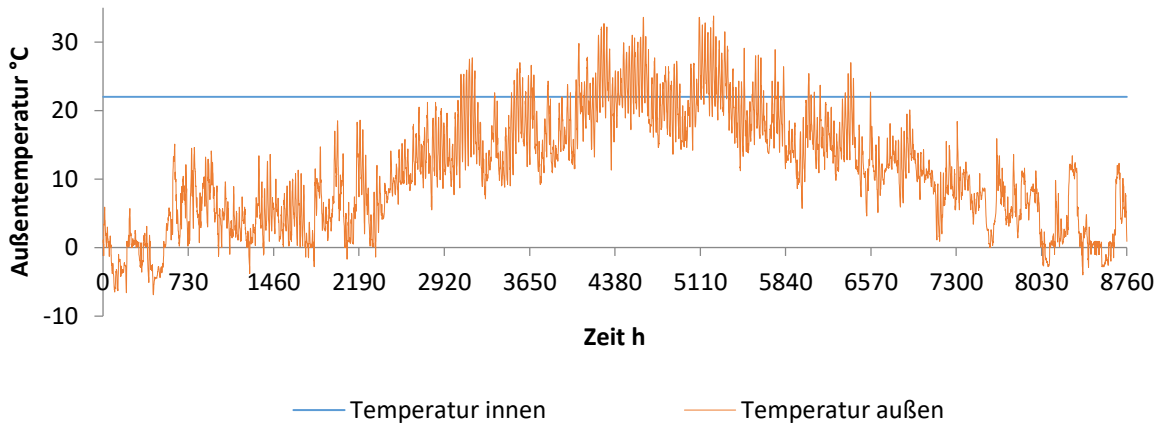


Abbildung 5-5: Temperaturverlauf der HSK-Daten am Standort Wien Schwechat

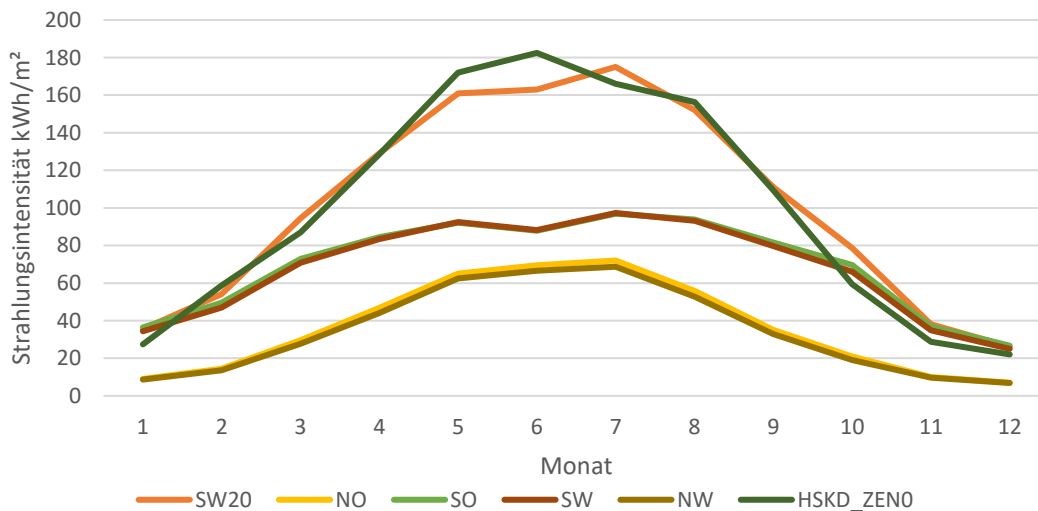
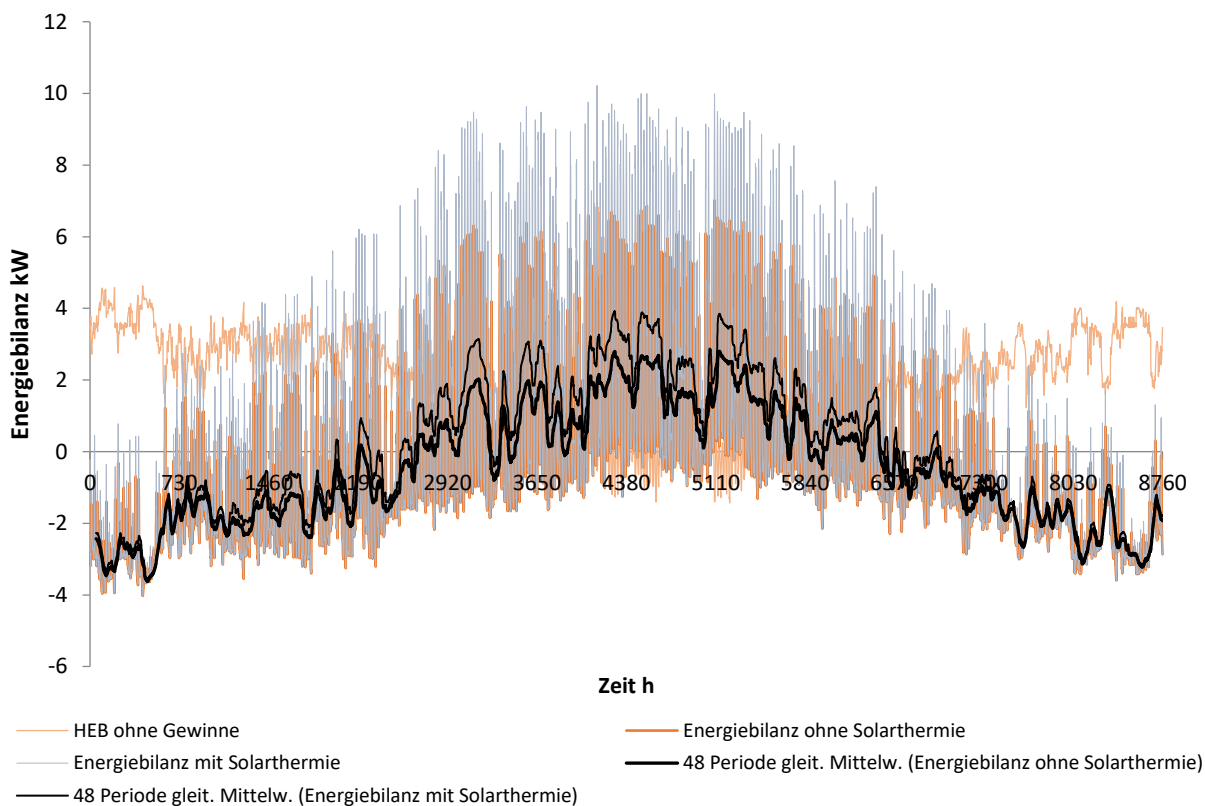


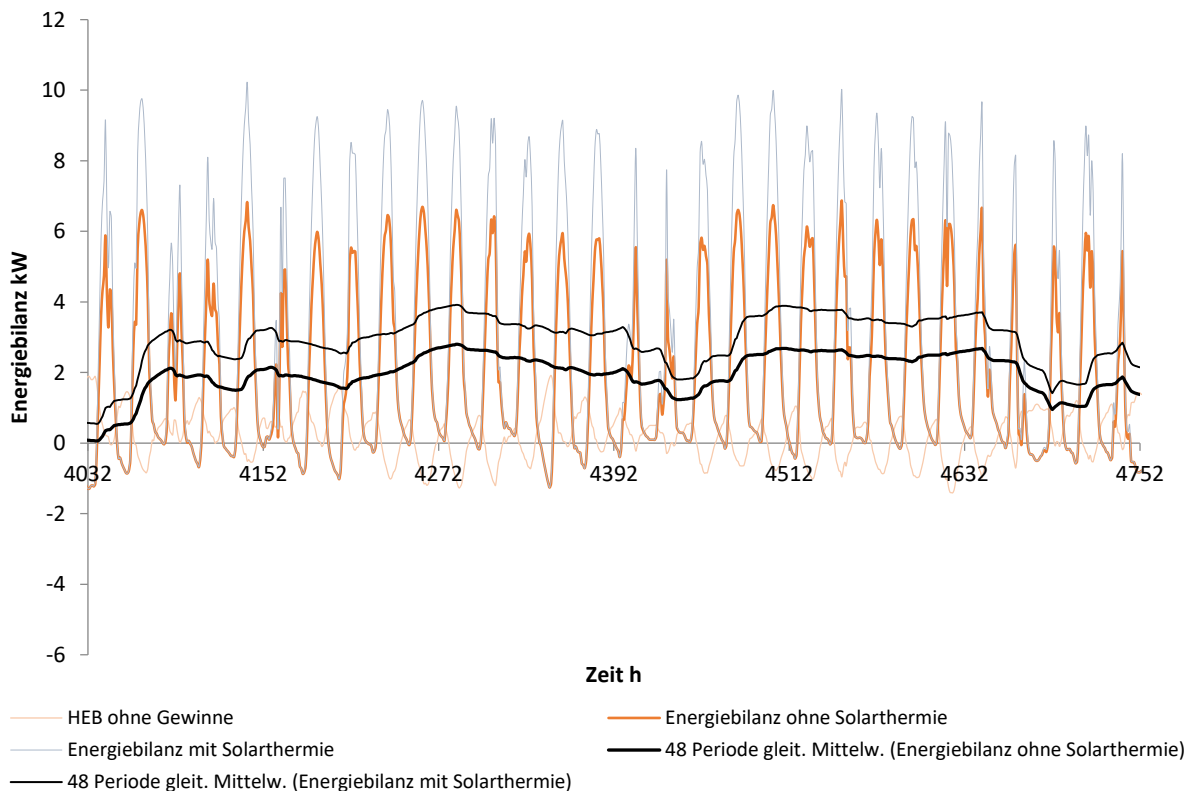
Abbildung 5-6: Monatliche Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Orientierung, gem. ÖNorm 8110-5 [47] und den verwendeten HSK-Daten [24]

18 Als Eingangswerte wurden für die Strahlungsintensität (siehe Abbildung 2-2) und die Außentemperatur 5-5 HSK-  
 19 Daten vom Standort Schwechat verwendet. Als weitere Grundlagen des Gebäudemodells werden die gleichen

- 1 Parameter verwendet, die auch in der Norm gegeben sind. Die Speichermassen, die für die zeitliche Verschiebung
- 2 verantwortlich sind, werden hier nicht berücksichtigt. Ohne die Berücksichtigung von Speichermassen kann jedoch
- 3 die Wärmespeicherkapazität von Räumen nicht ermittelt werden und in weiterer Folge kann auch die operative
- 4 Raumtemperatur nicht bestimmt werden.



**Abbildung 5-7: Stündliche Energiebilanz auf Basis von HSK-Daten in Anlehnung an ÖNorm H 5056**



**Abbildung 5-8: Stündliche Energiebilanz auf Basis von HSK-Daten- Ausschnitt Hochsommer (Juni und Juli)**

1 Im Vergleich zu den HSK-Daten, sind die Daten für den Energieausweis bereits aufsummiert. In Abbildung 5-6  
 2 sieht man die monatlichen Strahlungsintensitäten für unterschiedliche Orientierungen. In dieser Grafik ist auch die  
 3 Strahlungsintensität der HSK-Daten monatlich aufsummiert. Aus diesen kumulierten Werten kann man keine  
 4 Schlussfolgerungen für eine detaillierte Berechnung ziehen, jedoch sind ein paar Informationen zum besseren  
 5 Verständnis ableitbar.

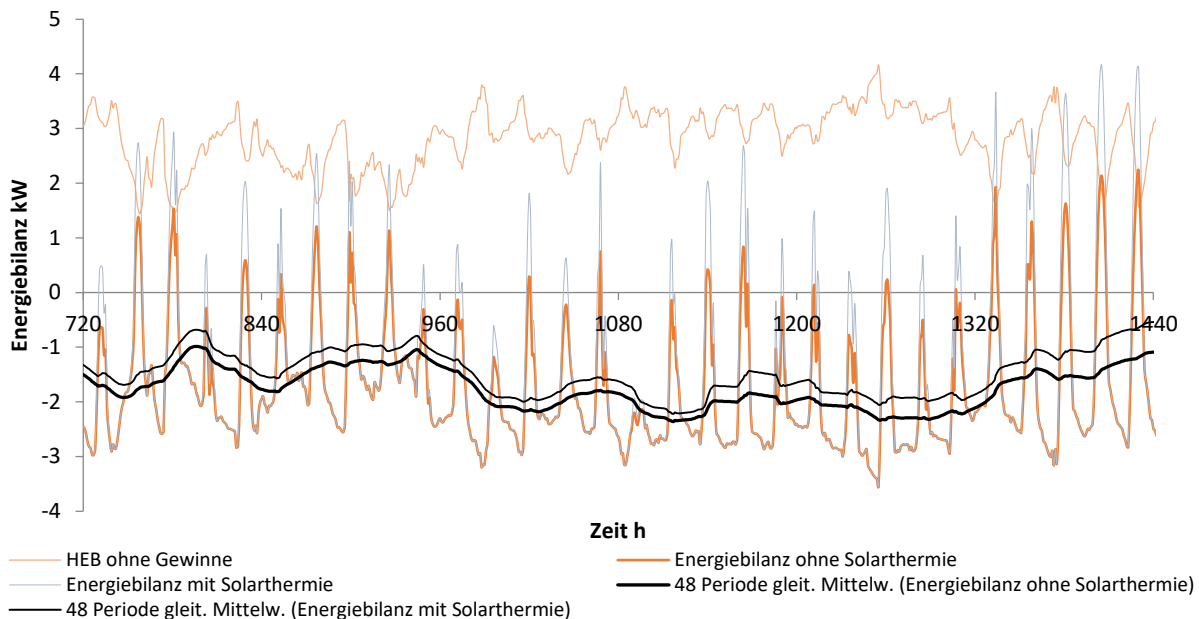


Abbildung 5-9: Stündliche Energiebilanz auf Basis von HSK-Daten- Ausschnitt Winter (Februar)

6 Der größte Anteil der Sonnenenergie kommt ziemlich genau aus Süden. Im Winter wird die größte Menge an  
 7 Sonnenenergie bei einem Azimutwinkel von 50-70° gewonnen. Beide Schlussfolgerungen kann man mit einer  
 8 Sinuswelle erklären, wobei bei beiden Gegebenheiten zwei Werte bekannt sind. Bei einem Maximum würde sich ein  
 9 Wert vom anderen abheben, jedoch ist die Sonnenstrahlung aus Südosten so hoch wie aus Südwesten und gleiches  
 10 gilt für die Sonnenstrahlung aus Nordosten und Nordwesten. Somit besteht ein Wert, der zwischen Nordosten und  
 11 Nordwesten liegt und da die Annäherung von beiden Richtungen gleichmäßig ist, liegt das Maximum in der Mitte.  
 12 Ähnlich verhält sich die Strahlungsintensität im Winter. Bei einem Azimutwinkel von 90° Richtung Südwesten, wird  
 13 eine ähnliche Intensität gemessen, wie bei einer Neigung des Azimutwinkels von 20°, somit liegt hier das Maximum  
 14 ebenfalls in der Mitte der gleichen Messungen. Eine ebene Fläche erwirtschaftet im Winter weniger Energie als eine  
 15 aufgestellte Fläche, die Richtung Süden gerichtet ist.

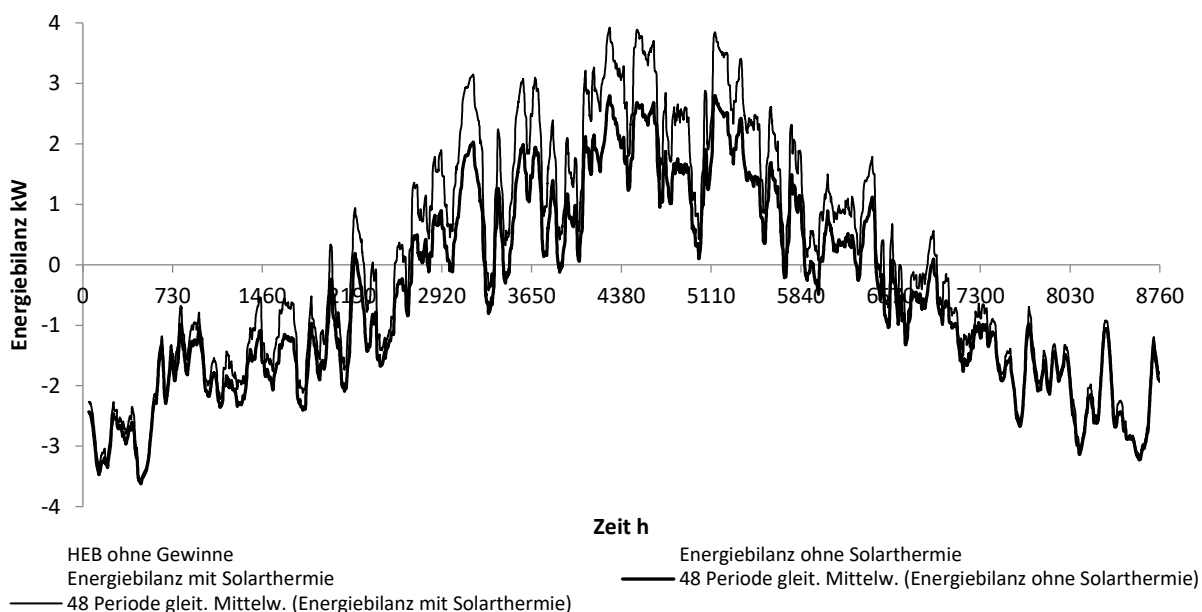
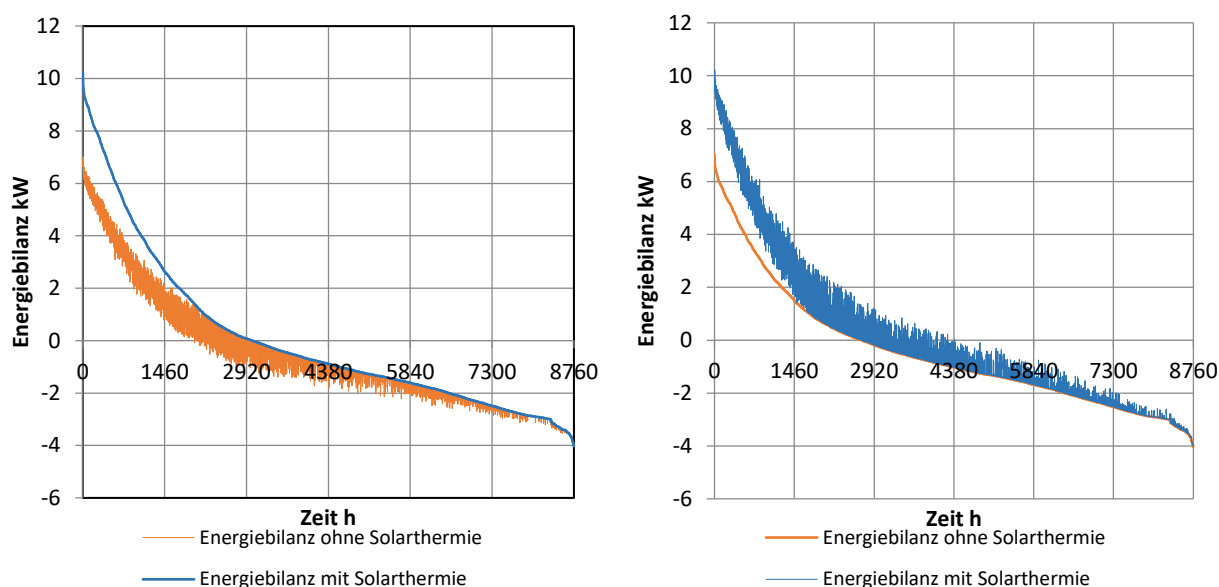


Abbildung 5-10: Auswirkung der Wärmegewinne und dessen Einfluss auf den Heizenergiebedarf

1 Abbildung 5-7, 5-8 und 5-9 zeigen die Summe der Energiebilanz auf Basis der Berechnung mit stündlichen  
 2 Klimadaten. In allen drei Grafiken ist der Heizenergiebedarf ohne Gewinne, die Energiebilanz ohne und mit  
 3 Solarthermie eingezeichnet. Zur besseren Veranschaulichung sind die Werte der Energiebilanz mit einem 48 Stunden  
 4 Mittelwerte geglättet, in Abbildung 5-10 sind die Mittelwerte herausgezeichnet.

5 Die Kernaussage ist, dass die Energie dann produziert wird, wenn sie nicht benötigt wird. Bei einer  
 6 Kollektorneigung von  $20^\circ$  ist mit gewöhnlichen Speichern an keine solare Heizung im Winter zu denken. Betrachtet  
 7 man die Strahlungsenergie der Sonnen in beliebiger Richtung als Majorante, so erkennt man, dass auch unter  
 8 günstigsten Verhältnissen nicht genügend Energie mit den Solarkollektoren von rund 10 Quadratmetern gesammelt  
 9 werden kann, um das Referenzobjekt zu beheizen. Der solare Ertrag der Solarkollektoren wurde global mit 40% der  
 10 einfallenden Strahlung angenommen.



**Abbildung 5-11: Energiebilanz der Größe nach geordnet, links ist die Ordnung nach der Energiebilanz mit Solarthermie erfolgt und rechts ist die Ordnung nach der Energiebilanz ohne Solarthermie ausgeführt worden**

11 Ordnet man die Werte aus Abbildung 5-10 der Größe nach, erhält man Abbildung 5-11, wobei im ersten Fall die  
 12 Werte nach der Energiebilanz mit Solargewinnen geordnet wurden. Im zweiten Fall wurden die Werte nach jener  
 13 ohne Solargewinne geordnet. Aus zweiterem ist ersichtlich, dass mit Sonnenenergie immer besser bilanziert wird,  
 14 als ohne Sonnenenergienutzung.

**Tabelle 5-9: Vergleich des HEB mit und ohne Solarkollektor**

	ohne Solarthermie	mit Solarthermie
positiv bilanzierende Stunden	2697 h	3021 h
Summe positiv bilanzierender Tage	6006 kWh	9788 kWh
Summe negativ bilanzierender Tage	-10305 kWh	-9774 kWh

15 In Tabelle 5-9 sind die Kurven der Abbildungen 5-11 zahlenmäßig zusammengefasst. Man erkennt, dass das  
 16 Gebäude trotz der relativ großen Solarkollektoren nur an 324 Stunden mehr positiv bilanziert, das entspricht 13,5  
 17 Tagen. In der Realität besteht aber eine Abweichung zu diesen Werten, da die Sonnenenergie nicht geordnet einfällt,  
 18 sondern aufgeteilt ist, sodass nach ein paar strahlungsreichen Tagen auch schwächere Tage, die nicht positiv  
 19 bilanzieren, versorgt werden können. In diesem Sinn ist die stündliche Bilanzierung ohne Speichermasse nicht  
 20 förderlich für die Genauigkeit der Berechnung, da auch Energieströme aufgezeichnet werden, die aufgrund der  
 21 Speichermasse real nicht vorhanden sind.

1 Der berechnete Heizenergiebedarf wurde anhand des Referenzobjekts auf Basis realer Messwerte der  
 2 Wärmepumpe der Größe nach verglichen. Gemäß Tabelle 5-10 wurden folgende Messwerte der Wärmepumpe  
 3 aufgezeichnet.

**Tabelle 5-10: Datenerfassung der Luft- Wasser Wärmepumpe und Aufzeichnung des Stromzählers mit Berechnung der Leistungszahl (COP) des Referenzobjektes**

Datum Ablesung:	08.01.2015	27.05.2015	20.03.2016	04.10.2016
Warmwasserenergie kWh:	563,7	1625,4	4873,0	5662,0
Abtauenergie kWh:	123,1	446,3	598,0	605,6
Heizenergie kWh:	3212,3	9253,3	12592,2	12948,5
Zusatzheizung mit 8 kW Heizstab h:	39 (312)	105 (840)	115 (920)	115 (920)
<b>Heizenergiebedarf</b>	<b>3964,9</b>	<b>11272,4</b>	<b>17787,2</b>	<b>18924,9</b>
Stromzähler 1 (Hochtarif):	493,5	2020,6	2407,3	2615,6
Stromzähler 2 (Niedertarif):	797,9	1350,5	3093,1	3200,6
<b>Summe Strom kWh</b>	<b>1291,4</b>	<b>3371,1</b>	<b>5500,4</b>	<b>5816,2</b>
<b>COP<sub>kumuliert</sub></b>	<b>3,07</b>	<b>3,34</b>	<b>3,23</b>	<b>3,25</b>

4 Aufgrund der Investitionskosten einer Tiefenbohrung, wurde eine Luft-Wasser Wärmepumpe der Fa. Ochsner  
 5 (GMLW 9+, Datenblatt siehe Anhang A) installiert, die einen Wärmemengenzähler besitzt und die Wärmemenge  
 6 automatisch misst. Die Wärmepumpe wurde am 11.11.2014 in Betrieb genommen und war bis Ende November mit  
 7 einem Ausheizprogramm belegt, der Regelheizbetrieb wurde ab 08.01.2015 aufgenommen.

**Tabelle 5-11: Einteilung des Stundenbilanzverfahrens auf Basis von HSK-Daten**

Modelbasis:	Berechnung:	Verwendung:
ÖNorm B 8110, ÖNorm H 5056	Rechenschritt: Stündlich, ohne Berücksichtigung der Speichermasse, Bilanzierung gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik	Berechnung des Heizenergiebedarfs
Flexibilität:	Genauigkeit:	Kosten:
Mittel, da projektbezogen individuelle Randbedingungen berücksichtigt werden können	Mittel, die Vorgaben der Norm können zum realen Benutzerverhalten abweichen aber auf Basis individueller Eingabewerte angepasst werden	Mittel: Der Eingabeaufwand ist höher als beim Energieaufwand

8 Der Baustellenbetrieb war bis 01.05.2015 aktiv, seitdem ist das Haus bewohnt und die Steuerung der  
 9 Solarkollektoren wurden am 27.05.2015 in Betrieb genommen. Neben der Solaranlage wird außerdem ein  
 10 Schwedenofen mit der Heizleistung von 4-8 kW betrieben. Im Winter 2015/16 wurde ein Kubikmeter  
 11 Fichtenbrennholz (1.419 kWh- Heizenergie, mit einem Wirkungsgrad von 80%; die Heizenergie beträgt somit effektiv  
 12 1.130 kWh) verwertet. Im ersten vollständigen Heizjahr wurden 6.515+1.419= 7.934 kWh an Heizenergie produziert.  
 13 Im Vergleich dazu sind fast alleine im Frühjahr 2015, 7.307 kWh, an Heizenergie produziert worden. 2015/16 war im  
 14 Vergleich zu 2014/15 milder, somit war auch der erforderliche Heizaufwand geringer. Zusammenfassend unterliegen  
 15 die Messwerte aufgrund der vorkommenden lokalen und globalen Wetterereignisse, einer statischen  
 16 Schwankungsbreite, die sich auf den Heizenergiebedarf auswirkt, wobei eine Schwankungsbreite mit ±30 Prozent  
 17 auf Basis der langjährigen Beobachtungen der Jahresmitteltemperatur, durchaus möglich (9.774+-2.932 kWh) ist.

1 Die Leistungszahl der Wärmepumpe im Referenzprojekt liegt im Durchschnitt nach knapp 2 Jahren Heizbetrieb bei  
2 3,25.

3 In Abbildung 5-10 ist das Haus mit dem Heizenergiebedarf dargestellt, einmal mit und einmal ohne Solarthermie.  
4 Der Ertrag der Solarkollektoren kann zur Warmwasserbereitung und Heizung genutzt werden, die überschüssige  
5 Energie, die im Gebäude während den Sommermonaten besteht, kann dabei nicht genutzt werden.

6 Die stündliche Berechnung ist gut für das schnelle Verständnis von der Einwirkung der Sonnenergie auf das Haus.  
7 In diesem Modell sind keine Speichermassen und haustechnischen Anlagen eingearbeitet, es bestehen außerdem  
8 Annahmungenauigkeiten, die entscheidenden Einfluss auf das reale Ergebnis haben. Vor allem bei der Ermittlung  
9 von Speicherständen und Erträgen von Solarthermie, müssen feinere Zeitabstände gewählt werden, deshalb müssen  
10 Detailsimulationen mit kürzeren Rechenschritten durchgeführt werden.

#### 5.1.4. Gebäudesimulationen mit Speichermassen

11 Mit vereinfachten Modellen wird die Speichermasse, wie bereits zuvor beschrieben, nicht berücksichtigt. Dadurch  
12 können keine Rückschlüsse auf die Raumtemperatur erfolgen und wenn genauere Sachverhalte in der örtlichen  
13 Ausbreitung dargestellt werden sollen, müssen mehr Variablen im System vorhanden sein. Für die Einbindung von  
14 Heizsystemen werden detaillierte Simulationsmodelle benötigt. Im Gegensatz zu den Rand- und  
15 Übergangsbedingungen des Gebäudes ist vor allem die Simulation von diesem besonders komplex, da durch die  
16 geringen Speichermassen und hohen Energiedichten, im Vergleich zu den thermischen Modellen der Gebäudehülle,  
17 viel kürzere Zeitschritte im Minuten- und Sekundenbereich erforderlich sind. Bei zu lange gewählten  
18 Simulationsschritten werden, trotz korrektem Berechnungsablauf, falsche Ergebnisse erzielt.

19 Viele kurze Zeitschritte bedeuten eine hohe Anzahl an Berechnungsschritten, wobei die Anzahl der  
20 Rechenschritte durch die Verfeinerungen um ein Vielfaches höher ist, als beim einfach gehaltenen Energieausweis.  
21 Betrachtet man die Wärmeleitgleichung, werden die genannten Aspekte für einen höheren Rechenaufwand deutlich.

$$\frac{\partial}{\partial t} u(\vec{x}, t) - a \Delta u(\vec{x}, t) = 0$$

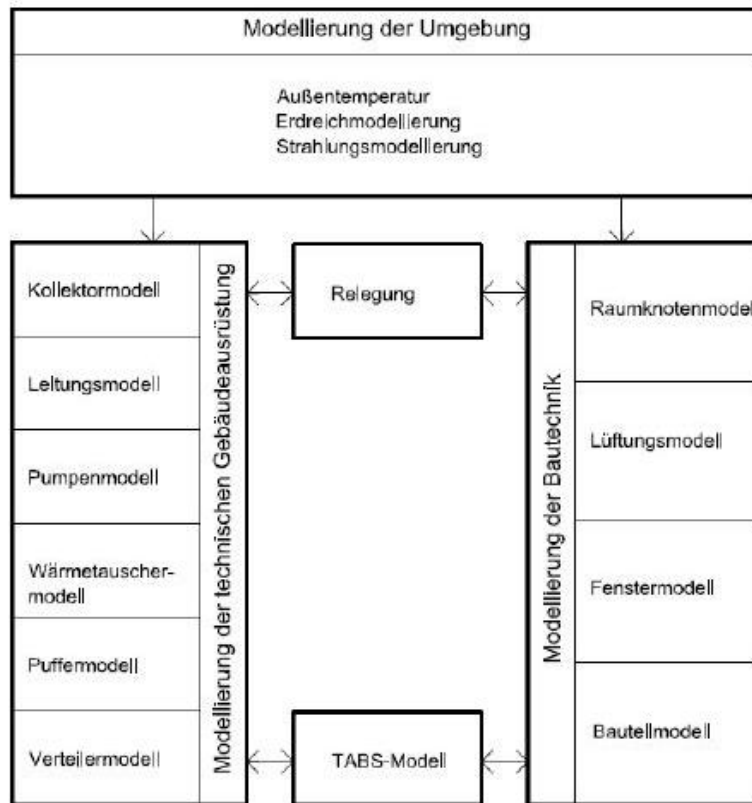
(5-57)

$$\frac{\partial u(\vec{x}, t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left( \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(y, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2} \right)$$

22 In Gleichung 5-57 ist die dreidimensionale Wärmeleitgleichung dargestellt. Die erste Zeile beschreibt die  
23 verkürzte Notation mit dem Laplace Operator und der Diffusivität, die zweiten Zeile beschreibt die Einflussfaktoren  
24 der Diffusivität und man erkennt, dass der Laplace- Operator einfach das Skalarprodukt der richtungsbezogenen  
25 Gradienten im dreidimensionalen Raum bildet. Die Kernaussage ist bei der homogenen Wärmeleitgleichung, dass die  
26 Veränderung mit der Zeit gleich der räumlichen Veränderung entspricht (vgl. erster Hauptsatz der Thermodynamik).

27 Bei den detaillierten Simulationen gibt es viele verschiedene Möglichkeiten, wie die Modelle konfiguriert sein  
28 können. In Abbildung 5-2 sind die Bauteile aufgelistet, die für detaillierte Modelle verwendet werden können. Sollen  
29 Optimierungen durchgeführt werden, muss zunächst überlegt werden, welcher Sachverhalt dargestellt werden soll  
30 und auf Basis dieser Überlegungen können in weiterer Folge maßgeschneiderte Lösungen entwickelt werden. Mit  
31 dem Rechenkern [24] wurde ein Programm entwickelt, mit dem ein ganzes Objekt im Detail simuliert werden kann.  
32 Bei diesem Projekt war das Ziel, ein Gebäude samt Haustechnik möglichst genau abzubilden, in Abbildung 5-12 ist  
33 das methodische Vorgehen des Rechenkernmodells aufgezeigt und man erkennt die Verknüpfungen, die im Modell  
34 mit einzelnen Rand- und Übergangsbedingungen dargestellt werden.

35 Das Rechenkernmodell gliedert sich in die Modellierung der Bautechnik und der Modellierung der technischen  
36 Gebäudeausrüstung. Diese beiden sind an zwei Schnittstellen miteinander verbunden: Einerseits über die thermisch  
37 aktivierten Bauteile, andererseits über die Regelung. Durch diese Wechselbeziehung wird das Modell äußerst  
38 komplex, was jedoch zur genauen Darstellung und präzisen Berechnung der realistischen Bedingungen essentiell ist.  
39 In einem Rechenschritt werden, im Zuge der Berechnung, einige Hundert Variablen ausgewertet, die wiederum als  
40 neue Eingangsgrößen für den nächsten Simulationsschritt dienen.



**Abbildung 5-12: Methodisches Vorgehen: Zusammenhang der einzelnen Komponenten in einer Anlagen- und Gebäudesimulation [24]**

1 Durch das Rechenkernmodell ist es also möglich, eine detaillierte Gebäudesimulation durchzuführen. Hierbei  
 2 werden alle Aspekte berücksichtigt, die zur dynamischen Simulation dienen, wie zum Beispiel der detaillierten  
 3 Abbildung der Energiebewegung im Gebäude oder der Wärmespeicherkapazität der einzelnen Bauteile. Im Bereich  
 4 der Bautechnik ist die Simulation mit kurzen Zeitschritten nicht erforderlich, um ein ausreichend aussagekräftiges  
 5 Ergebnis zu erhalten, vielmehr wird diese benötigt, um die Energiebewegung bei den haustechnischen Anlagen zu  
 6 verfolgen und zu prognostizieren.

7 In den thermisch aktivierten Bauteilen erfolgt der Energieeintrag direkt im Bauteil, auf Basis der  
 8 Entnahmetemperatur des Speichers und abhängig von der Oberflächentemperatur findet auch eine Energieabgabe  
 9 statt. Niedertemperatursysteme haben den Vorteil des Selbstregelungseffektes, zum Beispiel beträgt die  
 10 Vorlauftemperatur  $27^{\circ}\text{C}$  und die Temperatur im Raum beträgt  $22^{\circ}\text{C}$  und umso höher die Temperatur im Raum ist,  
 11 desto kleiner wird die Energieabgabe. Die Speichermasse der thermisch aktivierten Bauteile wirkt sich auf den  
 12 Verlauf der Energieabgabe aus, der zeitlich versetzt ist. Bei der thermischen Aktivierung von Bauteilen ist auch bei  
 13 Bauteilen eine Verkürzung der Rechenschritte erforderlich, da hier ein erhöhter Energietransport besteht.

14 Im Rechenkernmodell ist ein Ein-Kapazitäten-Speicher-Modell eingepflegt, das die Temperatur des Speichers  
 15 homogenisiert, wodurch die Nachbildung eines Schichtspeichers damit nicht möglich ist. Das hat den Nachteil, dass  
 16 auch keine kälteren oder wärmeren Schichten vorhanden sind. Vor allem die kälteren sind jedoch zur Nutzung der  
 17 Sonnenenergie von Interesse, weil bei einer kälteren Speicherenergie der Energieeintrag über die Solarkollektoren  
 18 größer ist.

19 Im Zuge der Dissertation [11] wurde der Einfluss von thermisch aktivierten Betondecken unter Verwendung  
 20 unterschiedlicher Regelungsstrategien auf Basis des Rechenkernmodells untersucht. Bei diesen Untersuchungen  
 21 stand die Nutzung der Gebäudespeichermasse im Fokus, da diese auch tatsächlich für die Speicherung und zeitlich  
 22 versetzte Abgabe berücksichtigt werden muss. Die Energieabgabe erfolgt durch großflächige, thermisch aktivierte  
 23 Bauteile (kurz: TAB).

24 Trotz der umfangreichen Anzahl an modellierten und validierten Bauteile, fehlen zur Modellierung von  
 25 Langzeitspeichern im Modell, Bauteile. Einerseits wird die Modellierung mit Tiefenbohrungen und mit großen



- 1 Wasserspeichern versucht. Zur Entnahme der Energie aus einer Tiefenbohrung wird eine Wärmepumpe benötigt, da  
 2 das Temperaturniveau in einem Bereich liegt, in dem es nicht genutzt werden kann. Aus diesem Grund muss zur  
 3 Einbindung der Tiefenbohrung ein Wärmepumpenmodell entwickelt werden.

Tabelle 5-12: Einteilung detaillierter Gebäudesimulationen

Modelbasis:	Berechnung:	Verwendung:
Diverse Normen	Rechenschritt: im Sekunden- bis Minutenbereich	Detaillierte Analyse des Bauteilverhaltens
Flexibilität:	Genauigkeit:	Kosten:
Hoch, da nachweisbezogen alle Bauteile und Randbedingungen berücksichtigt werden können	Hoch, da auf keine normgemäßen Vorgaben Rücksicht genommen werden muss	Hoch: Der Eingabeaufwand ist hoch, da jedes Modell individuell konfiguriert ist

### 5.1.5. Reduzierte Gebäudemodelle

- 4 Mithilfe der vereinfachten Simulation können die Energieflüsse im regionalen Rahmen dargestellt werden. Die  
 5 Einwirkung des Energiebedarfs auf das Energienetz kann mit dieser ebenfalls abgebildet werden. Diese  
 6 Abbildungsmöglichkeiten können dazu genutzt werden, eine intelligente Steuerung des Energienetzes zu entwickeln,  
 7 um verlustreiche Energietransporte zu minimieren. Diese Steuerungen werden in der Literatur auch als „Smart Grid“  
 8 bezeichnet. Ein mögliches Anwendungsbeispiel zur Nutzung eines Smart Grids ist die Einspeisung von regional  
 9 produzierter Alternativenergie in Tiefenbohrungen.

- 10 Die reduzierte Gebäudesimulation dient zur Beschleunigung der Simulation, vor allem bei alternativen  
 11 Energiesystemen, wie zum Beispiel der Nutzung von Windenergie. Hier ist es besonders wichtig, die Energie, die in  
 12 lokalen Spitzen zustande kommt, auf mehrere Haushalte aufzuteilen, da kurzzeitige Lastspitzen einen Überschuss  
 13 produzieren. Diese kurzzeitigen Energiespitzen sollen auf kurzem Weg in einen Speicher geleitet werden, um die  
 14 Netzverluste zu minimieren. Aus dieser Situation heraus ist es erforderlich, mehrere Gebäudemodelle gleichzeitig  
 15 zu simulieren, jedoch steigt der Rechenaufwand mit jedem weiteren Haushalt, der berechnet werden soll. Die, für  
 16 diese detaillierte Berechnung, erforderliche Simulationszeit, ist nicht mehr überschaubar und muss durch  
 17 vereinfachte Modelle abgebildet werden. Abgesehen davon gibt es haushaltsspezifische Bedarfsschwankungen, die  
 18 statistisch berücksichtigt werden können. Unterschiedliche Zugänge wurden bei der 13.Konferenz der IBPSA  
 19 (=International Building Performance Simulation Association) durch ein belgisches Forscherteam vorgestellt [14].

- 20 Zur vereinfachten Simulation werden Kenngrößen des Gebäudes zusammengefasst, zum Beispiel kann die  
 21 Gebäudehülle als einfacher Widerstand simuliert werden, der zwischen Außen- und Innentemperatur liegt. Aufgrund  
 22 der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen fließt ein Wärmestrom, in Anlehnung an das Ohm'sche Gesetz  
 23 kann dieser beschrieben werden durch Gleichung (5-58),

$$U = R \cdot I \rightarrow \Delta U = R \cdot \Delta I \rightarrow \Delta U = L_{Ges} \cdot \Delta T, \quad (5-58)$$

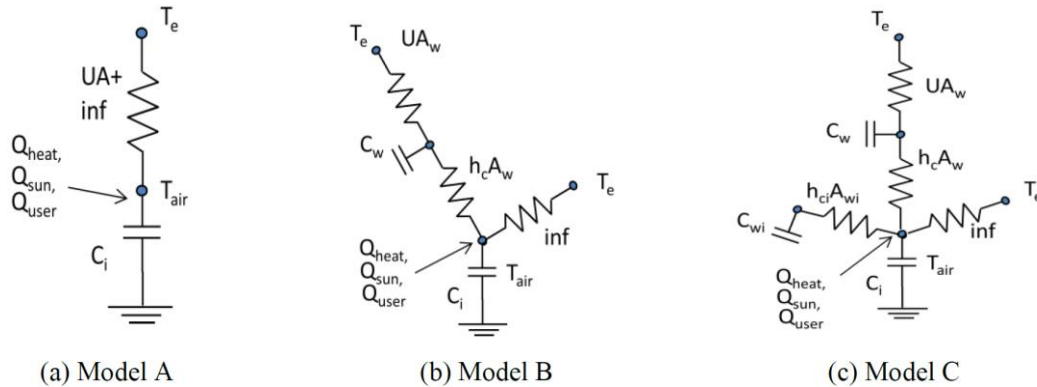
- 24 wobei ausschließlich der Wärmestrom dargestellt wird, somit ist  $\Delta U = \Delta Q$  und es folgt aus (5-58):

$$\Delta Q = L_{Ges} \cdot \Delta T, \quad (5-59)$$

- 25 Der Leitwert ist jene Wärmemenge, die durch einen Bauteil bei einem Kelvin Temperaturunterschied fließt.  
 26 Summiert man die Leitwerte aller Bauteile der Gebäudehülle, erhält man den Leitwert für das gesamte Haus. Bei  
 27 dieser Herangehensweise wird die Speicherkapazität nicht berücksichtigt. Man bilanziert über die Gebäudehülle,  
 28 ohne genau zu wissen wie die Energieverteilung im Gebäude verläuft.

$$L_{\text{Gebäudehülle}} = \sum_{i=1}^N L_i \quad (5-60)$$

- 1 Die gesamte thermische Hülle eines Gebäudes ist mit einer Konstanten abgebildet. Für weitere, vereinfachte  
 2 Modelle gibt [14] folgende Möglichkeiten zur Modellierung.



**Abbildung 5-13: Thermisches Netzwerk zur vereinfachten Gebäudesimulation, die zur Bewertung von Energieflüssen in Smart Grid-Systemen entwickelt wurde, von links nach rechts mit zunehmender Komplexität [14]**

- 3 Bei alle Modellen wirken die Randbedingungen aufgrund des Wärmeeintrages direkt auf die Raumtemperatur, die  
 4 mit einer zugehörigen Kapazität gekoppelt ist. Die Modelle unterscheiden sich im Wesentlichen durch eine  
 5 stufenweise Erweiterung der Wärmespeicherkapazitäten.

$T_{air}$	Operative Raumtemperatur °C
$T_e$	Temperatur außen °C
$C_i$	Innere Wärmespeicherkapazität oberflächennaher Schichten W/K
$UA$	Leitwert aller Bauteile der Gebäudehülle W/K
$inf$	Leitwert für den Infiltrationsluftwechsel W/K
$Q_{heat}$	Energieeintrag durch Heizen W
$Q_{sun}$	Energieeintrag durch solare Gewinne W
$Q_{user}$	Energieeintrag durch den Benutzer W
$h_c A_w$	Übergangswiderstand Luft zu Bauteil der Gebäudehülle W
$C_w$	Wärmespeicherkapazität der Bauteile der Gebäudehülle W/K
$U A_w$	Leitwert der Bauteile der Gebäudehülle separiert W/K
$h_{ci} A_{wi}$	Übergangswiderstand von Luft zu Innenbauteile W
$C_{wi}$	Wärmespeicherkapazität der Innenbauteile W/K

Tabelle 5-13: Einteilung reduzierter Gebäudemodelle

Modelbasis:	Berechnung:	Verwendung:
ÖNorm B 8110 und [14]	Rechenschritt: Variabel von einigen Sekunden bis stündlich möglich, mit Berücksichtigung der Speichermasse, Abbildung durch ein thermisches Netzwerk	Verwendung bei untergeordneten Bauteilen, die nicht Fokus des Nachweises sind.
Flexibilität:	Genauigkeit:	Kosten:
Hoch; reduzierte, vereinfachte Modelle können überall dort eingesetzt werden, wo keine detaillierten Ergebnisse erforderlich sind	Variiert je nachdem wie stark die Vereinfachung des Modelles ist	Hoch: reduzierte Gebäudemodelle werden für individuelle Aufgabenstellungen hergestellt, müssen validiert und geprüft werden

## 5.2. Berechnungsmodelle zur Simulation von saisonalen Speichern

1 Saisonale Speicher funktionieren durch den Energiezu- und -abfluss, man könnte sie mit einem  
2 Wasserspeicherkraftwerk vergleichen bei dem eine Staumauer das Energiepotential des Wassers hält. Bei einem  
3 Speicherkraftwerk müssen auch die Zu- und Abflüsse bekannt sein, damit die Ganglinie des Speicherstandes ermittelt  
4 werden kann. Zur Ermittlung des Speicherstandes thermischer Speicher sind diese Kenntnisse also ebenfalls  
5 erforderlich.

6 In erster Linie müssen die Berechnungsmodelle die Ganglinie der saisonalen Speicher abbilden, daraus stellt sich  
7 die Frage, wie der Speicher bewirtschaftet wird, denn alleine die Modellierung des Speichers ist nicht ausreichend,  
8 um ein sinnvolles Ergebnis zu erhalten. Für den Versuchsaufbau müssen zumindest vereinfachte Be- und  
9 Entladezyklen bestimmt werden.

10 Für beide folgenden Modelle wurde der Leitwert (Bauteile und Lüftung) des Referenzgebäudes gemäß Anhang B  
11 zugrunde gelegt mit 105 W/K (genau: 104,56 W/K). Abhängig von der Temperaturdifferenz auf Basis der HSK-Daten,  
12 wird bei konstanter Innenraumtemperatur die erforderliche Heizenergie bestimmt, die einfallende Sonnenenergie  
13 wirkt als direkte Verminderung auf den erforderlichen Energiebedarf.

14 Die Berücksichtigung der Speichermasse regelt das Temperaturverhalten im Haus, für den jährlichen  
15 Heizwärmebedarf ist diese aber kaum von Bedeutung, da die Energiebilanz an der Systemgrenze zwingend gilt und  
16 die Wärmeleitung durch die Bauteile rein vom Temperaturunterschied abhängt. Bei den Langzeitwärmespeichern ist  
17 die zeitliche Abfolge von untergeordneter Bedeutung, da die Verweilzeit der Energie im Speicher im Gegensatz zu  
18 Energieeinbringung und -bedarf verhältnismäßig sehr kurz ist.

19 In weiteren Untersuchungen kann die Speichermasse berücksichtigt werden, allerdings ist die Frage in welcher  
20 Höhe, da zuerst das genaue Rechenmodell mit den Langzeitwärmespeichern gekoppelt werden müsste, danach  
21 könnte man mit Hilfe rechenintensiver Untersuchungen Aufschlüsse über die Speichermasse des vereinfachten  
22 Modells ziehen und validieren. In erster Linie soll die Möglichkeit der Speicherung von regenerativer Energie mit  
23 Hilfe von saisonalen Speichern behandelt werden und deshalb wird bei den gezeigten Voruntersuchungen nicht auf  
24 die Speicherkapazität des Hauses eingegangen.

### 5.2.1. Saisonale Speicherung mit Warmwasserspeichern

25 Die Bauarten und -kosten von saisonalen Speichern wurden bereits in Kapitel 3.5.2 eingehend beschrieben. Wird  
26 ein Warmwasserspeicher neu errichtet, sind Baukosten gemäß Abbildung 3-14 zu kalkulieren, speziell kleine Speicher  
27 sind hier überproportional teuer. Zur Untersuchung der Funktionsweise hingegen, wurde im Folgenden ein  
28 vereinfachtes Ein- Kapazitäten- Speichermodell erstellt, mit dem eine Ganglinie des Speichers dargestellt wird (vgl.

1 Abbildung 6-2). Die Grundlage für eine Speicherbewirtschaftung ist ein vereinfachtes Gebäudemodell ohne  
 2 Speichermasse und eine vereinfachte Abschätzung des Sonnenenergieertrags. Aufgrund der Baukosten wurden hier  
 3 keine genaueren Modelle erstellt. In einer zweiten unabhängigen Untersuchung, wird auf Wärmeverluste von  
 4 Warmwasserspeichern eingegangen, damit abschätzbar wird, ab welcher Größe Speicher verwendbar sind.

### 5 Warmhalteverluste

6 Mit der Berechnung der Verluste wird aufgezeigt, wie die zeitmäßige Entwicklung des Speichers ohne äußere  
 7 Einflüsse vor sich geht. Ein Speicher muss immer ausreichend Energie in brauchbarer Form zur Verfügung stellen,  
 8 wobei es zwangsläufig zu Wärmeverlusten kommt. Je weniger Oberfläche zum Volumen vorhanden ist, desto  
 9 effizienter ist der Speicher. Der Zusammenhang zwischen dem A-V- Verhältnis und der Obergrenze der spezifischen  
 10 Warmhalteverluste, wurde in Abbildung 3-10 aufgezeigt. Abgesehen von den Anschlüssen, die punktuelle  
 11 Schwächungen darstellen, ist der Gesamtleitwert der Speicherhülle direkt proportional zur Oberfläche des  
 12 Wärmespeichers.

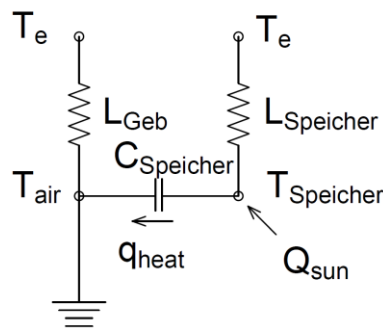


Abbildung 5-14: Thermisches Netzwerk für das gekoppelte Modell Warmwasserspeicher mit reduziertem Gebäudemodell

13 Zur Berechnung der Warmhalteverluste wurde der Speicherinhalt als homogen angenommen. Die Hülle an der  
 14 bilanziert wird, liegt an der Außengrenze der Wärmedämmung. Nach den Gleichungen (5-61) wird die zeitliche  
 15 Entwicklung des Speicherstandes in finiten Zeitschritten  $t > 0$  berechnet, für die zeitliche Abfolge wird der  
 16 Speicherstand in stündlichen Schritten ausgewertet. Die Übergangswiderstände zwischen Speicher und Luft, sowie  
 17 die Leitwerte der punktförmigen Schwachstellen, sind in diesem Modell nicht berücksichtigt. Die Abbildung 5-14  
 18 zeigt das thermische Netzwerk, welches zugrunde gelegt wurde.

$$U_{\text{Speicher}} = \frac{1}{\frac{d}{\lambda}}$$

$$L_{\text{Ges}} = (A_{\text{Mantel}} + 2 \cdot A_{\text{Deckfläche}}) \cdot U_{\text{Speicher}},$$

$$0,1 \leq H/D_{\text{Hüllfläche}} = \frac{H_{\text{Behälter}} + 2 \cdot d}{D_{\text{Behälter}} + 2 \cdot d} \leq 10,$$

(5-61)

$$V_{\text{Speicher}} = H_{\text{Behälter}} \cdot \frac{D_{\text{Behälter}}^2 \cdot \pi}{4},$$

$$\Delta T = T_{\text{Speicher}} - T_{\text{Referenz}},$$

$$\Delta Q = L_{\text{Ges}} \cdot \Delta T,$$

$$C_{\text{Speicher}} = V_{\text{Speicher}} \cdot \rho \cdot c_{\text{spez}},$$

$$\Delta\Delta Q_{n-n+1} = \Delta Q \cdot \Delta t_{n-n+1},$$

$$E_{\text{Speicher}} = C_{\text{Speicher}} \cdot \Delta T,$$

$$E_{\text{Speicher},n+1} = E_{\text{Speicher},n} + \Delta\Delta Q_{n-n+1}$$

1 Mit:

$d$  Stärke der Wärmedämmung  $m$

$\lambda$  Wärmeleitwert der Speicherdämmung  $W/mK$

$U_{\text{Speicher}}$  Wärmeleitwert der Hülle  $W/m^2K$

$A_{\text{Deckfläche}}$  Boden und Deckfläche des Speichers  $m^2$

$A_{\text{Mantel}}$  Mantelfläche des Speichers  $m^2$

$L_{\text{Ges}}$  Leitwert der Speicherhülle  $W/K$

$H_{\text{Behälter}}$  Höhe des Speichers ohne Dämmung  $m$

$D_{\text{Behälter}}$  Dämmung des Speichers ohne Dämmung  $m$

$H/D_{\text{Hüllfläche}}$  Verhältnis der Höhe zum Durchmesser –

$V_{\text{Speicher}}$  Volumen des Speichers  $m^3$

$T_{\text{Referenz}}$  Referenztemperatur in der Umgebung des Speichers  $^{\circ}C$

$T_{\text{Speicher}}$  Temperatur des Wassers  $^{\circ}C$

$\Delta T$  Temperaturspreizung Speicher und Umgebungsklima  $^{\circ}C$

$\Delta Q$  Wärmestrom zwischen Umgebung und Speicher  $^{\circ}C$

$\rho$  Dichte des Wassers  $kg/m^3$

$c_{\text{spez}}$  Spezifische Wärmespeicherkapazität  $W/kgK$

$C_{\text{Speicher}}$  Speicherkapazität des Speichers  $W/K$  bzw.  $kWh/K$

$\Delta t_{n-n+1}$  Zeitschritt der Simulation zwischen den Zeitpunkten  $n$  und  $n + 1$   $h$  bzw.  $s$

$\Delta\Delta Q_{n-n+1}$  Änderung des Speichers abhängig vom Zeitschritt und Temperaturdifferenz zwischen den Zeitpunkten  $n$  und  $n + 1$   $W$  bzw.  $kWh$

$E_{\text{Speicher}}$  Energieinhalt des Speichers gegenüber der Referenztemperatur  $W$  bzw.  $kWh$

$E_{\text{Speicher},n}$  Energieinhalt des Speichers zum Zeitpunkt  $n$  gegenüber der Referenztemperatur  $W$  bzw.  $kWh$

## 2 Untersuchung der Speicherganglinie

3 Die Energieeinspeisung in den Wasserspeicher erfolgt über ein vereinfachtes Kollektormodell, in dem die  
4 auftreffende Strahlungsenergie auf der geneigten Kollektorfläche auf 40% reduziert wird. Mit den zugrunde gelegten  
5 HSK-Daten wird mit dem Ertrag eine modifizierte Ganglinie in Gleichungen (5-61) erzeugt. Der Energiebedarf erfolgt  
6 über ein Gebäudemodell, das auch die HSK-Daten als Rahmenbedingung zur Grundlage hat. Die Gleichung wird wie  
7 folgt modifiziert:

$$E_{\text{Speicher},n+1} = E_{\text{Speicher},n} + \Delta\Delta Q_{n-n+1} + Q_{\text{HWB}} + Q_{\text{Sol}} \quad (5-62)$$

8 Mit:

$Q_{HWB}$  Stündlicher Heizwärmebedarf kWh

$Q_{sol}$  Solarer Ertrag kWh

1 Die Berechnung wurde in einem Excel-Datenblatt durchgeführt, wobei als zusätzliche Varianten unterschiedliche  
2 Temperaturverläufe im Speicher hinterlegt werden können. Eine Darstellung der Ergebnisse ist in Kapitel 6.1  
3 dargestellt.

### 5.2.2. Saisonale Energiespeicherung mit Tiefenbohrungen

4 Tiefenbohrungen haben die Vorteile, dass das Temperaturniveau viel niedriger liegt, als bei  
5 Warmwasserwärmespeichern und der Energieertrag aufgrund des erhöhten Wirkungsgrades im  
6 Niedertemperaturbereich höher ist, als bei konventionellen Speichern. Der Nachteil liegt darin, dass eine  
7 Wärmepumpe benötigt wird, da das Temperaturniveau für die direkte Verwendung nicht geeignet ist. Grundsätzlich  
8 werden Tiefenbohrungen ohne Energieeintrag betrieben und dieses Modell soll speziell den Nutzen des solaren  
9 Energieeintrages in der Tiefenbohrung behandeln, um einen möglichen Nutzen im Gesamten abzuleiten.

#### 10 Tiefenbohrungsmodell

11 Zunächst muss auf das fehlende Modell der Tiefenbohrung eingegangen werden. In vielen Literaturquellen findet  
12 man Modelle auf Basis Finiten Elemente, diese haben allerdings den Nachteil, dass die Simulation sehr lange dauert.  
13 Im Rahmen einiger Forschungsprojekte hat man versucht, eine analytische Antwort zu finden, zum Beispiel wurde  
14 durch die Forschungsarbeit von Johan Claesson [52] ein Modell entwickelt, das die Temperaturantwort für eine  
15 Tiefenbohrung mithilfe von analytischen Grundlagen ermittelt. Der Vorteil gegenüber den Modellen davor, die nicht  
16 so gut funktionierten, ist das Schema, mit dem Energieströme gewichtet und aufsummiert werden. Der wesentliche  
17 Vorteil gegenüber anderen Berechnungsverfahren liegt in eben dieser analytischen Herangehensweise, wodurch der  
18 Rechenaufwand minimiert wird und sich dieses Verfahren mit anderen Rechenverfahren leicht verknüpfen lässt. Das  
19 Tiefenbohrungsmodell wurde an einem großen Forschungsfeld der Fa. Fronius validiert [24].

20 Beim Auftreten von Grundwasserströmen kann die Temperaturspeicherung ist Vorsicht geboten, denn diese  
21 bewirken eine Verschiebung des Temperaturfelds im Untergrund. Ist genügend mächtiges Grundwasser vorhanden,  
22 so ist in den meisten Fällen der Energiezufluss zur Wärmepumpe höher als ohne und zusätzlich ist die Regeneration  
23 durch die Wärmespeicherkapazität des Wassers schneller.

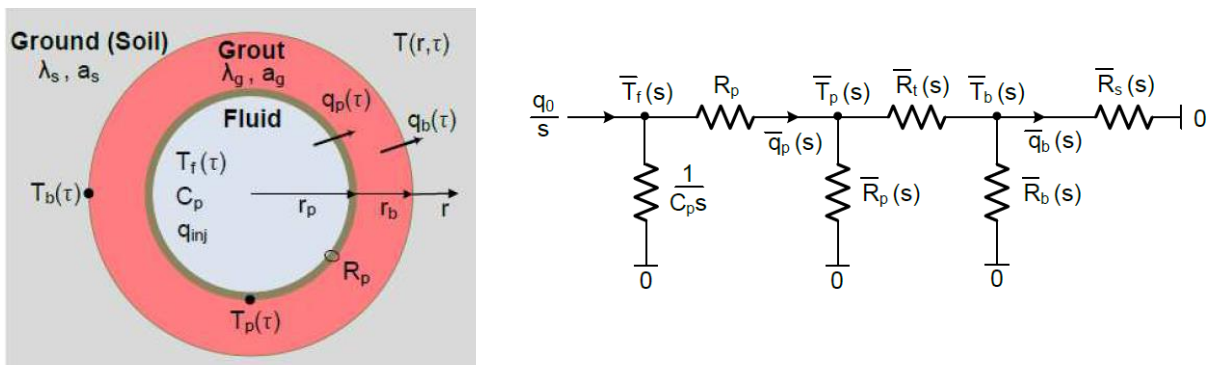


Abbildung 5-15: Links: Aufbau des Tiefenbohrungsmodells mit Geometrie, Temperatur, Wärmestrom und thermische Eigenschaften des Bohrlochs und rechts: thermisches Netzwerk zur radialen Wärmeleitungsprozess in der Laplacedomäne nach [52]

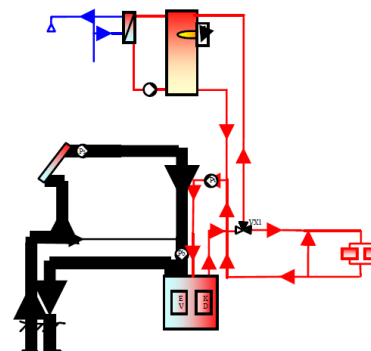
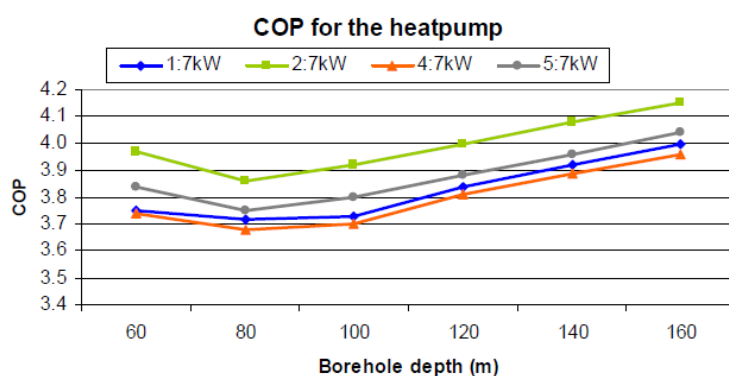
24 Bei der Simulation der Tiefenbohrung muss zunächst ein Thermal Response Test (kurz: TRST) durchgeführt  
25 werden, der zumindest für den Zeitraum der Simulationsdauer durchgeführt werden muss. Alternativ zu dem  
26 berechneten TRST, kann der TRST gemäß dem Versuchsaufbau nach VDI 4640 ermittelt werden, wobei das Problem  
27 bei der kurzen Prüfungsdauer liegt, dass stark extrapoliert werden muss.

28 Als Erweiterung zur einfachen Bohrung, gibt es Modelle auf Basis des einfachen Modells, mit denen nicht nur eine  
29 Tiefenbohrung, sondern auch Tiefenbohrungsfelder berechnet und dadurch auch Energiespeicher für  
30 Betriebsgebäude, Reihenhäuser und sogar Siedlungen simuliert werden können.

Die Implementierung im saisonalen Speichermodell ist mit Hilfe von Simulink erfolgt (siehe Anhang C), dabei teilt sich die Tiefenbohrung in Simulink in den TRST, der nur am Anfang der Simulation durchgeführt wird und in die Aggregation der Energieströme. Die Tiefe der Tiefenbohrung sowie die Eigenschaften des Bodens können, je nach Boden, variabel verändert werden, der Boden kann im Modell jedoch nur als homogen eingegeben werden.

#### Vorhandenes Heizungsmodell mit Tiefenbohrung und Solarkollektor

Wie bereits eingangs im Kapitel erwähnt, reicht es nicht aus, saisonale Speicher zu modellieren, sondern es muss auch die Be- und Entladung simuliert werden. Im Rahmen der Dissertation [53] wurden unterschiedliche Simulationsaufbauten mit Pufferspeicher, Solarkollektoren, Wärmepumpen und Wärmetauschern mit Hilfe von TRYNYSYS durchgeführt. Die Tiefenbohrung ist dabei mit Finiten Elementen modelliert worden. Das Ergebnis ist die Entwicklung der Leistungszahl, abhängig von der Tiefe des Bohrlochs.



**Abbildung 5-16: Modell mit Ergebnissen zur Wärmepumpe mit Tiefenbohrung, Solarkollektor und Speicher**  
Simulation mit TRYNYSYS mit Verwendung von Finiten Elementen nach [53]

links: Leistungszahlen unterschiedliche Modelle für den Standort Stockholm mit einer Wärmepumpe von 7 kW, 10 m<sup>2</sup> Solarkollektorenfläche und 29400 kWh/Jahresleitung Ergebnisse nach dem 20.ten Betriebsjahr  
rechts: Modellaufbau 2 mit den besten Resultaten der Studie

Bei der Entnahme der Heizenergie aus der Tiefenbohrung, läuft die Sole über den Solarkollektor, dabei wird die Temperatur der Soleflüssigkeit erhöht, bevor die Energie durch die Wärmepumpe entzogen wird. Die Speicherung der Sonnenenergie wird bei diesem Modell nicht forciert, denn die Nutzung der Sonnenenergie erfolgt nur bei aktiver Wärmepumpe.

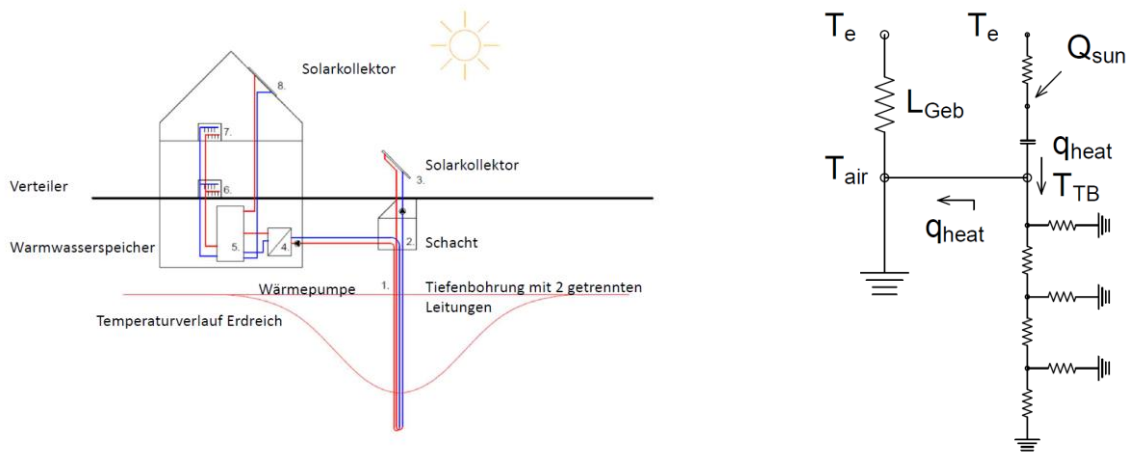
#### Entwicklung eines saisonalen Speichers durch Nutzung von Sonnenenergie

Im Gegensatz zu den bekannten Modellen, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeiten ein Modell entwickelt, in dem die Sonnenenergie der Solarkollektoren direkt in die Tiefenbohrung gespeichert wird. Die Basis dieses Modells war einerseits das Rechenkernmodell [24], HSK-Daten, die Simulation der Tiefenbohrung nach [52] und ein Modell zur Wärmepumpe, in dem die Leistungskurven und -zahlen an die Datenblätter der Wärmepumpen aus Anhang A angelehnt sind. Die Modellierung funktioniert mit Hilfe linearer Interpolation zwischen den markanten Punkten der Kurven.

Die Abbildung 5-17 zeigt auf der linken Seite eine Übersichtsskizze über die Kombination des Gebäudemodells und des Speichermodells. Das Speichermodell ist über einen Kreis mit dem Solarkollektor verbunden und mit dem anderen Kreis wird die Wärmepumpe betrieben. Auf der rechten Seite ist das vereinfachte Gebäudemodell mit einem Thermischen Netzwerk dargestellt.

Zur einfacheren Übersicht der komplexen Prozesse wurden Teile des Rechenkern-Modells im Zuge dieser Diplomarbeit mit Matlab Simulink und Stateflow implementiert. Das hat einerseits den großen Vorteil, dass diese Berechnungsgänge übersichtlicher werden und andererseits den Nachteil, dass das Modell in einzelnen Bereichen editiert werden musste, da sich der Rechenablauf in Simulink von jenem in Matlab unterscheidet. Matlab kann einzelne Bereiche, die bekannt sind (z.B. Höhe der Sonne zu einem bestimmten Zeitpunkt) vorweg berechnen, in

- 1 Simulink wird das Ergebnis nur Schritt für Schritt gelöst, somit musste die Syntax bei jedem Konfliktpunkt adaptiert
- 2 werden.



**Abbildung 5-17: Links: Übersichtsskizze zum entwickelten Speichermodell mit Abnehmer; Rechts: Verwendetes thermisches Netzwerk, Koppelung zwischen Solarkollektor- Tiefenbohrungs- und Gebäudemodell.**

3 Die Regelung ist ein entscheidendes Bindeglied zwischen der Gebäudeausrüstung und der Bautechnik und wurde  
 4 durch Stateflow dargestellt und die einzelnen Schaltzustände der Regelungen können während der Simulation  
 5 abgebildet werden. Vergleicht man während der Simulation die Schaltzustände von Stateflow mit den Ergebnissen  
 6 von Simulink, können auftretende Schwachstellen rasch behoben werden und die Optimierung des Modelles ist mit  
 7 den gewonnenen Informationen besser möglich. Für noch genauere Modellierungen können mit Hilfe von Simulink  
 8 und Stateflow auch Echtzeitüberwachungen von Schaltzuständen durchgeführt werden, es besteht aber auch die  
 9 Möglichkeit, diese im laufenden Betrieb zu ändern.

10 Die Datenübertragung in Simulink erfolgt zwischen den einzelnen Blöcken mit Datenverbindung. Diese können,  
 11 zur Verbesserung der Übersichtlichkeit, mit „Bus collector“ zu Datenbussen zusammengefasst und mit „Bus selector“  
 12 wieder zerlegt werden. Die Vorteile liegen in der einfachen Handhabung, dem Datenverlust wird vorgebeugt und die  
 13 Verständlichkeit wird verbessert. In der Automobilindustrie geht man so weit, dass für einzelne Bauteile bestimmt  
 14 Ein- und Ausgabeparameter firmenintern standardisiert vorgegeben werden, um vor allem bei Parameterstudien die  
 15 Übersichtlichkeit nochmals zu verbessern. Ein einzelner Bauteilblock kann in Simulink durch einen anderen Block  
 16 einfach ersetzt werden und im ausgetauschten Block müssen, bei standardisierter Benennung der Variablen, keine  
 17 Adaptierungen im „Bus selector“ des einzelnen Blocks vorgenommen werden.

18 Im Anhang C ist die Syntax des Gebäudemodells mit einem Petri-Netz dokumentiert, da dieses sehr übersichtlich  
 19 ist wird hier nicht näher auf die Bauteile eingegangen. Die Einteilung der Simulation erfolgt in drei Abschnitte  
 20 (=Spalten in der Übersichtsgrafik in Anhang C), nämlich Preprocessing, Processing und Postprocessing. Im ersten  
 21 Abschnitt werden alle Daten geladen, die für die Berechnung erforderlich sind, im zweiten Abschnitt werden die  
 22 Daten weiterverarbeitet und es werden die Funktionseinheiten, der Reihe nach, mit den Informationen zum  
 23 aktuellen Block berechnet, für den nächsten Zeitschritt im Datenbus gesammelt und rückgeführt und im dritten und  
 24 letzten Abschnitt werden die Daten aus Abschnitt 2 dokumentiert und in interpretierbare Ergebnisse aufgearbeitet.  
 25 Die Datenrückführung in Abschnitt 2 muss zeitlich versetzt geschehen, da aufgrund der Schaltmöglichkeiten keine  
 26 exakte Lösung möglich ist, wodurch in Simulink ein Funktionsblock mit dem Namen „Unit Delay“ eingebaut werden  
 27 muss.

28 Bei mathematisch genau definierten Zusammenhängen, wird in Simulink trotz Datenrückführung eine genaue  
 29 Lösung berechnet, ohne dass eine Zeitverschiebung der Daten notwendig ist. Sobald also Schalteinheiten vorhanden  
 30 sind, müsste das Ergebnis aus einzelnen Lösungen zusammengesetzt werden. Zur Berechnung ohne Zeitversatz,  
 31 müsste für jede Regelmöglichkeit (= bestimmter Satz an Differentialgleichungen) eine eigene Lösung berechnet  
 32 werden. Abhängig von der Änderung des Schaltzustands, müssten die Übergangsbedingungen entsprechend gebildet



werden und alleine schon in der Regelungseinheit des Solarkollektors sind für die Pumpe 4 Schaltmöglichkeiten (kein Betrieb, low flow Betrieb, high flow Betrieb und variabler Betrieb zwischen low- und high flow Betrieb) gegeben.

An fast allen Tagen im Jahr wird mindestens einmal am Tag zwischen den einzelnen Schaltzuständen durchgeschaltet, bedenkt man also die sinnvolle Simulationsdauer für Tiefenbohrungen von mindesten 20 Jahren, so werden rein durch den Solarkollektor ungefähr  $20 \cdot 365 \cdot 4 = 29.200$  Schaltzustände geschaltet (ohne Berücksichtigung von Winter und bewölkten Tagen, wo weniger und mehr Schaltzustände pro Tag vorkommen können). Für das Modell bedeutet das, dass alleine bedingt durch die Schaltzyklen der Solarpumpe, die Lösungsmethode im Simulationszeitraum ungefähr 30.000-mal umgestellt werden muss. Bei einer Simulation kommen zusätzliche Regelungsmöglichkeiten hinzu und die Anzahl an Zustandsmöglichkeiten steigt mit der Anzahl an Schaltzuständen kombinatorisch sehr stark an. Für eine geschlossene Lösung müsste für alle Zustandsmöglichkeiten ein Satz an Funktionen zur Lösung erstellt werden, mit dem je nach Zeitlänge des Schaltzustandes, eine Lösung bestimmt werden kann. Die einzelnen Impulse zu bestimmten Zeitpunkten müssten infolge aufgefaltet werden.

Als Grundlage für die Berechnung sind stündliche Daten gegeben, eine Lösung auf der Basis von Funktionen wäre nicht viel genauer, da auch diese Lösungsfunktionen oder -kurven eingangs numerisch berechnet werden müssten, allerdings könnte eine Beschleunigung der Berechnung vor allem bei langer Simulationszeit erzielt werden, so wie es im Tiefenbohrungsmodell [52] erfolgt ist. Die Vorgabe einer finiten Zeiteinheit zwischen den Zeitschritten ist eine gängige numerische Lösungsmethode und ist bei ausreichend kleinen Zeitschritten für die Lösung des Problems aus physikalischer Sicht genügend genau.

### 5.3. Konversionsfaktoren

Abschließend muss, wie bereits eingangs gefordert, der Nutzen für die Umwelt bewertet werden. In Österreich sind zur Ermittlung der Kohlendioxidemissionen, Konversionsfaktoren in der OIB- Richtlinie 6 [23] ermittelt worden, mit denen, abhängig vom Endenergiebedarf, der Primärenergiebedarf und die Kohlendioxidemission berechnet werden können. In Tabelle 5-14 sind die Konversionsfaktoren gegeben, abweichend zu dieser Tabelle können Werte mit einem Einzelnachweis für den Energieausweis verwendet werden (z.B. liegt der Strom-Mix der EVN mit 116,46 g/kWh deutlich unter dem angegebenen und es gibt seit der Liberalisierung des Strommarkts Anbieter, die ausschließlich erneuerbare Energie anbieten). Auffallend ist, dass speziell Biomasse und die Kraft-Wärme-Kopplung (kurz: KWK) besonders günstig bewertet sind. Die Biomasse besitzt einen geschlossenen Kohlendioxidkreislauf, der Energieaufwand und die damit verbundenen Emissionen, sind nur für die Holzernte erforderlich. Die KWK liegt in der Bewertung nicht einmal bei einem Zehntel der Emission anderer Energieträger, die Bewertung ist hier zugunsten der Nutzung von Prozessabwärme erfolgt, da die Wärmeenergie sowieso abgeführt werden muss und die Kohlendioxidemission wird nur untergeordnet in Rechnung gestellt.

Tabelle 5-14: Konversionsfaktoren nach OIB-Richtlinie 6 [23]

	Energieträger	f <sub>PE</sub> [-]	f <sub>PE,n.ern.</sub> [-]	f <sub>PE,ern.</sub> [-]	f <sub>CO2</sub> [g/kWh]
1	Kohle	1,46	1,46	0,00	337
2	Heizöl	1,23	1,23	0,01	311
3	Erdgas	1,17	1,16	0,00	236
4	Biomasse	1,08	0,06	1,02	4
5	Strom-Mix Österreich (inkl. Netto-Importe)	1,91	1,32	0,59	276
6	Fernwärme aus Heizwerk (erneuerbar)	1,60	0,28	1,32	51
7	Fernwärme aus Heizwerk (nicht erneuerbar)	1,52	1,38	0,14	291
8	Fernwärme aus hocheffizienter KWK <sup>(1)</sup> (Defaultwert)	0,94	0,19	0,75	28
9	Fernwärme aus hocheffizienter KWK <sup>(1)</sup> (Bestwert)	≥ 0,30	gemäß Einzelnachweis <sup>(2)</sup>		≥ 20
10	Abwärme (Defaultwert)	1,00	1,00	0,00	20
11	Abwärme (Bestwert)	≥ 0,30	gemäß Einzelnachweis <sup>(2)</sup>		≥ 20

<sup>(1)</sup> ... Als hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) werden all jene angesehen, die der Richtlinie 2004/8/EG entsprechen.  
<sup>(2)</sup> ... Für den Fall, dass ein Einzelnachweis gemäß EN 15316-4-5 durchgeführt wird, dürfen keine kleineren Werte als für industrielle Abwärme verwendet werden. Die Randbedingungen zum Berechnungsverfahren sind im Dokument „Erläuternde Bemerkungen“ festgehalten.

## 6. Ergebnisse und Diskussion

1 Die Modelle aus Kapitel 5.2 liefern, unter Berücksichtigung der Randbedingungen, die im Folgenden dargestellten  
2 Ergebnisse. Zum besseren Verständnis wurden Simulationen mit den gesamten Modellen und auch teilweise nur mit  
3 Modellteilen durchgeführt. Die hier präsentierten Ergebnisse sind Grundsatzuntersuchung zur Abklärung, wie solare  
4 Energie in sensibler Form gespeichert werden kann. Der Detaillierungsgrad der Modelle ist grob und sollte aufbauend  
5 auf diese Arbeit in Folgeuntersuchungen verfeinert werden, bevor Pilotprojekte in die Praxis umgesetzt werden  
6 könnten. Es müssten außerdem weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die vor allem dazu nötig wären, um  
7 die Anlagenkomponenten mit den dazugehörigen Regelmechanismen zu konfigurieren und detaillierte Energieflüsse  
8 auf Plausibilität zu prüfen.

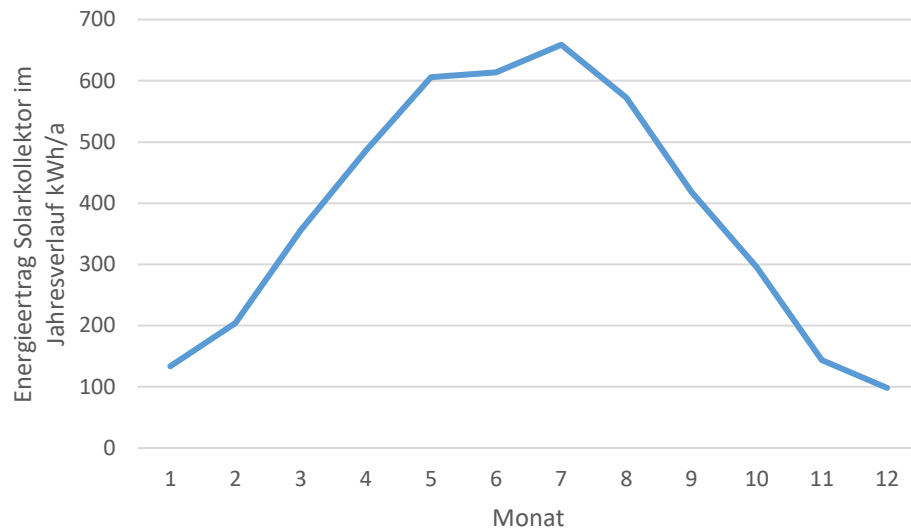
9 Der Lösungszugang zur saisonalen Energiespeicherung wurde auf zwei unterschiedlichen Wege verfolgt.  
10 Grundlegend gilt, dass beide Speichersysteme auf Basis von Wärmeenergie funktionieren und speziell nur sensible  
11 Wärmeenergie aufnehmen, womit die Wärmemenge der Speichermedien im Anwendungsbereich linear zur  
12 Temperatur steht. Der erste Zugang ist die Speicherung der solaren Energie mit Hilfe eines Warmwasserspeichers,  
13 der Behälter ist dabei aus Beton und mit einer temperaturbeständigen EPDM- Folien Auskleidung, wobei bei dieser  
14 Variante das Haus ohne Heizung betrieben werden sollte. Die zweite Konfiguration ist aufgrund der  
15 Effizienzsteigerung eine Kopplung von Tiefenbohrung mit Solarkollektoren. Die Entnahme der gespeicherten  
16 Wärmeenergie erfolgt mit Hilfe einer Wärmepumpe, da die Energie in einer Tiefenbohrung nur im  
17 Niedertemperaturbereich gespeichert werden kann.

### 6.1. Warmwasserspeicher

18 Reine Warmwasserspeicher sind dann interessant, wenn keine Zusatzheizung erforderlich ist, das heißt, der  
19 gesamte Heizwärmebedarf müsste durch Sonnenenergie mit Kollektorfläche zur Verfügung gestellt werden. Ein Haus  
20 ohne Heizung birgt natürlich Risiken, die wirtschaftlich nicht restlos beseitigt werden können. Die Überlegungen zu  
21 den statistischen Abweichungen und auch das Risiko von zu geringer Sonneneinstrahlung können mit Hilfe einer  
22 Wahrscheinlichkeitsverteilung gelöst werden und demnach bei einem Warmwasserspeicher nicht funktionieren. Nun  
23 ist der Zugang bei Sonnenhäusern oft ein Kachel- oder Schwedenofen, der eine Heiztasche besitzt und im Notfall als  
24 Heizung dienen kann. Bei der Aufbereitung des Brauchwassers kann durch den hohen Temperaturbereich bei der  
25 Verbrennung auch kostengünstig und nahezu CO<sub>2</sub>-neutral Warmwasser aufbereitet werden.

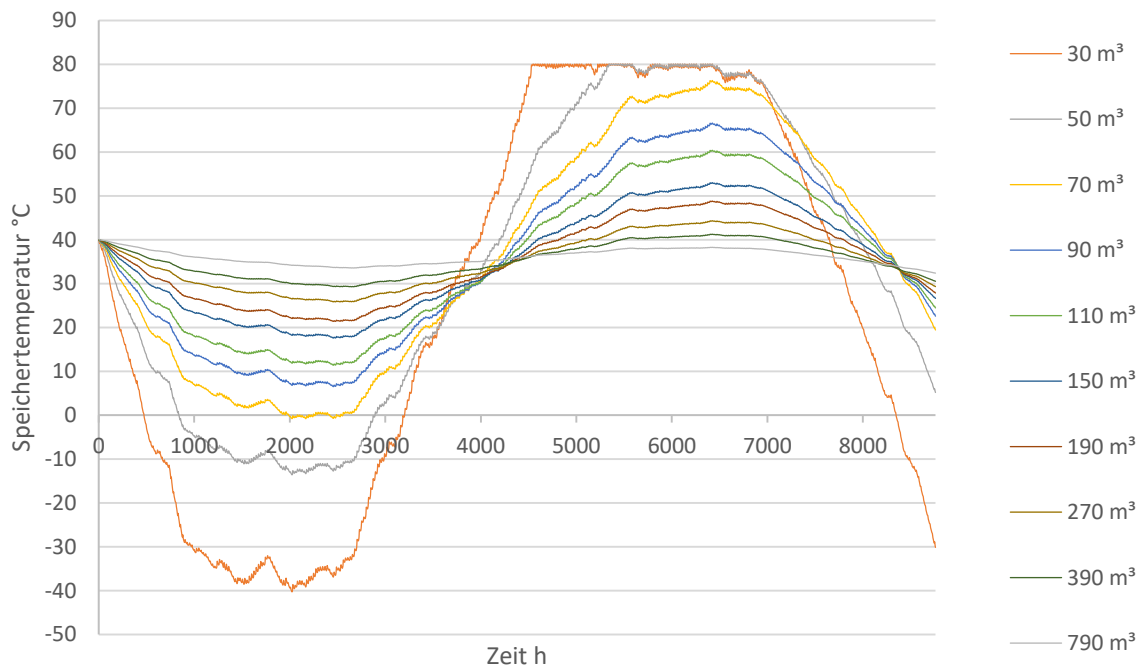
26 Die Form eines Warmwasserspeichers kann 2 Typen annehmen, einerseits eine länglich hohe, andererseits eine  
27 kompakte, kugelähnliche Bauweise. Speicher für annähernd längere Speicherung beginnen ab 10 m<sup>3</sup> aufwärts. Nun  
28 stellt sich die Frage, welche Vorteile die Bauformen der Speicher besitzen. Bei der länglichen Bauform ist vor allem  
29 die Transportfähigkeit gut, allerdings muss man diese planerisch in das Haus integrieren. Die Firma Vakuum  
30 Pufferspeicher aus Deutschland stellt Vakuumstahlspeicher mit fertigen und abgestimmten Einlaufsystemen bis  
31 50 m<sup>3</sup> standardmäßig her. Bereits beim 40 m<sup>3</sup> Speicher beträgt die Höhe des Speichers, aufgrund der  
32 Breitenbeschränkung durch den Transport mit 3,00 Meter, 12 Meter. Diese müssen über die gesamte Höhe in ein  
33 Haus integriert werden. Die kompakten Speicher, mit geringem A/V- Verhältnis, haben den Vorteil, dass der  
34 Wärmeverlust aufgrund der Bauform niedriger liegt, allerdings gibt es Probleme bei der Warmwasserbereitung, da  
35 sich das Warmwasser im Speicher über die gesamte Fläche verteilt und über die Deckfläche des Speichers besonders  
36 schnell Wärme verliert. Zur Bereitstellung von Warmwasser muss somit ziemlich viel Wasser erhitzt werden. Aus  
37 diesem Grund ist es logisch, dass Speicher eher zylinderförmig geformt sind, um die Warmwasserenergie in einem  
38 kleinen Bereich zu halten. In den meisten Fällen wird ein Verhältnis des Durchmessers zur Höhe von 1:2 verwendet.

39 Nach dem Modell aus Kapitel 5.2.1, ergibt sich für das Referenzobjekt eine Speicherganglinie nach Abbildung  
40 6-2. Man erkennt ziemlich gut die Glättung der Speicherganglinie mit der Größe des Speichers (vgl. Abbildung 6-2).  
41 Die Abbildung 6-1 zeigt den monatlichen Solarertrag der Kollektoren. Da die Ergebnisse nach längerer Betrachtung  
42 logisch schlüssig sind, aber nur eine Abschätzung durch die grobe Vereinfachung geben, wurden im Folgenden  
43 theoretische Überlegungen zur Planung ausgelegt.



**Abbildung 6-1: Energieertrag von rund 20m<sup>2</sup> Solarkollektorfläche 9.172 kWh, bei einer auftreffenden Strahlungsenergie von 25.207 kWh**

1



2

**Abbildung 6-2: Speicherganglinie in Abhängigkeit der Wasserspeichergröße in m<sup>3</sup>; Jahresertrag der Sonnenenergie 9.172 kWh/a kWh und entnommene Energie 10.712 kWh/a; die maximale Speichertemperatur ist auf 80°C beschränkt**

3 Im Stahlmantel eines Speichers erfolgt eine Wärmeleitung in vertikaler Richtung, wodurch die Wärmeenergie  
 4 homogenisiert wird. In [11] werden vereinfachte Lösungen zur Modellierung dieser horizontalen Strömung aus  
 5 unterschiedlichen Forschungsarbeiten zusammengefasst. Bei einem Multikapazitäten-Modell erfolgt ein interner  
 6 Wärmeaustausch durch Wärmeleitung über die Grundfläche des Speichers. Die Wärmeverteilung wirkt sich auf die  
 7 Wärmeleitung durch die Hülle nur über die obere und untere Deckfläche aus.

8 Angenommen man betrachtet zwei Speicher mit dem gleichen Energieinhalt, wobei der erste Speicher eine  
 9 homogene Temperaturverteilung besitzt, der zweite Speicher hat dagegen eine parabelförmige  
 10 Temperaturverteilung über die Höhe. Es besteht die Forderung nach der Energieäquivalenz und es gilt:

$$\sum_{i=1}^N E_{\text{Speicher,homogen},n} = \sum_{i=1}^N E_{\text{Speicher,parabel},n} \quad (6-63)$$

1 Der Energieinhalt zu einer Referenztemperatur wird demnach schichtweise, gemäß folgenden Gleichungen  
2 definiert.

$$\sum_{i=1}^N V_n \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{\text{Speicher,homogen},n} - T_{\text{Ref}}) = \sum_{i=1}^N V_n \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{\text{Speicher,parabel},n} - T_{\text{Ref}}) \quad (6-64)$$

3 Werden beide Seiten mathematisch gekürzt, stellt man fest, dass die Wärmeenergie proportional zur Temperatur  
4 steht:

$$\sum_{i=1}^N T_{\text{Speicher,homogen},n} = \sum_{i=1}^N T_{\text{Speicher,parabel},n} \quad (6-65)$$

5 Die Folge dieses Zusammenhangs ist, dass der Mittelwert der parabelförmigen Temperaturverteilung der  
6 homogenen Temperaturverteilung entsprechen muss. Die Gleichung gilt auch bei beliebiger Steigerung der  
7 Schichtanzahl. Um die Wärmeleitung zu quantifizieren, betrachtet man zunächst die zerlegte Mantelfläche. Die  
8 Hüllfläche jeder einzelnen Schicht ist gleich groß:

$$\sum_{i=1}^N T_{\text{Speicher,homogen},n} \cdot A_{\text{Mantel},n} \cdot U_{\text{Mantel},n} = \sum_{i=1}^N T_{\text{Speicher,parabel},n} \cdot A_{\text{Mantel},n} \cdot U_{\text{Mantel},n} \quad (6-66)$$

9 Der Leitwert kann aus mathematischer Sicht auf beiden Seiten gekürzt werden, dadurch gilt, dass die  
10 Wärmeverteilung keinen Einfluss auf die Wärmeleitung über den Mantel besitzt. Die unterschiedliche Wärmeabgabe  
11 kann nur über die Deckflächen vorhanden sein, woraus sich die Frage stellt, unter welcher Wärmeverteilung die  
12 Energieabgabe des Speichers zu einem Minimum wird. Als Beispiel wird ein Speicher mit der Höhe 1 angenommen,  
13 die homogene Speichertemperatur beträgt 1, die Deckflächen haben den Leitwert von 1 und auch die Energiemenge  
14 im Speicher beträgt 1. Die Leitwerte an der oberen und unteren Deckfläche sind konstant und gleich der Leitwerte  
15 des Mantels, somit ist die Wärmeleitung gleich:

$$\begin{aligned} \phi &= (T_{\text{Speicher,homogen},1} + T_{\text{Speicher,homogen},N}) \cdot A_{\text{Mantel},n} \cdot U_{\text{Mantel},n} \\ &= 2 \cdot T_{\text{Speicher,homogen},1} \cdot A_{\text{Mantel},n} \cdot U_{\text{Mantel},n} \end{aligned} \quad (6-67)$$

16 Die Temperaturverteilung wird nun variiert, dabei gilt, wie in der Natur beobachtet, dass die Temperatur des  
17 Wassers mit jeder Schicht nach oben monoton wächst:

$$\begin{aligned} T_{\text{Speicher},1} &\leq T_{\text{Speicher},2} \leq \dots \leq T_{\text{Speicher},n-1} \leq T_{\text{Speicher},n} \leq T_{\text{Speicher},n+1} \leq \dots \\ &\leq T_{\text{Speicher},N} \mid \frac{\sum_{i=1}^N T_{\text{Speicher},N}}{N} = T_{\text{Speicher,homogen}} \end{aligned} \quad (6-68)$$

18 Die Temperatur der ersten Schicht kann nur maximal der Mittelwert der homogenen Speichertemperatur  
19 entsprechen. Bei einer linearen Verteilung der Temperatur im Speicher gilt:

$$T_{\text{Speicher},1} - c = T_{\text{Speicher,homogen}} \quad (6-69)$$

$$T_{\text{Speicher},N} + c = T_{\text{Speicher,homogen}}$$

1        Somit ist die Wärmeleitung bei einer konstanten Verteilung um den Mittelwert gleich groß wie jene in Gleichung  
2 6-67. Abweichend zu den Energieverteilungen, die ihren Energieschwerpunkt in der mittleren Höhe des Speichers  $\frac{H}{2}$   
3 besitzen, gibt es Verteilungen, die einen dezentralen Energieschwerpunkt haben  $S_E \neq \frac{H}{2}$ , wobei dieser analog zum  
4 Massenschwerpunkt berechnet werden kann:

$$S_E = \frac{\int_0^H A \cdot \rho \cdot c \cdot T(h) \cdot h \cdot dh}{\int_0^H A \cdot \rho \cdot c \cdot T(h) \cdot dh} \quad (6-70)$$

5        Die monoton ansteigende Energieverteilung im Speicher kann konkav oder konvex gekrümmt sein. Aus  
6 physikalischer Sicht kommen zwei weitere Eigenschaften für die Beschreibung der Verteilungsfunktion hinzu, erstens  
7 die Stetigkeit (keine Sprünge in der Temperaturverteilungsfunktion) und zweitens die stetige Differenzierbarkeit  
8 (keine Sprünge in der Ableitung der Temperaturverteilungsfunktion). Um den Energieschwerpunkt bei  $\frac{H}{2}$  zu finden,  
9 muss um die homogene Temperaturverteilung ein symmetrischer Funktionsverlauf gegeben sein und für den Abstand  
10 der Teilschwerpunkt gilt:

$$e = H - \frac{\int_{\frac{H}{2}}^H A \cdot \rho \cdot c \cdot T(h) \cdot h \cdot dh}{\int_{\frac{H}{2}}^H A \cdot \rho \cdot c \cdot T(h) \cdot dh} = \frac{\int_0^{\frac{H}{2}} A \cdot \rho \cdot c \cdot T(h) \cdot h \cdot dh}{\int_0^{\frac{H}{2}} A \cdot \rho \cdot c \cdot T(h) \cdot dh} \quad (6-71)$$

11        Die konstante lineare Aufteilung ist ein Spezialfall dieser Funktion. Weicht die Aufteilung der Wärmeenergie von  
12 der Symmetrie ab, liegt die Summe der Oberflächentemperatur höher als bei einer symmetrischen Aufteilung und  
13 es folgt:

$$\begin{aligned} & |T_{\text{Speicher,homogen},1} - c + T_{\text{Speicher,homogen},N} + c| \\ & < |T_{\text{Speicher,homogen},1} - x + T_{\text{Speicher,homogen},N} + y| \end{aligned} \quad (6-72)$$

14        Durch Kürzen vereinfacht sich die Beziehung zu:

$$0 < |-x + y| \quad (6-73)$$

15        Das heißt, es muss nachgewiesen werden, dass die Auslenkung der Temperatur auf der oberen oder unteren  
16 Deckfläche größer ist, als auf der gegenüberliegenden und dass die Summe der Auslenkungen immer größer 0 ist.  
17 Zunächst können aus der vorhergehender Gleichung 2 Fälle unterschieden werden, die analog behandelt werden  
18 können:

$$x > y \vee x < y \quad (6-74)$$

19        Es bestehen 2 Flächen um den Mittelwert des Speichers und beide müssen gleich groß sein, sonst wäre es nicht  
20 der Mittelwert. Wird der Energieschwerpunkt ausgelenkt, sind die Flächen links und rechts vom Mittelwert  
21 unterschiedlich. Die geometrisch kompaktesten Formen sind zwei unterschiedliche Rechtecke mit der gleichen  
22 Größe. Somit gilt:

$$x \cdot h = y \cdot (H - h) \quad | h \in [0, H] \quad (6-75)$$

23        Daraus folgt:

$$x > y \mid h \in [0, H/2] \wedge x = y \mid h = H/2 \wedge x < y \mid h \in [H/2, H]$$

(6-76)

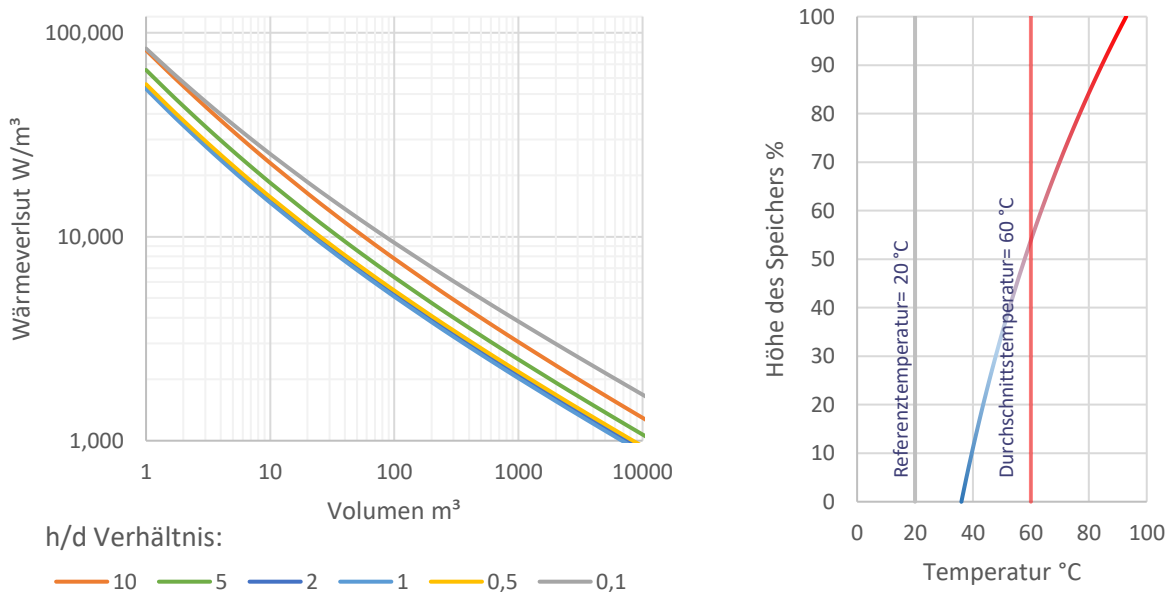
$$\phi_{T,homogen} = \phi_{T,symmetrisch} \leq \phi_{T,monoton,steigend} \blacksquare$$

1 Die Aussage des Beweises ist, dass jede Abweichung zu einer homogenen oder symmetrischen Energieverteilung  
 2 in einem Speicher zumindest zu gleichen, wenn nicht höheren, Wärmeleitungsverlusten führt. Speziell über die  
 3 obere Deckfläche der Speicher entweicht mehr Energie als vergleichsweise woanders, eine zusätzliche Dämmung ist  
 4 in diesem Bereich effizienter als an anderen Stellen. Die erhöhte Wärmeleitung durch die Temperaturverteilung  
 5 kann alleine über die Deckflächen berechnet werden und beträgt:

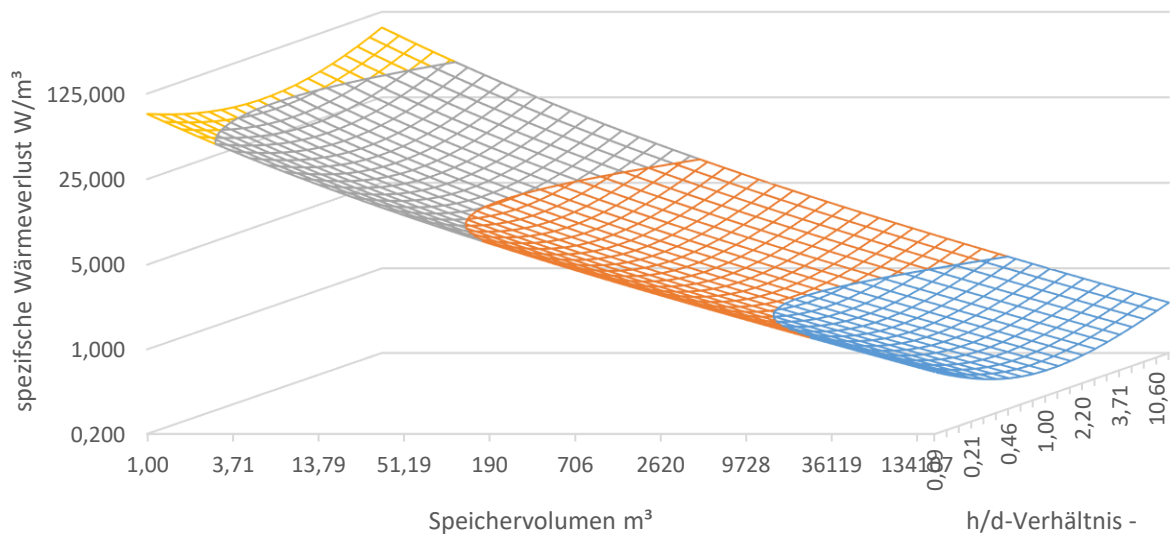
$$\begin{aligned} \phi_{T,zusatz,Tempvert.} &= \phi_{T,monoton,steigend} - \phi_{T,symmetrisch} = \\ &= (T_{Speicher,1} + T_{Speicher,N} - 2 \cdot T_{Speicher,homogen}) \cdot A_{Deckflächen} \cdot U_{Deckflächen} \end{aligned} \quad (6-77)$$

6 Im Analogieschluss kann man die Temperaturverteilung als Vergrößerung der Deckflächen bewerten, somit  
 7 können die geometrischen Argumentation zum A/V-Verhältnis aus Kapitel 3.4.1 eingebracht werden, damit gilt, dass  
 8 die Speicherhaltung trotz ungünstiger Proportionen, kombiniert mit ungünstiger Temperaturverteilung, mit  
 9 zunehmender Größe, weniger spezifische Speicherverluste besitzt.

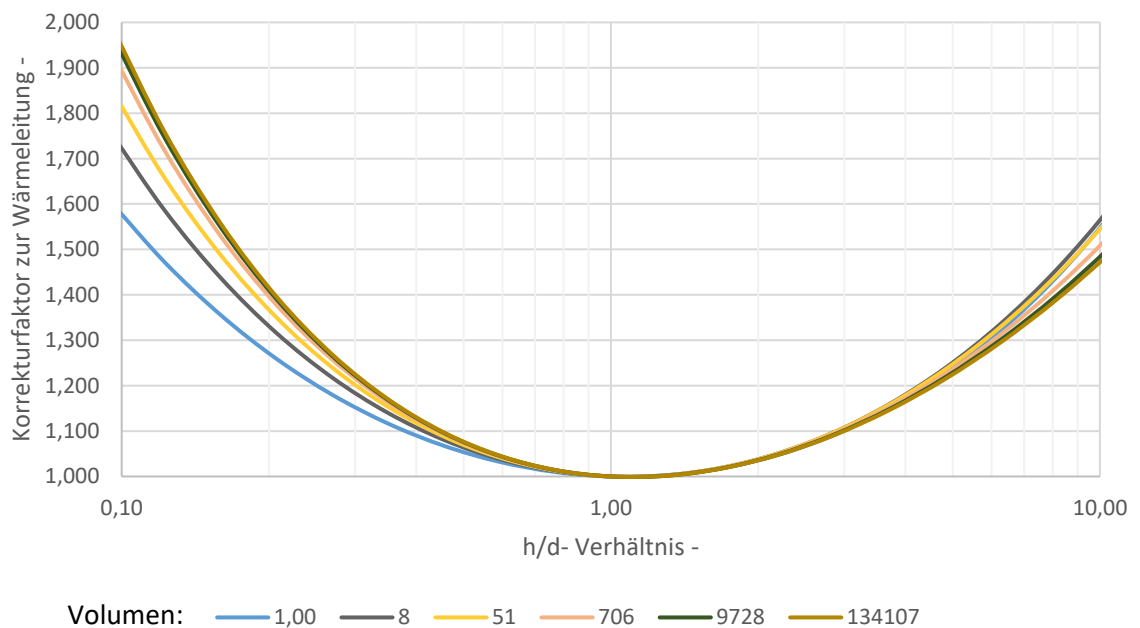
10 In Abbildung 6-3 und 6-4 sind die bezogenen Speicherverluste, abhängig von der Größe und Form, dargestellt. In  
 11 der Abbildung 6-4 ist die Abbildung 6-3 links zur besseren Veranschaulichung dreidimensional dargestellt. Man  
 12 erkennt bei der Variation der Proportionen, dass ab einem h/d-Verhältnis von 1:2 oder 2:1 wesentliche Nachteile in  
 13 der Wärmehaltung entstehen. Der Temperaturverlauf im Speicher wirkt sich abhängig von der Proportion des  
 14 Speichers auf die Wärmeverteilung aus. Am besten erkennt man das in Abbildung 6-3 ,links beim  
 15 Proportionsverhältnis 1:10 und 10:1. Der Speicher mit den kleineren Deckflächen ist mit zunehmender Größe im  
 16 Vorteil.



**Abbildung 6-3: Links: spezifische Wärmeverluste in W/m³, abhängig von der Temperaturverteilung im Speicher; Rechts: Temperaturverteilung im Speicher über die Höhe (Allseitig 40 cm Wärmedämmung mit der WLG= 0,031 W/mK)**



**Abbildung 6-4: spezifische Wärmeverluste in  $W/m^3$ , abhängig von der Temperaturverteilung im Speicher und der Speicherform; das Minimum liegt bei einem h/d- Verhältnis von 1 (Allseitig 40 cm Wärmedämmung mit der  $WLG= 0,031 W/mK$ )**



1

**Abbildung 6-5: Korrekturfaktor  $f_k$  für die Wärmeleitung für nicht optimale Speicherproportionen**

2 In Abbildung 6-5 sind, abhängig von der Speichergröße, Korrekturfaktoren für die Wärmeleitung des Speichers  
 3 gegeben. Bei einer konstanten oder symmetrischen Temperaturverteilung würden sich die Korrekturfaktoren,  
 4 unabhängig vom Volumen, gleich verhalten, was ziemlich gut an der rechten Hälfte der Grafik, bei denen die  
 5 Deckflächen verhältnismäßig klein sind, erkennbar ist.

6 Die Erkenntnisse daraus sind, dass jeder Speicher mit dem zugehörigen Speicherverhalten über die Hülle und die  
 7 Temperaturverteilung mit einer Vergrößerung der Fläche beschrieben werden kann. Die Korrekturfaktoren zum  
 8 Wärmeverlust aufgrund der Speicherhaltung, können im Bereich der Verhältnisse von h/d 1:2 und 5:1 in guter

1 Näherung proportional zum Optimum betrachtet werden. Die Temperaturverteilung im Speicher hat geringe  
 2 Auswirkungen auf die Warmhalteverluste, somit kann man die spezifischen Wärmeverluste als Funktion von vier  
 3 Größe zurückführen: die Temperaturspreizung zwischen dem Mittelwert des Speichers und Umgebungstemperatur,  
 4 die Größe, das h/d- Verhältnis und der Leitwert der Speicherhülle. Das h/d-Verhältnis kann mit einem  
 5 Korrekturfaktor berücksichtigt werden, siehe Tabelle 6-15.

6 Im oben beschriebenen Beispiel verhält sich der spezifische Warmhalteverlust abhängig, vom Speichervolumen  
 7 in der doppellogarithmischen Darstellung, nahezu wie eine Gerade (da die Temperaturverteilung nicht symmetrisch  
 8 ist). In Anlehnung an Tabelle 3-5 kann der Warmhalteverlust auf Basis der spezifischen Warmhalteverluste wie folgt  
 9 definiert werden:

$$\begin{aligned} \phi_{T, \text{Speicher}} &= \frac{(c_1 + c_2 \cdot V^{c_3})}{V} \cdot f_k(h/d) \cdot V \cdot (T_{\text{Speicher, Mittelwert}} - T_{\text{Umgebung}}) \\ &= A_{\text{Speicher}} \cdot U_{\text{Speicher}} \cdot (T_{\text{Speicher, Mittelwert}} - T_{\text{Umgebung}}) \end{aligned} \quad (6-78)$$

10 Die Konstanten  $c_1, c_2$  und  $c_3$  sind abhängig von der Dämmstärke des Speichers, wobei auch punktuelle  
 11 Schwachstellen berücksichtigt werden können. Für Parameterstudien kann man die Konstanten für Speicher im  
 12 Einzelnen anpassen.

**Tabelle 6-15: Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der ungünstigen Speicherformen  $f_k$  -  
 Zwischenwerte können linear interpoliert werden**

h/d-Verhältnis	Speichergröße m <sup>3</sup>					Mittelwert	Standardabweichung
	1	51	706	9728	134107		
0,09	1,609	1,861	1,945	1,985	2,003	1,881	0,145
0,12	1,471	1,656	1,716	1,745	1,757	1,669	0,105
0,16	1,356	1,488	1,529	1,549	1,557	1,496	0,074
0,21	1,259	1,350	1,378	1,391	1,396	1,355	0,050
0,27	1,180	1,240	1,258	1,265	1,269	1,242	0,033
0,35	1,117	1,153	1,164	1,169	1,170	1,155	0,020
<b>0,46</b>	1,068	1,088	1,094	1,096	1,097	<b>1,089</b>	<b>0,011</b>
<b>0,59</b>	1,032	1,042	1,044	1,046	1,046	<b>1,042</b>	<b>0,005</b>
<b>0,77</b>	1,010	1,013	1,014	1,014	1,014	<b>1,013</b>	<b>0,002</b>
<b>1,00</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	<b>1,000</b>	<b>0,000</b>
<b>1,30</b>	1,003	1,002	1,002	1,002	1,002	<b>1,002</b>	<b>0,000</b>
<b>1,69</b>	1,018	1,019	1,019	1,018	1,018	<b>1,018</b>	<b>0,001</b>
<b>2,20</b>	1,047	1,051	1,049	1,048	1,048	<b>1,049</b>	<b>0,001</b>
<b>2,86</b>	1,091	1,097	1,094	1,092	1,091	<b>1,093</b>	<b>0,002</b>
<b>3,71</b>	1,150	1,158	1,153	1,149	1,146	<b>1,151</b>	<b>0,004</b>
<b>4,83</b>	1,226	1,236	1,226	1,218	1,215	<b>1,224</b>	<b>0,007</b>
<b>6,27</b>	1,322	1,330	1,313	1,302	1,296	<b>1,312</b>	<b>0,013</b>
8,16	1,439	1,443	1,417	1,399	1,390	1,417	0,021
10,60	1,582	1,577	1,537	1,510	1,497	1,540	0,034
13,79	1,753	1,733	1,675	1,637	1,618	1,683	0,052

13 In Abbildung 3-14 sind die Speicherkosten dargestellt. Dadurch, dass da die Kosten für kleine Speicher  
 14 verhältnismäßig sehr teuer sind, wird ein vereinfachtes Modell angewendet, um die Nutzbarkeit und die  
 15 Durchführbarkeit abzuschätzen. Bislang wurde in diesem Kapitel eine Momentaufnahme behandelt, jedoch ist auch  
 16 die zeitliche Abfolge wichtig. Im ersten Schritt ist wichtig zu wissen, wie der zeitliche Verlauf des Speicherstands  
 17 ohne äußere Einflüsse ist. Einem saisonalen Speicher, der auf Basis von Sonnenenergie betrieben wird, muss die  
 18 Temperatur nach der Speicherzeit zur Verfügung stehen. Ohne Zuführung von Energie ist ein Abklingverhalten  
 19 gegeben, das umso geringer wird, je geringer die Temperaturspreizung ist. In Anlehnung an den radioaktiven



- 1 Teilchenzerfall, der auch auf Basis von Energie funktioniert, wird folgende Gleichung zur Beschreibung der zeitlichen  
2 Abfolge verwendet:

$$E_{\text{Speicher}}(t) = E_{\text{Speicher},0} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (6-79)$$

- 3 Mit:

$E_{\text{Speicher}}(t)$  Energieinhalt des Speichers mit der Zeit kWh

$E_{\text{Speicher},0}$  Energieinhalt des Speichers zu Beginn kWh

$\lambda$  Parameter 1/h

$t$  Zeit h

- 4 Der Parameter  $\lambda$  kann nur durch Berücksichtigung von Randbedingungen erfolgen. Dazu werden die  
5 Wärmespeicherkapazität des Speichers und der Wärmeverlust benötigt. Der Speicherinhalt zum Zeitpunkt 0 kann mit  
6 Hilfe der Referenztemperatur bestimmt werden, daher gilt:

$$E_{\text{Speicher},0} = V \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{\text{Speicher,Mittelwert}} - T_{\text{Umgebung}}) \quad (6-80)$$

- 7 Nach einer bestimmten Zeit liegt der Wärmeverlust bei  $\phi_{T,\text{Speicher}}$  und es folgt:

$$E_{\text{Speicher},0} - \phi_{T,\text{Speicher}} \cdot t = E_{\text{Speicher},0} \cdot e^{-\lambda t}$$

$$1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}} \cdot t}{E_{\text{Speicher},0}} = e^{-\lambda t}$$

$$\ln\left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}} \cdot t}{E_{\text{Speicher},0}}\right) = -\lambda \cdot t \quad (6-81)$$

$$-\frac{\ln\left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}} \cdot t}{E_{\text{Speicher},0}}\right)}{t} = \lambda$$

- 8 Betrachtet man den Spezialfall nach einer Stunde, erhält man:

$$\lambda = -\ln\left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}}}{E_{\text{Speicher},0}}\right) \quad (6-82)$$

- 9 Eingesetzt in Gleichung (6-79) erhält man für das Speicherverhalten des Warmwasserspeichers die Funktion:

$$E_{\text{Speicher}}(t) = E_{\text{Speicher},0} \cdot e^{\ln\left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}}}{E_{\text{Speicher},0}}\right) \cdot t} \quad (6-83)$$

- 10 oder anders geschrieben:

$$E_{\text{Speicher}}(t) = E_{\text{Speicher},0} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}}}{E_{\text{Speicher},0}}\right)^t \quad \left| \quad \left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}}}{E_{\text{Speicher},0}}\right) \in [0,1] \right. \quad (6-84)$$

- 11 Hier kann der Vergleich zwischen der Entwicklung einer Wertanlage mit dem Energieinhalt im Speicher erstellt  
12 werden. Der verhältnismäßige Wertverlust zu jedem Zeitpunkt ist gleich hoch.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E_{\text{Speicher}}(t) = \begin{cases} \phi_{T,\text{Speicher}} = 0 : E_{\text{Speicher}}(t) = E_{\text{Speicher},0} \\ \phi_{T,\text{Speicher}} > 0 : E_{\text{Speicher}}(t) = 0 \end{cases} \quad (6-85)$$

- 1 Zur Abschätzung des realen Speicherverhaltens ist der Zeitpunkt  $\tau$  interessant, zu dem nur mehr ein bestimmter  
2 Restwert im Speicher vorhanden ist. Dieser kann unter Verwendung von Gleichung (6-84) berechnet werden, wobei  
3 der Restwert  $R$  mit dem ursprünglichen Energieinhalt in Verbindung gesetzt wird:

$$R = E_{\text{Speicher},0} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}}}{E_{\text{Speicher},0}}\right)^\tau \quad \text{mit } R = P \cdot E_{\text{Speicher},0}$$

$$P = \left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}}}{E_{\text{Speicher},0}}\right)^\tau$$

$$\ln P = \tau \cdot \ln \left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}}}{E_{\text{Speicher},0}}\right) \quad (6-86)$$

$$\tau = \frac{\ln P}{\ln \left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}}}{E_{\text{Speicher},0}}\right)}$$

$$\tau = \log_{\left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}}}{E_{\text{Speicher},0}}\right)} P$$

- 4 Zur sinnvollen Erstellung von Tabellenwerken müssen Wertebereiche abgegrenzt werden. Die Energiedichte eines  
5 Speichers ist der erste Anhaltspunkt und  $\rho \cdot c \cdot (T_{\text{Speicher,Mittelwert}} - T_{\text{Umgebung}})$  für diverse Speicher in Abbildung 3-13  
6 gegeben. Konkret für das Beispiel in Abbildung 6-3 ist die Energiedichte bei der Beladung mit 60 °C im Mittel zur  
7 Referenztemperatur:

$$\text{Energiedichte} = \frac{1000 \cdot 4182 \cdot (60 - 20)}{3600 \cdot 1000} = 46,46 \text{ kWh/m}^3 \quad (6-87)$$

- 8 Für einen Speicher mit 200 m<sup>3</sup> wird in Abbildung 6-3 ein spezifischer Wärmeverlust von 4 W/m<sup>3</sup> gegeben. Der  
9 Verhaltensbeiwert ergibt sich zu:

$$p_{\text{Loss}} = \frac{\phi_{T,\text{Speicher}}}{E_{\text{Speicher},0}} = \frac{\text{spez. Wärmeverlust} \cdot V}{\text{Energiedichte} \cdot V} = \frac{\text{spez. Wärmeverlust}}{\text{Energiedichte}} = \frac{0,004}{46,46}$$

$$= 8,6 \cdot 10^{-5} \sim 0,08 \text{ ‰} \quad (6-88)$$

- 10 Somit ist für das Abklingverhalten nicht die Größe des Speichers wesentlich, sondern in erster Linie, wie hoch  
11 die Energiedichte ist und wieviel spezifischer Verluste abhandenkommen. Wie bereits in Kapitel 3.4.1 präsentiert,  
12 ist der spezifische Verlust ganz wesentlich von der Größe beeinflusst. In Gleichung (6-88) besteht die  
13 Einflussmöglichkeit zur Verbesserung des Verhaltensbeiwertes  $p_{\text{Loss}}$  nur über die Größe und mit einer guten  
14 Wärmedämmung.

$$\tau = \log_{\left(1 - \frac{\phi_{T,\text{Speicher}}}{E_{\text{Speicher},0}}\right)} P = \log_{\left(1 - \frac{\text{spez. Wärmeverlust}}{\text{Energiedichte}}\right)} P = \log_{(1 - p_{\text{Loss}})} P \quad (6-89)$$

- 15 Für das aufgezeigte Beispiel in Abbildung 6-4 liegen die Verhaltensbeiwerte zwischen  $2 \cdot 10^{-3}$  und  $7 \cdot 10^{-6}$ . Ein  
16 Verhaltensbeiwert kann für jede Form, Temperaturverteilung, Wärmedämmung und Größe erstellt werden.  
17 Nachfolgend sind 2 Tabellen für die Verweilzeit im Speicher.

**Tabelle 6-16: Verweilzeit bis zum Eintreten des Restwertes in Abhängigkeit des Verhaltensbeiwertes und der Höhe des Speicherinhalts (= Restwert) in Stunden**

Verhaltensbeiwert $p_{Loss}$	Restwert P							
	1	0,875	0,75	0,625	0,5	0,375	0,25	0,125
1,00E-01	0,00E+00	1,27E+00	2,73E+00	4,46E+00	6,58E+00	9,31E+00	1,32E+01	1,97E+01
1,00E-02	0,00E+00	1,33E+01	2,86E+01	4,68E+01	6,90E+01	9,76E+01	1,38E+02	2,07E+02
1,00E-03	0,00E+00	1,33E+02	2,88E+02	4,70E+02	6,93E+02	9,80E+02	1,39E+03	2,08E+03
1,00E-04	0,00E+00	1,34E+03	2,88E+03	4,70E+03	6,93E+03	9,81E+03	1,39E+04	2,08E+04
1,00E-05	0,00E+00	1,34E+04	2,88E+04	4,70E+04	6,93E+04	9,81E+04	1,39E+05	2,08E+05
1,00E-06	0,00E+00	1,34E+05	2,88E+05	4,70E+05	6,93E+05	9,81E+05	1,39E+06	2,08E+06
1,00E-07	0,00E+00	1,34E+06	2,88E+06	4,70E+06	6,93E+06	9,81E+06	1,39E+07	2,08E+07

**Tabelle 6-17: Verweilzeit bis zum Eintreten des Restwertes in Abhängigkeit des Verhaltensbeiwertes und der Höhe des Speicherinhalts (= Restwert) in Tagen**

Verhaltensbeiwert $p_{Loss}$	Restwert P							
	1	0,875	0,75	0,625	0,5	0,375	0,25	0,125
1,00E-01	0,00	0,05	0,11	0,19	0,27	0,39	0,55	0,82
1,00E-02	0,00	0,55	1,19	1,95	2,87	4,07	5,75	8,62
1,00E-03	0,00	5,56	11,98	19,57	28,87	40,85	57,73	86,60
1,00E-04	0,00	55,64	119,86	195,83	288,80	408,66	577,59	866,39
1,00E-05	0,00	556,38	1198,67	1958,34	2888,10	4086,77	5776,20	8664,30
1,00E-06	0,00	5563,81	11986,75	19583,47	28881,12	40867,87	57762,24	86643,35
1,00E-07	0,00	55638,08	119867,52	195834,84	288811,31	408678,84	577622,62	866433,93

1 Die Werte der Tabellen 6-16 und 6-17 zeigen die Verweilzeiten, die zur Vordimensionierung für Wärmespeicher  
 2 herangezogen werden können. Zunächst muss man wissen, wieviel Energie über welche Verweilzeit zur Verfügung  
 3 gestellt werden muss. Als Beispiel wird das Referenzprojekt aus Anhang B verwendet, gemäß Tabelle 5-9 sind 10.000  
 4 kWh an Wärmeenergie erforderlich und in der Abbildung 5-11 erkennt man die Verweilzeit, das ist die Zeit zwischen  
 5 den Schwerpunkten der Flächen oberhalb und unterhalb der Abszisse, die ein halbes Jahr (rund 183 Tage) beträgt.  
 6 Der Verhaltensbeiwert liegt nach Gleichung (6-88) bei  $8,6 \cdot 10^{-5}$  und man sieht aus Tabelle 6-17 schnell, dass diese  
 7 Konfiguration Verluste von 30 bis 40 % haben wird, ein genauer Wert muss errechnet werden. Das geht durch  
 8 Umformen der Gleichung (6-89):

$$\tau = \log_{(1-p_{Loss})} P$$

$$\tau = \frac{\ln P}{\ln(1-p_{Loss})}$$

$$P = e^{\tau \cdot \ln(1-p_{Loss})} \quad (6-90)$$

$$P = e^{183,24 \cdot \ln(1-8,6 \cdot 10^{-5})}$$

$$P = 0,6854 \rightarrow 1 - P = 0,3146 \approx 32 \%$$

9 Es sind 32 % Vorhalteverluste vorhanden, die durch Überdimensionierung berücksichtigt werden müssen. Die  
 10 erforderliche Speichergröße zur Speicherung von 10.000 kWh für ein halbes Jahr liegt demnach bei  $\frac{10000}{46,46} \cdot \frac{1}{0,6854} =$   
 11  $314 \text{ m}^3$ . Zur Gegenprobe verwendet man wieder die Abbildung 6-4 und liest  $3,2 \text{ W/m}^3$  ab. Der Verhaltensbeiwert  
 12 liegt bei  $\frac{0,0032}{46,46} = 6,89 \cdot 10^{-5}$  somit ist das in einer ähnlichen Größenordnung, wie bei der Abschätzung. Nach erneutem  
 13 Einsetzen in die dritte Zeile aus Gleichung (6-90) erhält man einen Restwert und den damit verbundenen Verlust  
 14 von  $e^{183,24 \cdot \ln(1-6,89 \cdot 10^{-5})} = 0,7389 \rightarrow 1 - P = 0,2611 \approx 26 \%$ . Die Speicherdimension ist mit diesem Zugang auf der

sicheren Seite abgeschätzt. Bei Speichern mit abweichender Geometrie, müssen die Verhaltensbeiwerte mit dem Korrekturfaktor aus Tabelle 6-15 multipliziert werden.

Ein zweites Beispiel ist ein Vakuumspeicher [54], der gesamtheitlich in ein Haus integriert ist, wodurch die Abwärme des Speichers in das Haus geht. Dieser Tank kann mit bis zu 110°C beschickt werden und nimmt dementsprechend ziemlich viel Energie auf. Derzeit sind Stahltanks, die mit Hilfe von Vakuum gedämmt werden, in der Größenordnung von 50 m<sup>3</sup> am Markt erhältlich. Speziell große Speicher sind für industrielle Zwecke gefertigt. Der U-Wert der Hülle beträgt gemäß Herstellerangaben 0,05 W/m<sup>2</sup>K. Die Kosten für den Speicher betragen gem. Herstellerangaben nur für einen 30 m<sup>3</sup> Stahlspeicher 37.145,00€, ohne Installation und Mehrwertsteuer.

Für ein gewöhnliches Einfamilienhaus kommt aufgrund der Dimensionen und der Bauordnung ein Speicher bis zu 40m<sup>3</sup> (H=12,0m und D=3,0m → Außenvolumen= 84,78 m<sup>3</sup>, Außenfläche= 127,17m<sup>2</sup>, A/V-Verhältnis=127,17/40=3,179, H/D-Verhältnis=4) sinnvoll in Frage. Zur Vordimensionierung des Speichers muss der Verhaltensbeiwert gemäß Gleichung (6-88) berechnet werden:

$$p_{Loss} = \frac{\phi_{T,Speicher}}{E_{Speicher,0}}$$

$$p_{Loss} = \frac{A_{Speicher} \cdot U_{Speicher} \cdot (T_{Speicher,Mittelwert} - T_{Umgebung})}{V \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{Speicher,Mittelwert} - T_{Umgebung})}$$

$$p_{Loss} = \frac{A_{Speicher} \cdot U_{Speicher}}{V \cdot \rho \cdot c}$$

$$p_{Loss} = \frac{A_{Speicher}}{V} \cdot \frac{U_{Speicher}}{\rho \cdot c}$$

$$p_{Loss} = 3,179 \cdot \frac{0,05}{1000 \cdot 4182}$$

$$p_{Loss} = 3,801 \cdot 10^{-8} \frac{1}{sek}$$

Der Verhaltensbeiwert ist durch die Abwandlung der Gleichung (6-88) in Sekunden gegeben.

$$\tau = \frac{\ln P}{\ln(1 - p_{Loss})}$$

$$\tau = \frac{\ln 0,5}{\ln(1 - 3,801 \cdot 10^{-8})}$$

$$\tau = \frac{\ln 0,5}{\ln(1 - 3,801 \cdot 10^{-8})}$$

$$\tau = 1.8236 \cdot 10^7 \text{ sek} \cong 211 \text{ Tage}$$

Der Wärmespeicher hat durch die hocheffiziente Vakuumwärmedämmung große Vorteile bei der Wärmehaltung. Nach über 200 Tagen würde der Speicher ohne Entnahme nur mehr 50 Prozent der ursprünglichen Speichermenge besitzen. Die maximale Speichermenge beträgt:

$$E_{Speicher,0} = V \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{Speicher,Mittelwert} - T_{Umgebung})$$

$$E_{Speicher,0} = 40 \cdot \frac{1000 \cdot 4182}{1000 \cdot 3600} \cdot (110 - 20) = 4182 \text{ kWh}$$

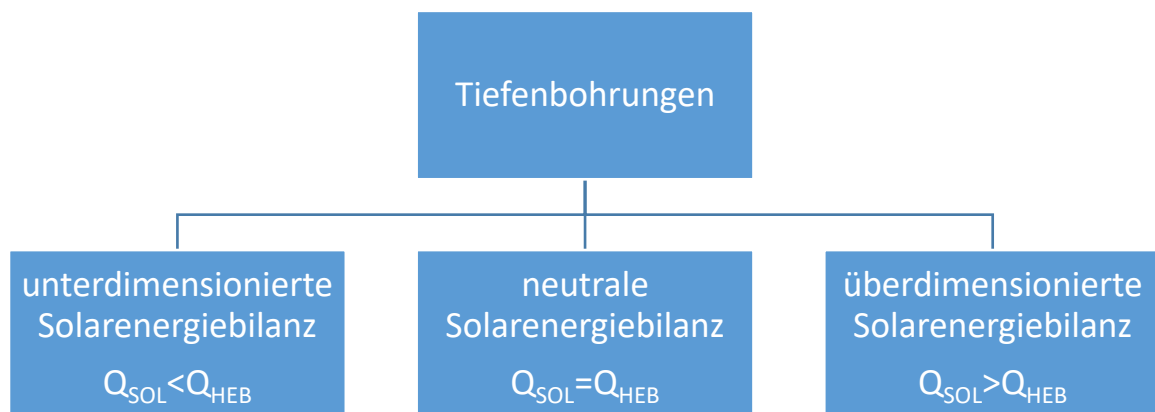
Zum Vergleich wurden in [29] Anlagenkonfigurationen gemäß Abbildung 3-7, mit Speichern bis zu 40 m<sup>3</sup> Inhalt und 90 m<sup>2</sup> Solarkollektor berechnet. Diese Anlagenkonfigurationen speichern rund die Hälfte der Wärmeenergie über längere Zeit, die andere Hälfte wird im Bedarfsfall über steil aufgerichtete Solarkollektoren im Winter gewonnen.

## 6.2. Tiefenbohrungen

Sensible Wärmespeicher, die eine Durchschnittstemperatur über der Umgebungstemperatur besitzen, haben den Nachteil, dass Wärmeverluste entstehen. Es gibt allerdings keine realen Speicherbehälter, bei denen adiabatische

1 Randbedingungen vorliegen. Werden Wärmeströmungen in einem Medium um eine bestimmte Referenztemperatur  
 2 durchgeführt, so verhalten sich die Randbedingungen adiabatisch, da nach einem gewissen Abstand vom  
 3 Einleitungspunkt, keine Potentialdifferenz herrscht und die Wärmeenergie kann, im Gegensatz zu  
 4 Hochtemperaturspeichern, vorgehalten werden. Der Speicher arbeitet ohne Dämmung. Bei einer Tiefenbohrung wird  
 5 in der Regel eine Betriebsweise gewählt, bei der, wie bei einem Brunnen, eine Potentialabsenkung erfolgt und eine  
 6 Energiezufluss-Entnahme erfolgt.

7 Nun stellt sich die Frage, welchen Zweck eine Energiespeicherung im Untergrund haben soll, wenn Wärmeenergie  
 8 sowieso zuströmt. In erster Linie wird mit einer Zuführung von Sonnenenergie die Temperatur gehoben, sodass  
 9 zumindest die Referenztemperatur erreicht wird. Der Mehrnutzen liegt gegenüber den wärmeentziehenden  
 10 Tiefenbohrungen, in der Verbesserung der Leistungszahl von Wärmepumpen. Denkt man weiter, ist grundsätzlich  
 11 eine überdimensionierte Einspeisung an Wärmeenergie möglich, um die Leistungszahl zusätzlich zu begünstigen.



12 **Abbildung 6-6: Unterscheidung der Betriebsweise von Wärmespeichern nach der Bilanzierung von Sonnenenergie zur Wärmebilanz**

### 6.2.1. Wirkungsprinzip von Tiefenbohrungen und Leistungszahlen für Wärmepumpen

13 Mit welcher Verbesserung kann nun gerechnet werden? Tiefenbohrungen ohne Zuführung von Sonnenenergie sind  
 14 so zu dimensionieren, dass es über viele Jahre zu keiner Temperatur unter 0°C im Erdboden kommt. Durch eine  
 15 Absenkung unter den Gefrierpunkt bilden sich Eislinsen, die zur Verschlechterung der Wärmeleitung führen und die  
 16 thermischen Eigenschaften des Bodens verschlechtern. Zur Förderung der erforderlichen Wärmeenergie, muss beim  
 17 Einfrieren des Bodens die Temperaturgradienten zusätzlich vergrößert werden und die Leistungszahl sinkt. Durch die  
 18 Nutzung kann man in allen drei Fällen eine Entnahmephase beschreiben, die annäherungsweise einer Sinuswelle  
 19 entspricht.

$$Q_{HEB}(t) = \sin(t \cdot c_1) \cdot c_2 + c_3 \quad (6-94)$$

20 Die Beschreibung der durchschnittlich einfallenden Sonnenenergie, die an einem Tag einfällt, kann ohne genaue  
 21 Kenntnisse über den Ertrag, in Anlehnung an die Erdumlaufbahn auch sinusförmig definiert werden. Der reale  
 22 Energieeintrag weicht nahezu ausschließlich wegen der Wetterlage ab:

$$Q_{SOL}(t) = \sin(t \cdot c_4) \cdot c_5 + c_6 \geq 0 \quad (6-95)$$

23 Die erste Annahme für eine knapp bemessene Tiefenbohrung ist, dass die mittlere Temperatur der Tiefenbohrung  
 24 zwischen der Referenztemperatur des Bodens und der niedrigsten zu erwarteten Temperatur liegt.

$$T_{min} \leq T_{TB,unterdim.} \leq T_{ref} \quad (6-96)$$

25 Mit der zugrunde gelegten Sinusfunktion folgt, dass der Mittelwert genau im arithmetischen Mittel liegt und es  
 26 folgt:

$$T_{TB,unterdim.} = \frac{T_{ref} + T_{min}}{2} \quad (6-97)$$

1 Bei der neutralen Bilanzierung liegt der Mittelwert der Temperatur genau bei der ursprünglichen Temperatur, da  
2 genau so viel Energie entnommen, wie zugeführt wurde:

$$T_{TB,neutral.} = T_{ref} \quad (6-98)$$

3 Der Gewinn bei einer Einspeisung liegt bei der Erhöhung der Entnahmetemperatur und kann auf Basis des  
4 energetischen Ansatzes nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\begin{aligned} T_{TB,Gewinn} &= T_{TB,neutral.} - T_{TB,unterdim.} \\ T_{TB,Gewinn} &= T_{ref} - \frac{T_{ref} + T_{min}}{2} = \frac{T_{ref} - T_{min}}{2} \end{aligned} \quad (6-99)$$

5 Unter realen Bedingungen ist die Referenztemperatur vom Untergrund so hoch wie die langjährige  
6 Jahresdurchschnittstemperatur an der Oberfläche. In Wien sind das zum Beispiel, gemäß Angaben der Zentralanstalt  
7 für Meteorologie und Geodynamik, um die 10°C und mit der geothermischen Tiefenstufe steigt die Temperatur um  
8 rund 3°C pro 100 Meter Überlagerungstiefe an. Auf der sicheren Seite angenommen, soll die Referenztemperatur  
9 10°C betragen. Die Mindesttemperatur wird mit 0°C angenommen und es wird die erforderliche  
10 Temperaturspreizung um 5 Kelvin reduziert. In Abbildung 2-9 ist der Carnot'sche Wirkungsgrad dargestellt.  
11 Angenommen die Vorlauftemperatur zur Bereitstellung des Warmwassers soll 65°C betragen, jene für den  
12 Heizwärmebedarf 35°C und die Entnahmetemperatur der Sohle liegt bei 10°C statt 5°C, wird eine Verbesserung der  
13 Leistungszahl durch Verminderung der Spreizung bewirkt. Das Ergebnis ist unter Berücksichtigung der Grundlagen  
14 hergeleitet.

$$\begin{aligned} COP_{Carnot1} &= \frac{T_{w1}}{T_{w1} - T_{k1}} \\ COP_{Carnot2} &= \frac{T_{w2}}{T_{w2} - T_{k2}} \end{aligned} \quad (6-100)$$

$$COP_{Verbesserung} = \frac{T_{w1}}{T_{w1} - T_{k1}} - \frac{T_{w2}}{T_{w2} - T_{k2}} \quad | \quad T_{w1} = T_{w2} \wedge T_{k1} - T_{k2} = K$$

15 Es folgt mit der Konstante K für die Verbesserung der Temperaturspreizung eingesetzt:

$$COP_{Verbesserung} = \frac{T_{w1} \cdot (T_{w1} - T_{k2}) - T_{w1} \cdot (T_{w1} - T_{k1})}{(T_{w1} - T_{k1}) \cdot (T_{w1} - T_{k2})} \quad (6-101)$$

$$COP_{Verbesserung} = \frac{T_{w1} \cdot (T_{w1} - T_{k1} - K) - T_{w1} \cdot (T_{w1} - T_{k1})}{(T_{w1} - T_{k1}) \cdot (T_{w1} - T_{k1} - K)}$$

16 mit der Zusammenfassung der Temperaturspreizungen zu:

$$\Delta T_1 = (T_{w1} - T_{k1}) \quad (6-102)$$

17 ergibt sich:

$$COP_{Verbesserung} = \frac{T_{w1} \cdot (\Delta T_1 - K) - T_{w1} \cdot \Delta T_1}{\Delta T_1 \cdot (\Delta T_1 - K)} \quad (6-103)$$

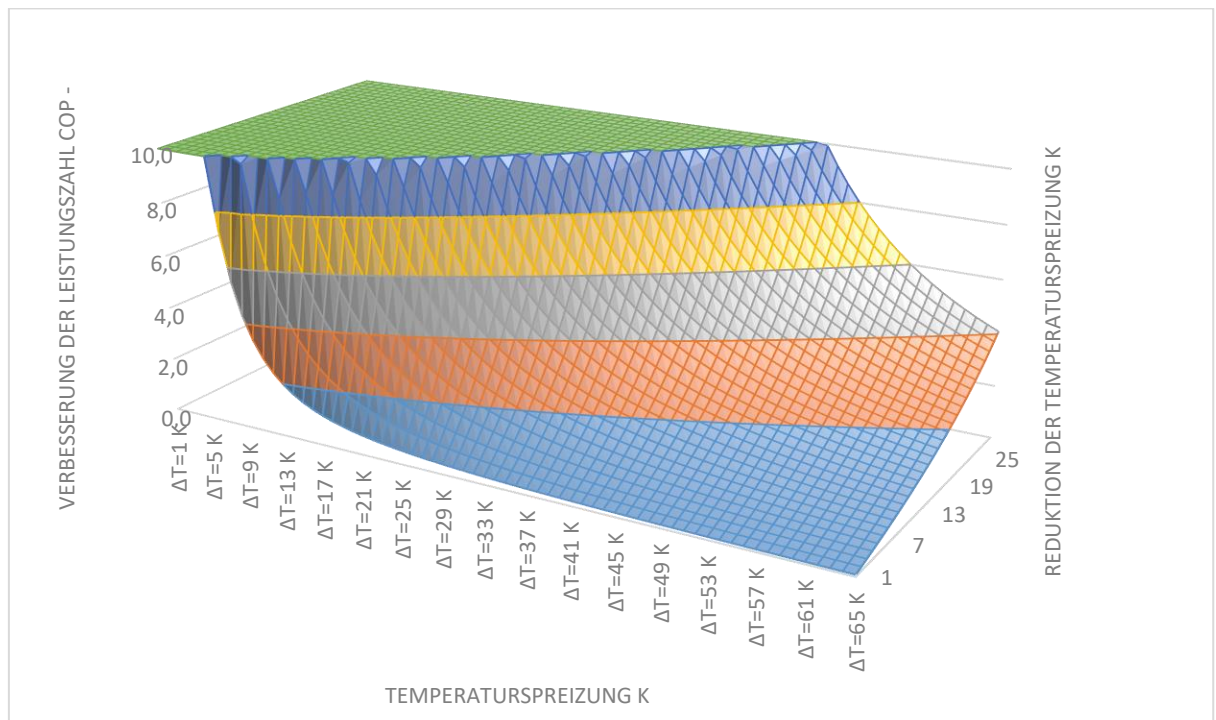
18 Durch das Einsetzen der Werte in Celsius, wird im Zähler die Temperatur um die Differenz zum absoluten  
19 Nullpunkt vergrößert:

$$COP_{Verbesserung} = \frac{(T_{w1} + 273,15) \cdot K}{\Delta T_1 \cdot (\Delta T_1 - K)} \quad | \quad K \in [0, \Delta T_1[ \wedge T_{w1} \in [35, 65] \wedge \Delta T_1 \in [0, 65] \quad (6-104)$$

1 Die möglichen Ergebnisse durch eine Erhöhung der Entnahmetemperatur sind:

$$COP_{Verbesserung} = \begin{cases} K = 0 \rightarrow COP_{Verbesserung} = 0 \\ \Delta T_1 > K > 0 \rightarrow COP_{Verbesserung} > 0 \\ \Delta T_1 = K \rightarrow COP_{Verbesserung} = \infty \end{cases} \quad (6-105)$$

2 In der folgenden Abbildung 6-7 ist die Verbesserung der Leistungszahl nach Gleichung (6-104) bei einer maximalen  
3 Temperatur von  $T_{w1} = 35^\circ\text{C}$  dargestellt. Je kleiner die Temperaturspreizung zwischen erforderlichem  
4 Temperaturniveau und vorhandenem Temperaturniveau liegt, desto effizienter wirkt auch die Reduktion dieser.



5

**Abbildung 6-7: Verbesserung der theoretischen Leistungszahl nach Carnot bei Reduktion der Temperaturspreizung mit der Annahme (auf der sicheren Seite liegend), dass die maximale Temperatur  $35^\circ\text{C}$  beträgt**

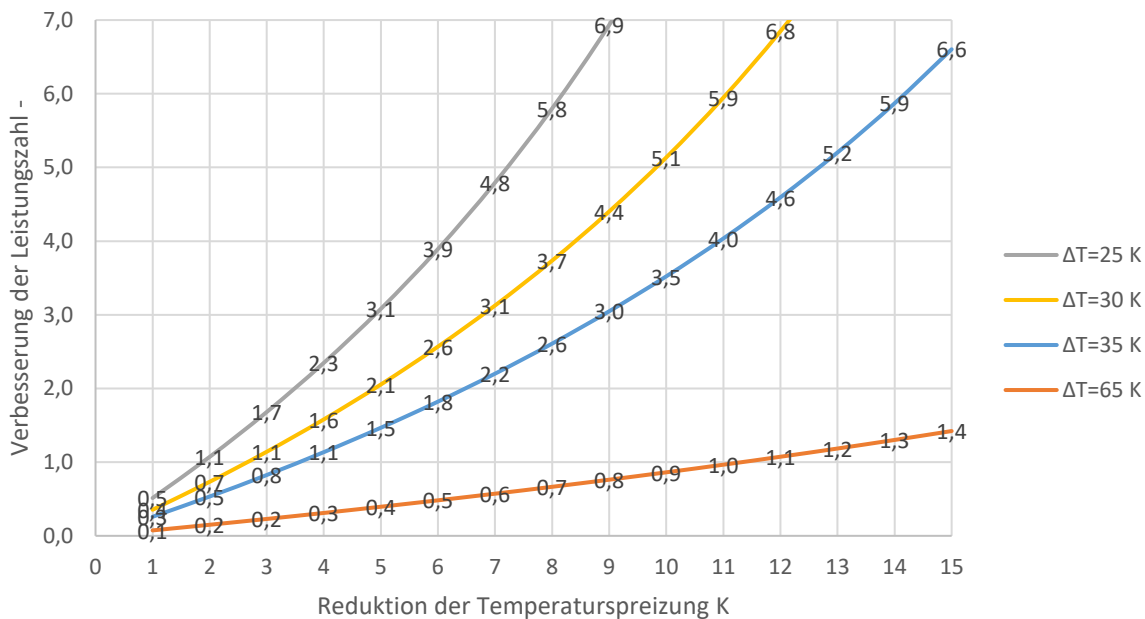
6 Bei einer erhöhten Zieltemperatur steigt die Effizienz des thermodynamischen Prozesses und die Leistungszahl  
7 wird besser. Bei einer Zieltemperatur  $T_{w1} = 65^\circ\text{C}$  wären die dargestellten Werte um rund 10 Prozent höher.

$$\frac{65 + 273,15}{35 + 273,15} = 9,7\% \quad (6-106)$$

8 In Abbildung 6-8 sind speziell 4 Temperaturspreizungen mit Werten aus der Abbildung 6-7 herausgezeichnet. Die  
9 effizienteren 3 Kurven sind für die Erzeugung des Heizwärmebedarfes anzuwenden und die schlechtere Kurve ist für  
10 die Erzeugung des Warmwasserbedarfes. Zur Anwendung muss beachtet werden, dass der Carnot'sche Wirkungsgrad  
11 um den Faktor 2 vom realen Wirkungsgrad abweicht. Aus diesem Grund müssen zur richtigen Anwendung alle Werte  
12 halbiert werden.

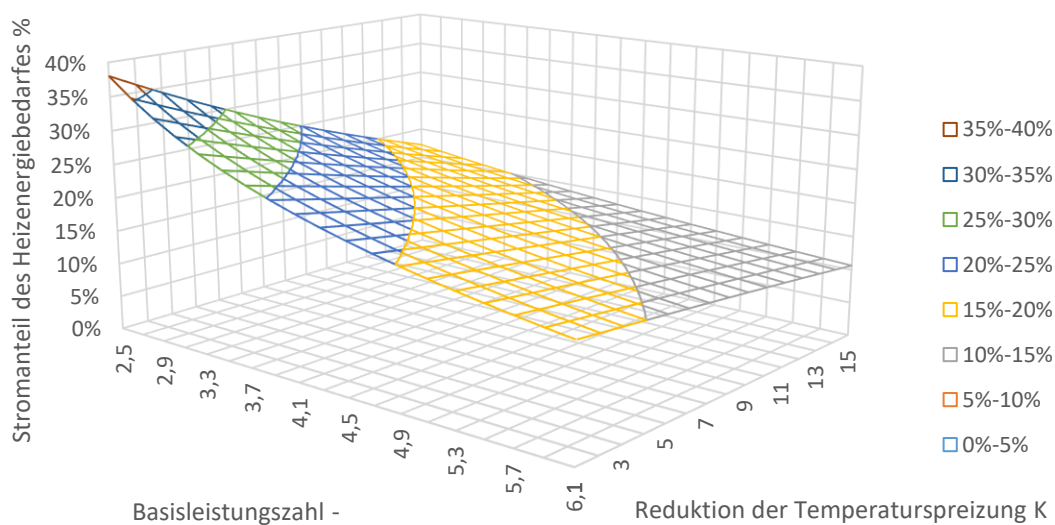
13 Das Ergebnis für die zuvor gestellte Frage ist nach Abbildung 6-8 zu beantworten. Das Temperaturniveau für den  
14 Heizenergiebedarf liegt bei  $35^\circ\text{C}$  in der Ausgangssituation und ist die Referenztemperatur des Bodens  $5^\circ\text{C}$ , ist die  
15 Temperaturspreizung mit  $30^\circ\text{C}$  gegeben. Mit der entsprechenden Linie erkennt man, dass bei einer Reduktion der  
16 Temperaturspreizung von 5 Kelvin, eine theoretische Verbesserung der Leistungszahl von 2,1 eintritt. Eine reale  
17 Maschine, die am Markt erhältlich ist, wird nach Kapitel 2.4.1 die halbe Verbesserung umsetzen können. Im Vergleich

- 1 ist in Anhang A ein Datenblatt einer Wärmepumpe, bei der im Wesentlichen das gleiche Ergebnis erzielt wird. Im
- 2 Hochtemperaturbereich ist die Wärmepumpe gering effizient, die Reduktion der Spreizung ist zwar nicht
- 3 wirkungslos, aber das Optimierungspotenzial ist erschöpfend.



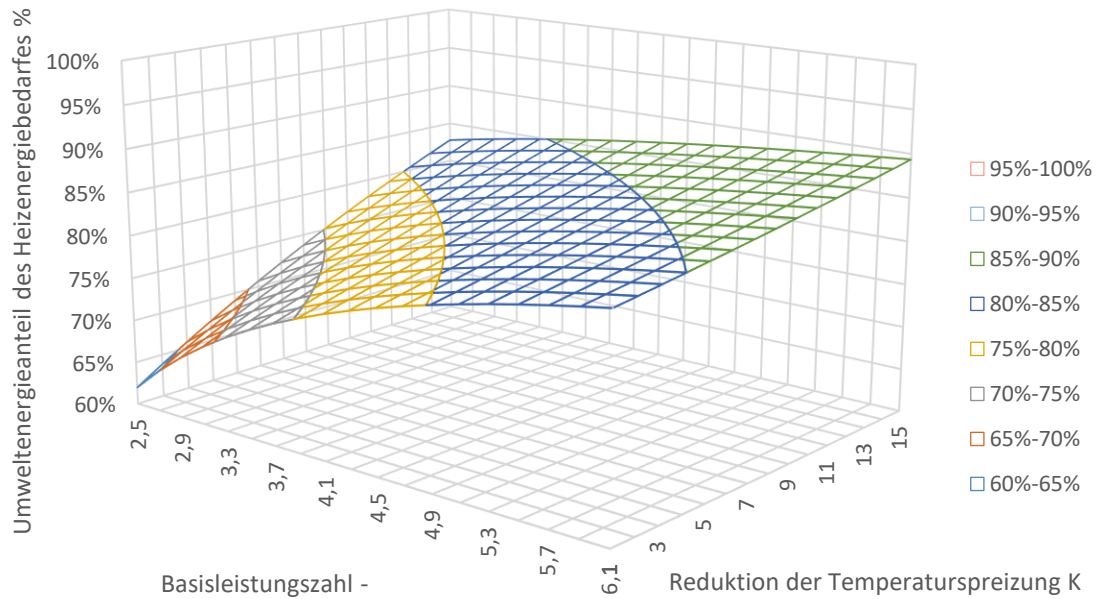
**Abbildung 6-8: Verbesserung der theoretischen Leistungszahl nach Carnot bei Reduktion der Temperaturspreizung, mit der Annahme (auf der sicheren Seite liegend), dass die maximale Temperatur 35 °C beträgt (vgl. Abbildung 6-32)**

- 4 Durch eine Verbesserung der Leistungszahl wird eine Verbesserung des Endenergiebedarfs erzielt, was wiederum
- 5 zur Reduktion des Primärenergiebedarfs führt und in weiterer Folge zur Reduktion von Treibhausgasen. Nachfolgende
- 6 Abbildungen 6-9 und 6-10 wurden auf Basis von Abbildung 6-8 erstellt. Hierbei wurde die Annahme getroffen, dass
- 7 eine Wärmepumpe eine bestimmte Leistungszahl besitzt und diese Leistungszahl um die Hälfte der theoretischen
- 8 Werte verbessert wurde. Dieser Ansatz führt zu Ergebnissen, die später in diesem Kapitel zur Plausibilisierung
- 9 angewendet werden können.

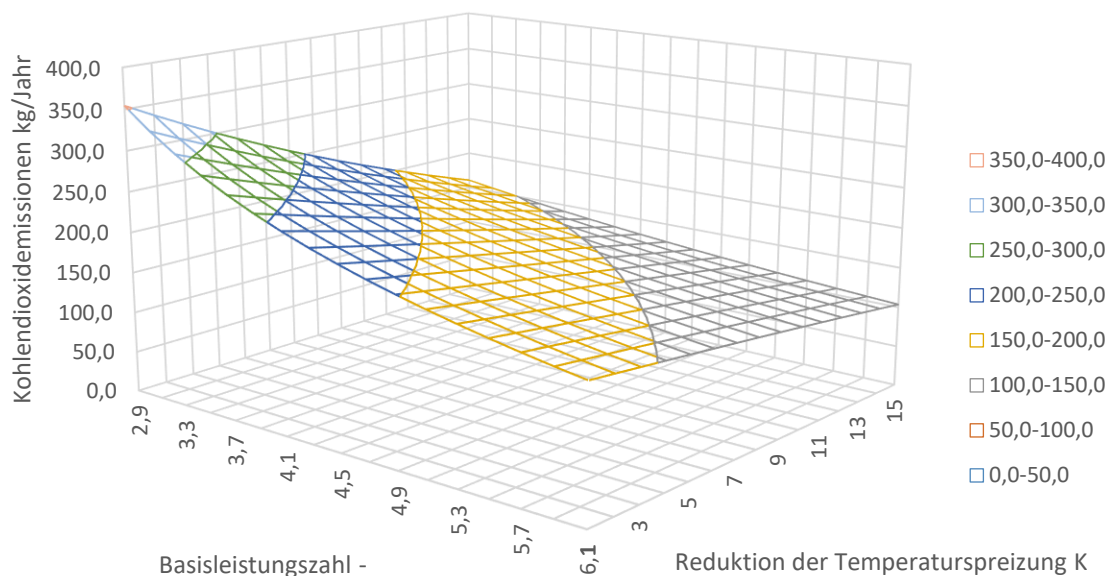


**Abbildung 6-9: Stromanteil des Heizenergiebedarfes, in Abhängigkeit der Basisleistungszahl der Wärmepumpe und den Auswirkungen der verbesserten Leistungszahl**





**Abbildung 6-10: Umweltenergieanteil des Heizenergiebedarfes, in Abhängigkeit der Basisleistungszahl der Wärmepumpe und den Auswirkungen der verbesserten Leistungszahl**



**Abbildung 6-11: Kohlendioxidemission in Abhängigkeit der Basisleistungszahl der Wärmepumpe und den Auswirkungen der verbesserten Leistungszahl bei 8.000 kWh Heizenergiebedarf und einer Kohlendioxidemission von 116,46 g/kWh gemäß EVN**

1 Die Kohlendioxidemissionen in der Abbildung 6-11 ergeben sich aus der Abbildung 6-9 und stehen im direkten  
 2 proportionalen Verhältnis. Bei einer Leistungszahl von 3,7 einer Wärmepumpe, kann durch eine Steigerung der  
 3 Entnahmetemperatur von 5 Kelvin eine Reduktion der Emissionen von 272 kg/Jahr auf 231 kg/Jahr gesenkt werden,  
 4 das entspricht also einer Senkung von 41 kg/Jahr, was wiederum einer Senkung von 15% bedeutet.

5 Nachdem die Technologie grundsätzlich brauchbar erscheint, ergibt sich die nächste Frage und zwar, wie  
 6 Tiefenbohrungen mit überdimensionierten Energiebilanzen funktionieren können. Die Wirkungsweise der  
 7 Wärmepumpe wurde bislang ausführlich hergeleitet, nun muss die praktische Durchführbarkeit mit Hilfe eines  
 8 Modells nachgewiesen werden, das auf die Ausbreitung der Wärme im Untergrund eingeht.

### 6.2.2. Allgemeine Einflussfaktoren auf Tiefenbohrungen und deren Wirkungen

1 Im Vergleich zu Langzeitwärmespeichern aus Wasser, sind Tiefenbohrungen verhältnismäßig günstig, die Kosten  
2 für die Herstellung der Bohrung mit Verlegung und Verfüllung der Leitungen, Baustelleneinrichtung und  
3 Abraumbeseitigung, belaufen sich auf ungefähr 50-80 €/Steigmeter (inkl. MwSt.) je nach Untergrundverhältnis. Zum  
4 Beispiel sind Bohrungen im Granit- und Gneishochland aufwändiger, als eine Bohrung in sedimentären Schichten, bei  
5 denen der Vortrieb mit einer größeren Geschwindigkeit durchgeführt werden kann.

6 Die geologische Bundesanstalt [55] in Österreich gibt zu den Untergrundverhältnissen, auf Basis umfangreichen  
7 Kartenmaterials, genauere Auskünfte über die zu erwartenden Untergrundverhältnisse. Ein zweiter großer  
8 Einflussfaktor auf Tiefenbohrungen sind die Grundwasserverhältnisse im Untergrund, wozu es grundlegende,  
9 österreichweite Angaben gibt. Das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft,  
10 stellt gemeinsam mit dem Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen auf ihrer Homepage [56] Daten zur Verfügung.  
11 Beide Grundlagen können nur in Kombination beurteilt werden, wobei immer die Grundwasserverhältnisse besondere  
12 Auswirkungen haben.

13 Auf der überwiegenden Fläche Österreichs sind durch die geologischen Verhältnisse lokale Grundwasserkörper  
14 vorhanden und dadurch können keine oder nur spärliche Daten zu den Grundwasserverhältnissen vorhanden sein. In  
15 Wien gibt es ein Baugrunderkaster, aus dem, gegen geringes Entgelt, zusätzlich Daten erhoben werden können. Für  
16 das Stadtgebiet von Wien sind derzeit 58.000 Profile [57] mit unterschiedlichen Tiefenstufen vorhanden. Durch einen  
17 planenden Fachmann oder einem ausführenden Unternehmen, kann im Vorfeld gut beurteilt werden, ob eine  
18 Ausführung möglich ist. Im ländlichen Gebiet ist in den meisten Fällen eine Probebohrung mit geologischer und  
19 hydrologischer Beurteilung erforderlich. Durch die fehlende Dichte der Grundlagen, ist das Risiko im ländlichen  
20 Gebiet höher als in der Stadt. Das größte Risiko besteht beim Abteufen der Bohrung, denn durch das gewählte,  
21 kostengünstige Bohrverfahren, der Spülbohrung, ist keine Sicherung der Bohrlochwand vorhanden. Beim Erreichen  
22 einer stark wasserführenden Schicht, wird die Bohrung durch das ausführende Unternehmen unterbrochen, da die  
23 Bohrlochwand einstürzen kann und das Bohrwerkzeug mit hohem Risiko festgehalten werden kann. Liegt die stark  
24 wasserführende Schicht ausreichend weit unten, kann als Alternative eine zusätzliche Bohrung gesetzt werden.

25 Ist die Bohrung durchführbar, kann durch eine Grundwasserströmung, vor allem im Porengrundwasser, das  
26 Temperaturverhältnis beeinflusst werden (vgl. [58]). Dies hat in den meisten Fällen positiven Einfluss auf die  
27 mögliche Entnahmeleistung, da Wasser eine hohe spezifische Wärmespeicherkapazität besitzt und somit das  
28 abgesenkte Temperaturfeld, aus dem Energie entnommen wird, schneller regeneriert. Dafür wird, über das Jahr  
29 betrachtet, eine sinusförmige Energieabsenkung generiert, die abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit des  
30 Grundwassers, im Untergrund fortgepflanzt wird. Eine Einspeisung von Wärmeenergie zur Verbesserung der  
31 Bilanzierung ist grundsätzlich möglich, da auch bei einem stärker durchlässigen Untergrund, Wärmeströmungen mit  
32 geringer Geschwindigkeit übertragen werden. Aufgrund der saisonalen Entwicklung und permanenten Verzerrung des  
33 Temperaturfelds, sollten bei der Einspeisung von Wärmeenergie jedoch genauere Untersuchungen durchgeführt  
34 werden, damit ein tatsächlicher Mehrnutzen der Maßnahme gegeben ist.

### 6.2.3. Spezielle Einflussfaktoren auf Tiefenbohrungen und deren Wirkungen

35 Nachdem die allgemeinen Einflussfaktoren beschrieben wurden, werden nun spezielle Einflussfaktoren auf Basis  
36 des beschriebenen Gebäudemodells, unter Verwendung diverser Parameter, durchgeführt. Die Funktionsweise des  
37 verwendeten Modells wurde bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben, die detaillierte Implementierung in Simulink ist im  
38 Anhang C beschrieben. Die zwei wesentlichen Kernstücke des Modells sind das Solarkollektormodell und das  
39 Tiefenbohrungsmodell. Versteht man die Wirkungsprinzipien dahinter, kann man gut geeignete Regelungen  
40 entwerfen und Optimierungen durchführen. Folgende Parameterstudien wurden durchgeführt:

41

Tabelle 6-18: Parameterstudien des kombinierten Modells

Modellvariation	Tiefenbohrungsmodell	Solarkollektor	Entnahme	Simulationsdauer	Abbildung
stetige Entnahme aus der Tiefenbohrung	Nach [52]	kein Eintrag	Sinusförmige Entnahme von 9.000 kWh pro Jahr	20 Jahre	6-14
stetige Entnahme aus der Tiefenbohrung-Langzeitversuch	Nach [52]	kein Eintrag	Sinusförmige Entnahme von 9.000 kWh pro Jahr	200 Jahre (nach 120 Jahren sind die Ergebnisse unbrauchbar)	6-15
Stetiger Eintrag in das Tiefenbohrungsmodell	Nach [52]	Sinusförmiger Energieeintrag von 5.000 kWh pro Jahr	Keine Entnahme	20 Jahre	6-16
Harmonische Schwingung für Energieein- und austrag	Nach [52]	Sinusförmiger Energieeintrag von 5.000 kWh pro Jahr	Sinusförmige Entnahme von 5.000 kWh pro Jahr	20 Jahre	6-17, 6-12, 6-13
Realer Energieein- und austrag	Nach [52]	Nach [24]	Red. Modell, Entnahme nach Abbildung 6-22	1 Jahr	6-20

### 1 Auswirkungen bei stetiger Entnahme

2 Die stetige Entnahme ist die derzeit häufigste Verwendung von Tiefenbohrungen. Als ersten Versuchsaufbau wird  
3 über 20 Jahre eine Simulation durchgeführt, bei der jedes Jahr 8.000 kWh aus der 120 Meter tiefen Tiefenbohrung  
4 entnommen werden, um herauszufinden, wie sich die Temperatur im Untergrund entwickelt. Alle  
5 Untergrundeigenschaften wurden bei allen Parameterstudien konstant gehalten, die in erster Linie die Ausdehnung  
6 des Wärmetrichters beeinflussen würden. Die Variation der Bodendiffusivität, ausgenommen Torf, ist gemäß Tabelle  
7 3-7 zwischen  $0,28$  und  $0,94 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-6}$ . Im Zuge der Variantenstudie wurde  $0,64 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-6}$  für die Diffusivität  
8 verwendet. Für die Berechnung der thermischen Antwort des Bohrlochs, die auch mittels Bohrlochversuchen  
9 ermittelt werden kann, wurden folgende Werte im Einzelnen verwendet:

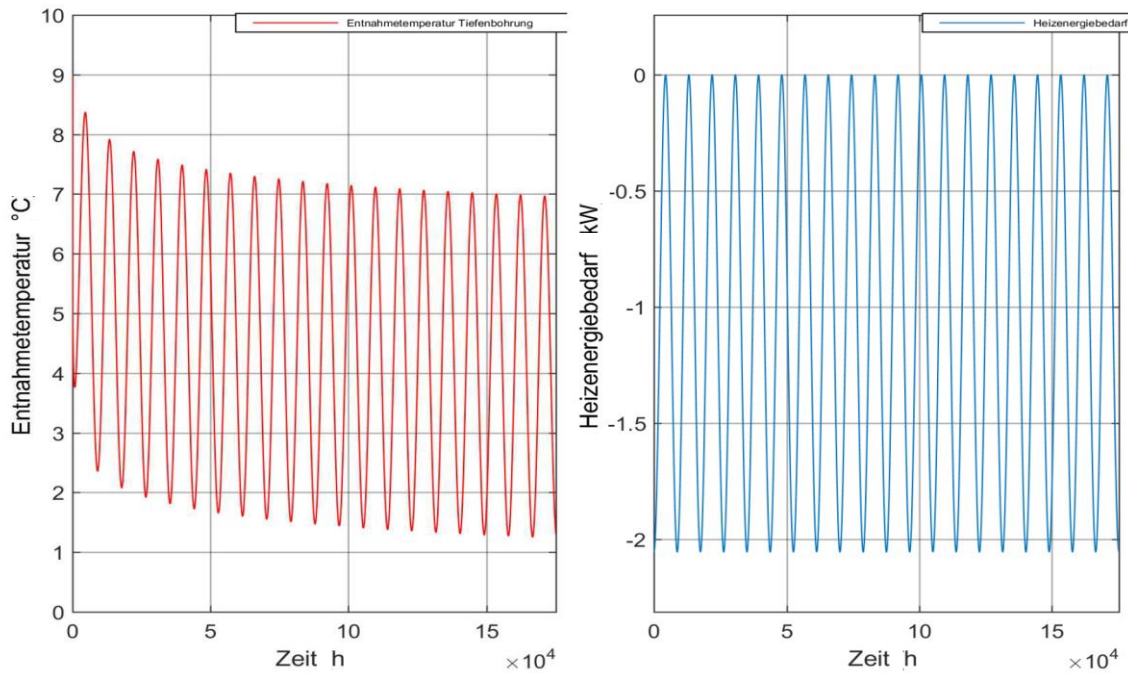
```

10 lambda_p=0.4; %Wärmeleitfähigkeit - Rohr in W/(m*K)
11 lambda_g=2.0; %Wärmeleitfähigkeit - Verfüllmaterial in W/(m*K) (2)
12 lambda_s=1.6; %Wärmeleitfähigkeit - Boden in W/(m*K)
13 c_s=2500000; %Wärmespeicherzahl - Boden in J/(m^3*K)
14 c_g=1000000; %Wärmespeicherzahl - Verfüllmaterial in J/(m^3*K)
15 a_g=lambda_g/c_g; %thermische Diffusivität - Verfüllmaterial m^2/s
16 a_s=lambda_s/c_s; %thermische Diffusivität - Boden m^2/s
17 d=0.0037; %Rohrdicke in m
18 r_p=0.08; %Rohrdurchmesser in m
19 r_b=0.14; %Bohrlochdurchmesser in m
20 c_p=4180*1000; %Wärmespeicherzahl in J/(m^3*K)
21 C_p=2*c_p*(r_p/2-d)^2/4*pi; %Wärmespeicherzahl Wasser pro lfm Rohr
22 T_0=0; %ungestörte Bodentemperatur in C°
23 Re=8760; %Reynoldszahl der Wasserströmung
24 t_max=3784320000; %Berechnungsende in s
25 t_schritt=900; %Schrittweite Modell Claesson in s
26 t_schritt2=86400*4; %Schrittweite Modell Linienquelle in s
27 t_break=345600; %Zeitpunkt des Modellwechsels in s
28 H=120; %Bohrlochtiefe in m
29 D=5; %Tiefe bis zu thermisch aktivem Bohrloch in m
30 B=5; %Abstand der Bohrlöcher untereinander in m

```

```

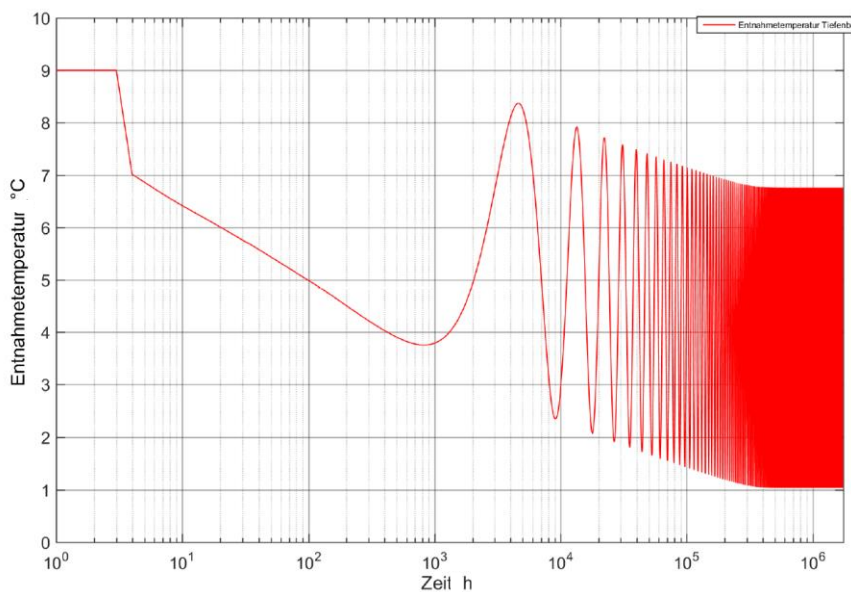
1 i_max=1;           %Anzahl der Bohrlöcher in x-Richtung
2 j_max=1;           %Anzahl der Bohrlöcher in y-Richtung
3 N=i_max*j_max;     %Anzahl der Bohrlöcher
    
```



**Abbildung 6-14: Links: Absenkung des Temperaturniveaus bei stetiger, sinusförmiger Energieentnahme; Rechts: Entnahmeleistung für den Heizenergiebedarf (Tiefenbohrung H=120 m); Energieentnahme=9.000 kWh/a**

4 Durch die permanente Entnahme entsteht mit der Zeit eine Absenkung der Temperatur in der Tiefenbohrung. Für  
 5 das gegebene Beispiel ist das Ergebnis in Abbildung 6-14 ersichtlich. Nach 20 Jahren erfolgt eine Absenkung des  
 6 Temperaturniveaus, gemessen am Scheitel der Amplitude, von 2°C. Durch die Schwingung liegt die minimale  
 7 Temperatur bei fast 1°C, was nicht weit vom Gefrierpunkt entfernt ist. Durch die Absenkung der Temperatur  
 8 verschlechtert sich die Leistungszahl der Wärmepumpe.

9 **Simulationszeitraum**



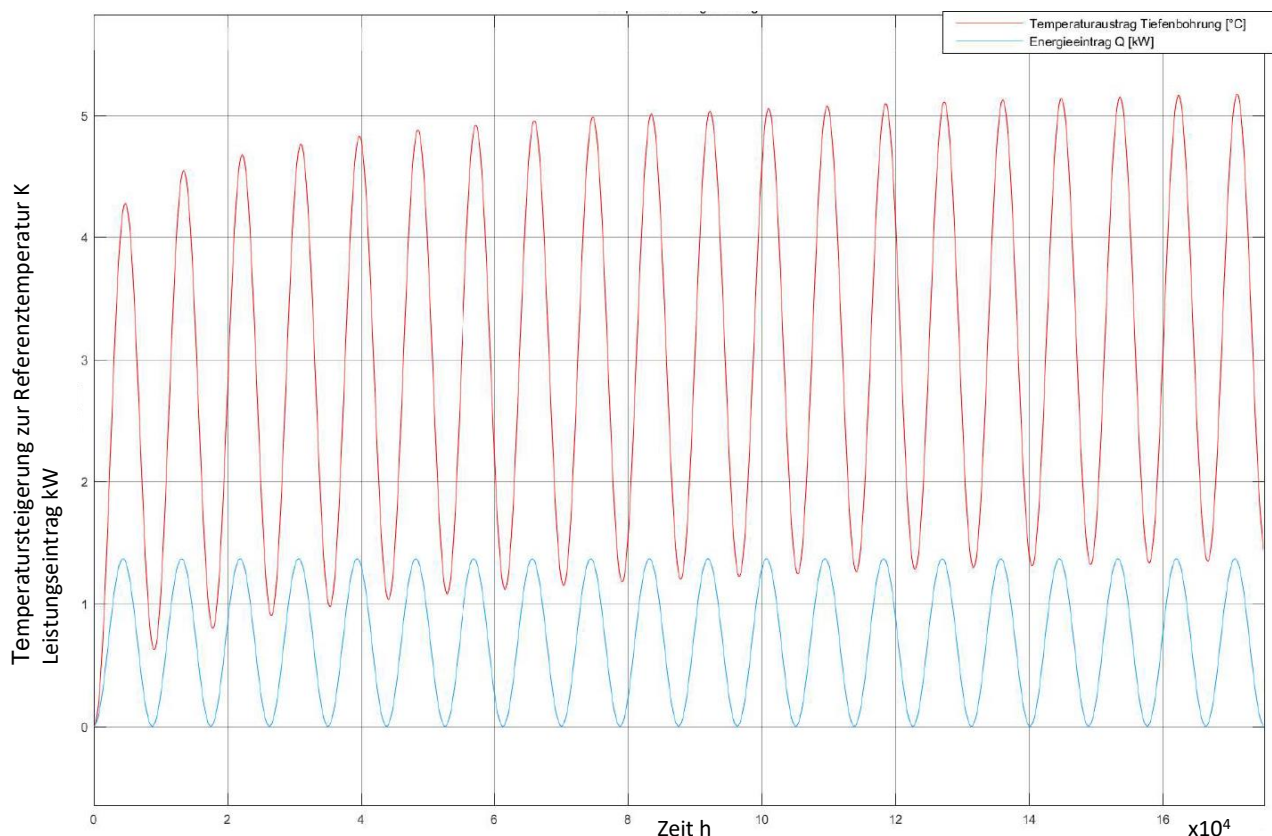
**Abbildung 6-15: Entnahmetempertur einer Tiefenbohrung mit 120 Metern Tiefe, bei jährlicher Energieentnahme von 9.000 kWh. Die Simulation ist nach 120 Jahren Simulationszeit zu unterbrechen, da das Berechnungsende des TRST nach 120 Jahren durch die Eingangswerte bestimmt wurde.**

1 Im Normalfall sind für ein Einfamilienhaus der Heizenergiebedarf und der Endenergiebedarf für ein ganzes Jahr  
 2 von Interesse. Bei der Simulation von Tiefenbohrungen ist eine Prognose für ein einzelnes Jahr jedoch nicht  
 3 aussagekräftig, da der geothermische Abkühlprozess langsam vor sich geht und dadurch eine mehrjährige Simulation  
 4 notwendig macht. Im Zuge einer Berechnung über 20 Jahre, wie in Abbildung 6-14 dargestellt, besteht die  
 5 Möglichkeit, dass nach unendlicher langer Entnahme, eine Konvergenz entsteht und sich somit ein stationärer  
 6 Schwingungszustand in der Tiefenbohrung einstellt. In der Regel ist es üblich, Tiefenbohrungen auf 50 Jahre  
 7 auszulegen, was auch der normalen Benutzungsdauer von Bauwerken entspricht.

8 In der Abbildung 6-15 ist das Ergebnis für das gegebene Modell bei einer Simulation von 200 Jahren dargestellt.  
 9 Man erkennt, dass nach 120 Jahren eine scheinbare Konvergenz gegeben ist, was allerdings nicht stimmt, da das  
 10 Berechnungsende für den verwendeten TRST bei 120 Jahren liegt. Die Temperaturentwicklung würde nach diesem  
 11 Modell, rein mathematisch betrachtet, bei einer unendlichen langen Energieabnahme, unter alle Grenzen sinkt. Bei  
 12 einer Temperaturabsenkung unter  $0^{\circ}\text{C}$  ist eine Simulation auszuschneiden, da die angenommene Diffusivität, auf  
 13 Grund der Eisbildung im Untergrund, nicht mehr entspricht. In diesem Fall bringt die Simulation bereits davor, nach  
 14 120 Jahren, keine richtigen Ergebnisse hervor.

### 15 **Auswirkungen bei stetiger Einspeisung**

16 Es ist naheliegend, dass Tiefenbohrungen nicht nur als Energiequelle, sondern auch als Energiesenke verwendet  
 17 werden können. Auf Basis der thermodynamischen Grundlagen, verhält sich die Ausbreitung der Wärme bei  
 18 gegebenen Potentialunterschieden, mit unterschiedlichen Vorzeichen analog, der Unterschied dabei liegt in der  
 19 entgegengesetzten Strömungsrichtung. Die Abbildung 6-16 zeigt die Auswirkung eines stetigen Eintrags. Dieses  
 20 Verhalten würde sich bei der Kühlung des Untergrundes einstellen.



**Abbildung 6-16: Entnahmetemperatur einer Tiefenbohrung mit 120 Meter Tiefe bei Energieeintrag**

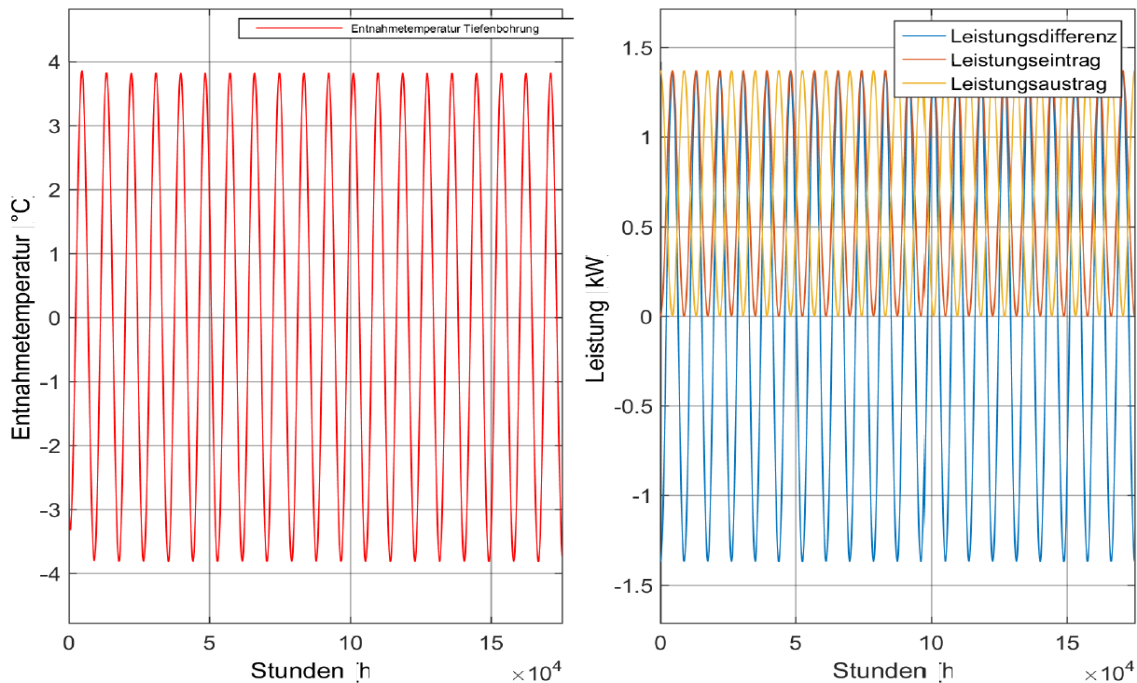
**Rot: Temperatursteigerung bei Einspeisung**

**Blau: sinusförmige Einspeisleistung, Energieeinspeisung von 5.000 kWh im Jahr**

### 21 **Auswirkungen bei Entnahme und Einspeisung**

22 Nachdem Einspeisung und Entnahme von Wärmeenergie in derselben Tiefenbohrung möglich ist, kann man beide  
 23 gleichzeitig als Randbedingung ansetzen. In Abbildung 6-17 erkennt man eine sinusförmige Temperaturschwingung.  
 24 Diese Schwingung entsteht durch den Energieein- und austrag, die ebenfalls sinusförmig ist und der Überlagerung

1 von zwei Sinuswellen entspricht. Die Lösung der radialen Wärmeleitgleichung, in Form einer partiellen  
 2 Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten, wird bei der Lösung nach [52] mit  
 3 Besselfunktionen gelöst. Die allgemeine Lösung der Wärmeleitgleichung entspricht einer orthogonalisierten Reihe an  
 4 Sinusschwingungen, die unter anderem durch Besselfunktionen dargestellt werden können. Dadurch ist die Lösung  
 5 als einfache, sinusförmige Schwingung kein Zufall, sondern die einfachste mögliche Lösung, nachdem keine  
 6 Potentialdifferenz vorliegt.



**Abbildung 6-17: Links: Entnahmetempertur einer Tiefenbohrung mit 120 Meter Tiefe bei einer jährlichen  
 Einspeisung und Entnahme von 5.000 kWh;**

**Rechts: die Leistungskurven der Entnahme und des Eintrages mit der zugehörigen Überlagerung**

#### 7 Ausbreitungsprozess im Untergrund die Entwicklung von unstetigen zu stetigen Funktionen

8 Bei der Load Aggregation Methode wird der Untergrund in mehrere Schichten, schalenförmig zum Zentrum  
 9 aufgeteilt, wobei jede Schicht nach außen im exponentiellen Verhältnis größer ist, als die Schicht die näher zum  
 10 Zentrum liegt. Jede einzelne Schicht hat eine zeitliche Entwicklung, die mit einer speziellen Addition mit  
 11 Gewichtung auf Basis des TRST auf wenig Werte zusammengefasst wird. Durch die Zusammenfassung der  
 12 Vorgeschichte, die mit der fünften Kurve endet, wird die Rechenleistung stark reduziert, jedoch ohne große Einbußen  
 13 an der Rechengenauigkeit unbeabsichtigt zu erzielen. In Abbildung 6-18 erkennt man zwischen den einzelnen Kurven  
 14 ein exponentielles Abklingverhalten. Dieses Abklingverhalten ist auch in radialer Richtung, zwischen den Teilbildern,  
 15 nach außen zu beobachten. Die ausreichend große Anzahl der Schichten wird durch den minimalen Wärmestrom in  
 16 der 16. Schicht bestätigt, der bei der Simulation nach 20 Jahren bei einem fünftausendstel liegt.

17 Die allgemeine Lösung der WLG ist ein Satz an orthogonalen Funktionen, mit dem grundsätzlich auch unstete  
 18 Funktionen dargestellt werden können. Die Wärmeleitgleichung kennt im klassischen Sinn keine unsteten Sprünge  
 19 und unstetige Energiequellen werden durch die Wärmespeicherkapazität schnell zu stetigen Funktionen geglättet.  
 20 Abbildung 6-20 zeigt die Wärmeströme im Untergrund, bei einer unsteten Energieentnahme und -zufuhr. Im  
 21 Wesentlichen erfolgt nach genügendem Abstand der Schichten zum Kern, eine Glättung des Stroms mit einem  
 22 Abklingverhalten, dass bei ausgewogener Bilanzierung gegen Null konvergiert. Somit liegen auch bei komplexer  
 23 Verteilung der Energieströme, adiabatische Randbedingungen vor.

24

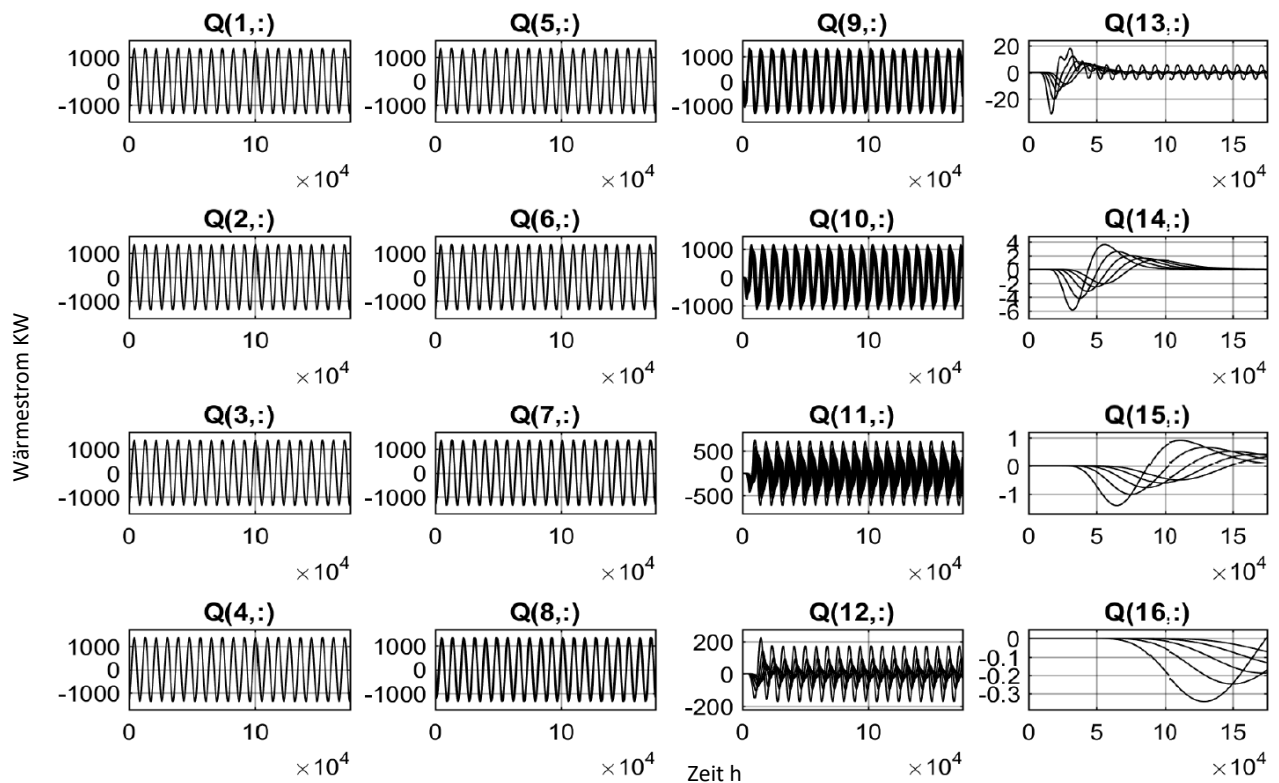


Abbildung 6-18: Entwicklung der Wärmeleitung im Untergrund bei einer harmonischen Schwingung. Die Entnahme ist dem Eintrag gleich  $\pm 5.000$  kWh.

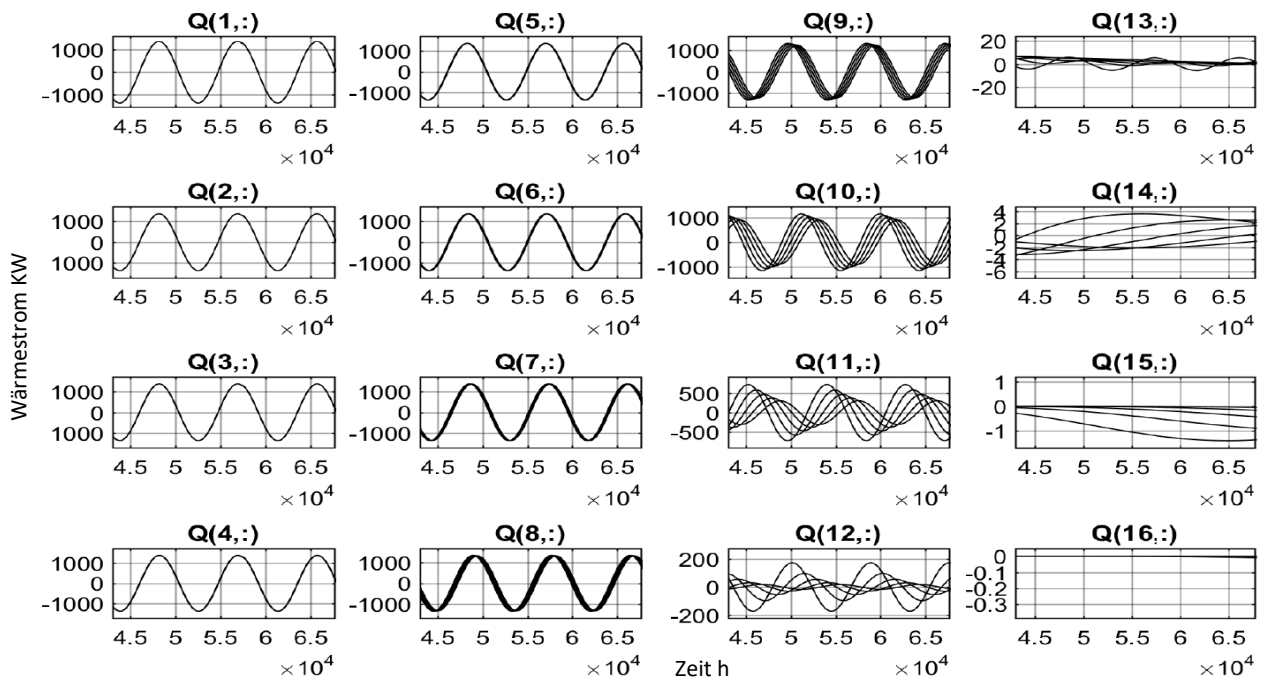


Abbildung 6-19: Entwicklung der Wärmeleitung im Untergrund bei einer harmonischen Schwingung. Die Entnahme ist dem Eintrag gleich. Ausschnitt aus Abbildung 6-18.

- 1 Die entnommene Leistung der Tiefenbohrung steht gemäß Gleichung (6-107) mit der Leistungszahl im Verhältnis
- 2 zum Heizenergiebedarf gemäß Abbildung 6-22. Der gesamte Heizenergiebedarf setzt sich aus elektrischen Strom und
- 3 der Umweltenergie zusammen, die aus der Tiefenbohrung kommt. Bei der Leistungszahl 10 werden nur mehr 10
- 4 Prozent des Heizenergiebedarfes aus elektrischem Strom benötigt. Bei einer Leistungszahl von 5 sind es noch
- 5 immerhin 20 Prozent und somit das Doppelte. Trägt man diesen Zusammenhang in eine doppellogarithmische Grafik
- 6 ein, sieht man, dass die Wirkung der verbesserten Leistungszahl rasch abfällt.

7

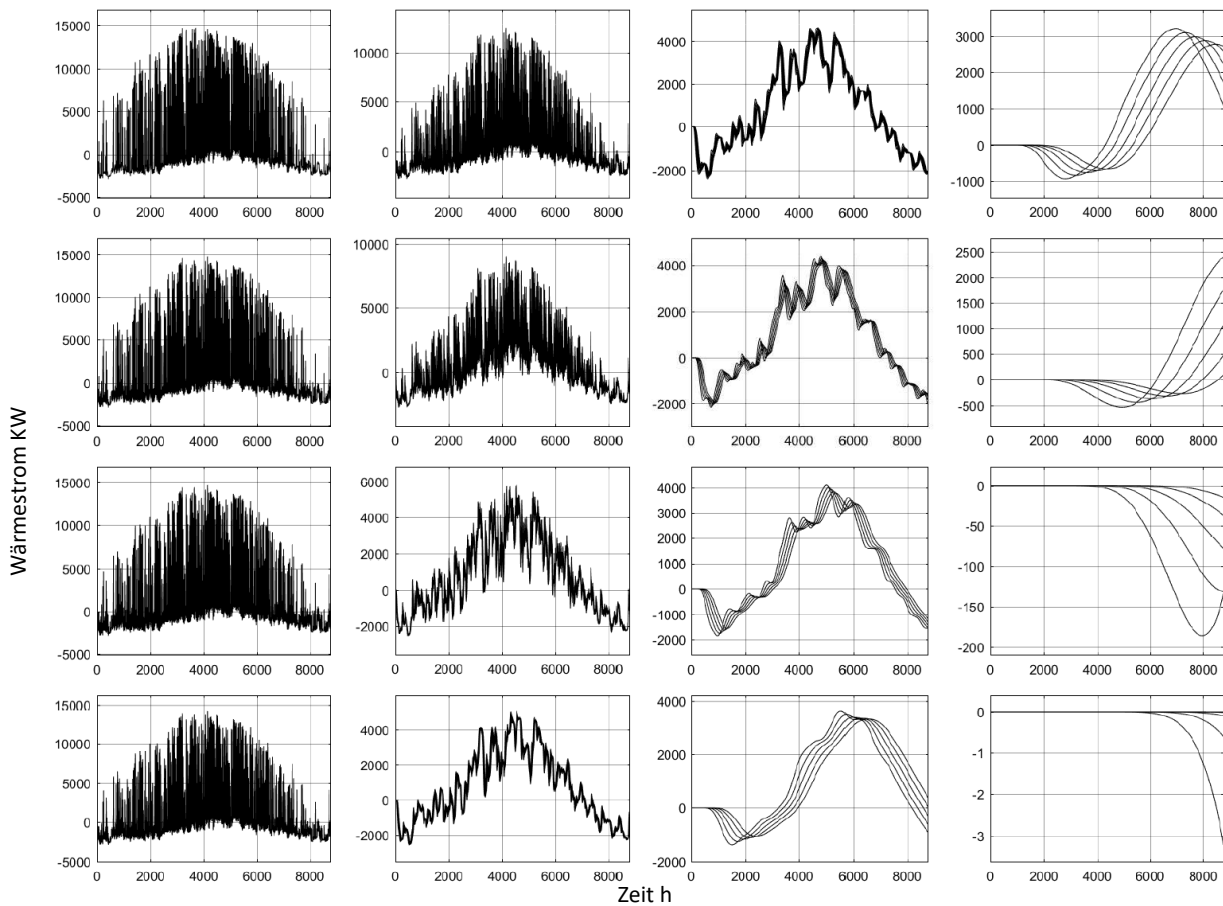


Abbildung 6-20: Entwicklung der Wärmeleitung im Untergrund beim Eintrag von Sonnenenergie mit Hilfe eines Solarkollektors (Aperaturfläche 10 m<sup>2</sup>). Der Heizenergiebedarf ist vereinfacht proptorional zur Temperaturdifferenz gewählt.

$$COP = \frac{Q_{HEB}}{Q_{elektrische\ Energie}}$$

$$COP = \frac{Q_{HEB}}{Q_{HEB} - Q_{Umweltenergie}} \tag{6-107}$$

$$Q_{Umweltenergie} = Q_{HEB} \frac{(COP - 1)}{COP}$$

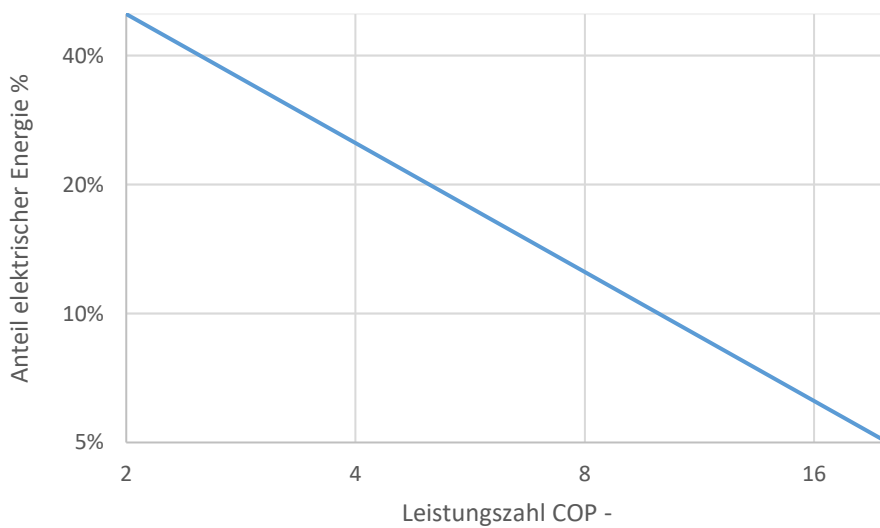


Abbildung 6-21: Abminderung des Anteils der elektrischen Energie bei steigender Leistungszahl



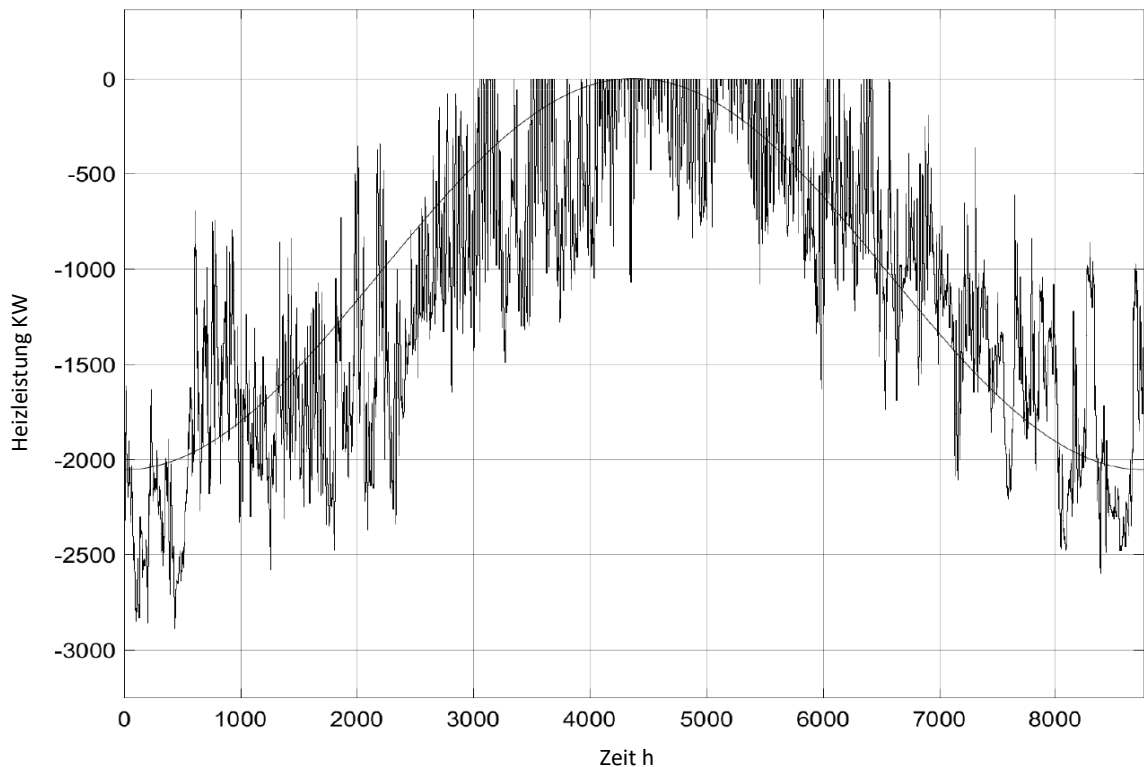


Abbildung 6-22: Der Heizenergiebedarf der im vereinfachten Gebäudemodell als Grundlage dient (vgl. Abbildung 6-20), ist mit dem Leitwert des Gebäudes proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen angenommen. Positive Wert wurden begrenzt, damit kein Leistungseintrag in die Tiefenbohrung erfolgt. Die Außentemperatur wurde mit den HSK-Daten angenommen und die Innentemperatur mit konstant  $22^{\circ}\text{C}$

#### 6.2.4. Zusammenwirkung des Solarkollektormodells mit der Tiefenbohrung

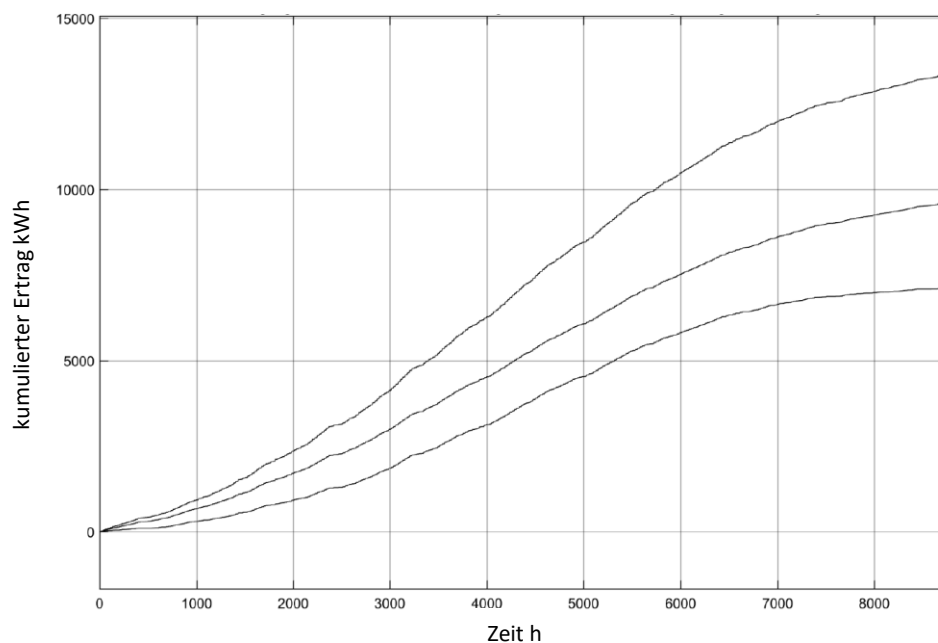
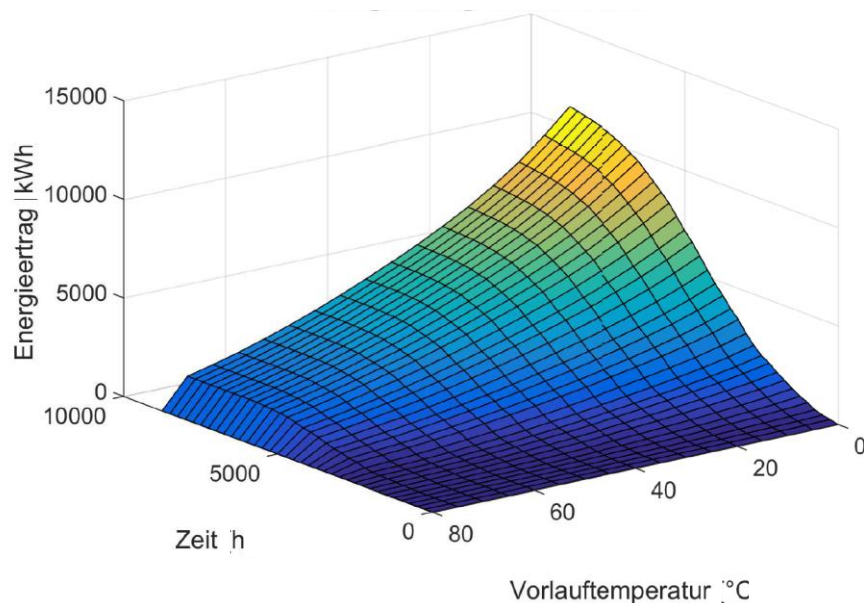


Abbildung 6-23: Ertrag des Solarkollektors bei konstanter Vorlauftemperatur, Ausrichtung: Zenitwinkel  $35^{\circ}$ , Azimutwinkel  $0^{\circ}$  (Süden) von oben nach unten: Eintreffende Strahlung, absorbierte Strahlung und abgeführte Strahlung (Bramac Solar Dach PRO10,  $9,2\text{ m}^2$  Aperaturenfläche)

- 1 Das Solarkollektormodell wurde gemäß [24] in das gekoppelte Modell eingebaut. Abhängig von der
- 2 Vorlauftemperatur werden unterschiedliche Wirkungsgrade erzielt. Um die Funktionsfähigkeit des Modells zu testen,

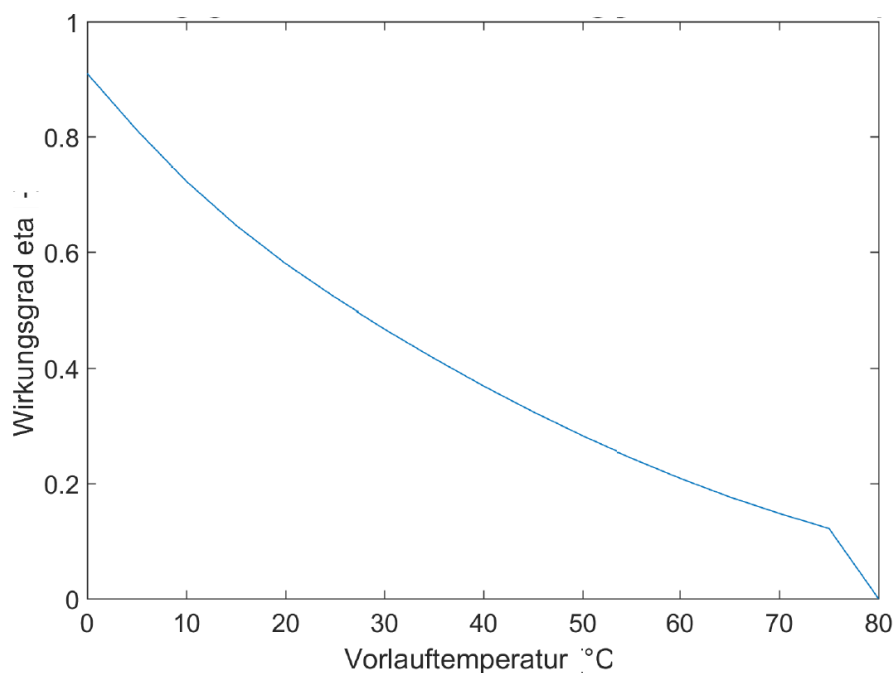
1 wird zunächst, unter Verwendung von HSK-Daten, der Ertrag bei konstanter Vorlauftemperatur und bestimmter  
2 Ausrichtung simuliert.

3 Im Vergleich mit dem Datenblatt zum Solarkollektor aus Anhang A, werden in beiden Fällen knapp über 60 Prozent  
4 Energie gewonnen. Bei der Simulation werden 7.100 kWh/a abgeführt, im Prüfaufbau werden hingegen 7.209 kWh/a  
5 abgeführt. Im Vergleich dazu liegt die Solarstrahlung nach den HSK-Daten bei 1.198 kWh/m<sup>2</sup>.a statt 1.244 kWh/m<sup>2</sup>.a.  
6 Für die Simulation ergibt sich ein Wirkungsgrad von 64% und der reale Prüfaufbau kommt auf 63% (vgl. 6-25 mit  
7 Anhang A Datenblatt Solarkollektor). Der Unterschied liegt bei einem Prozent, im Verhältnis zur statistischen  
8 Schwankung des Wetters ist diese Abweichung also unwesentlich.



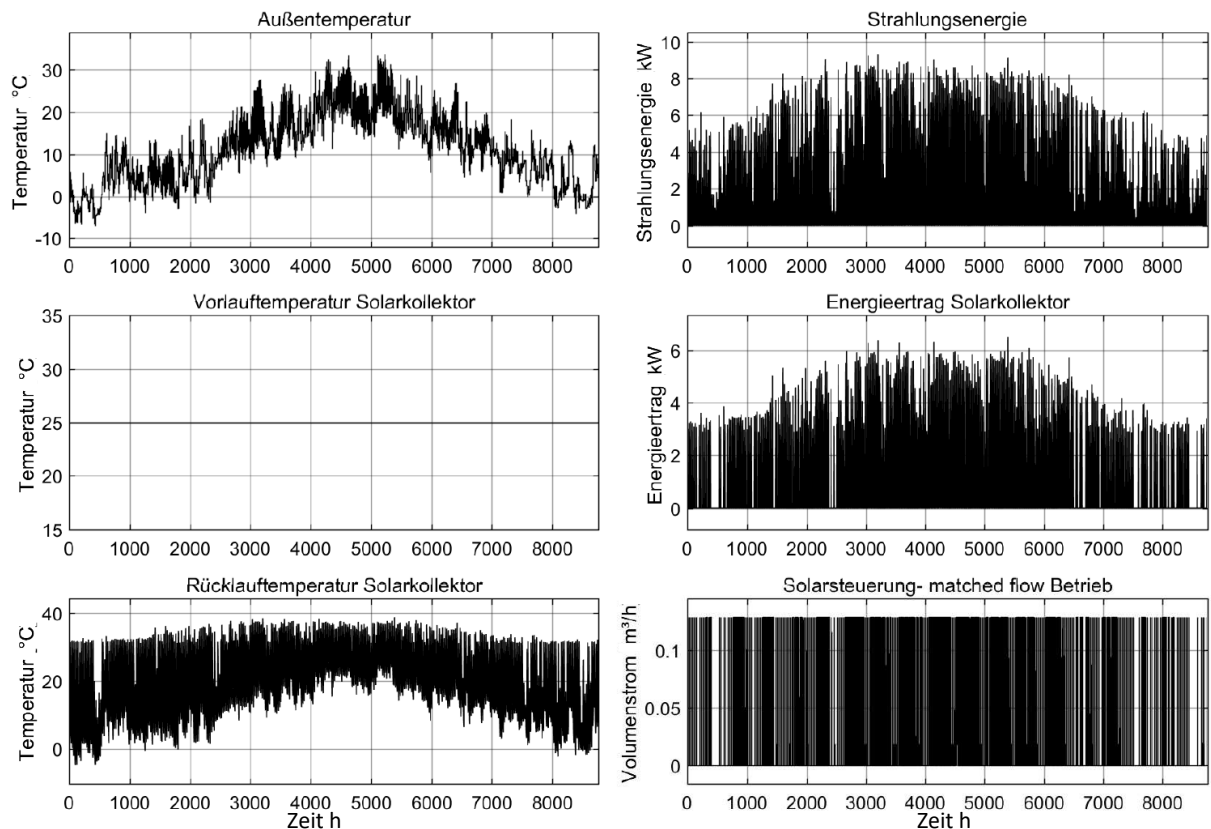
**Abbildung 6-24: Energieertrag des Solarkollektors (Bramac Solar Dach PRO10, 9,2 m<sup>2</sup> Aperaturenfläche)  
Zenitwinkel 22°, Azimutwinkel +45° (Südwest)**

9 Stellt man die Ganglinien für den nebeneinander, erhält man einen guten Überblick über die  
10 Entwicklung der Effizienz, abhängig von der Vorlauftemperatur, wie in Abbildung 6-24 dargestellt. Zum  
11 Verallgemeinern der Kurve wird der Energieertrag in das Verhältnis zur einfallenden Energie gesetzt.

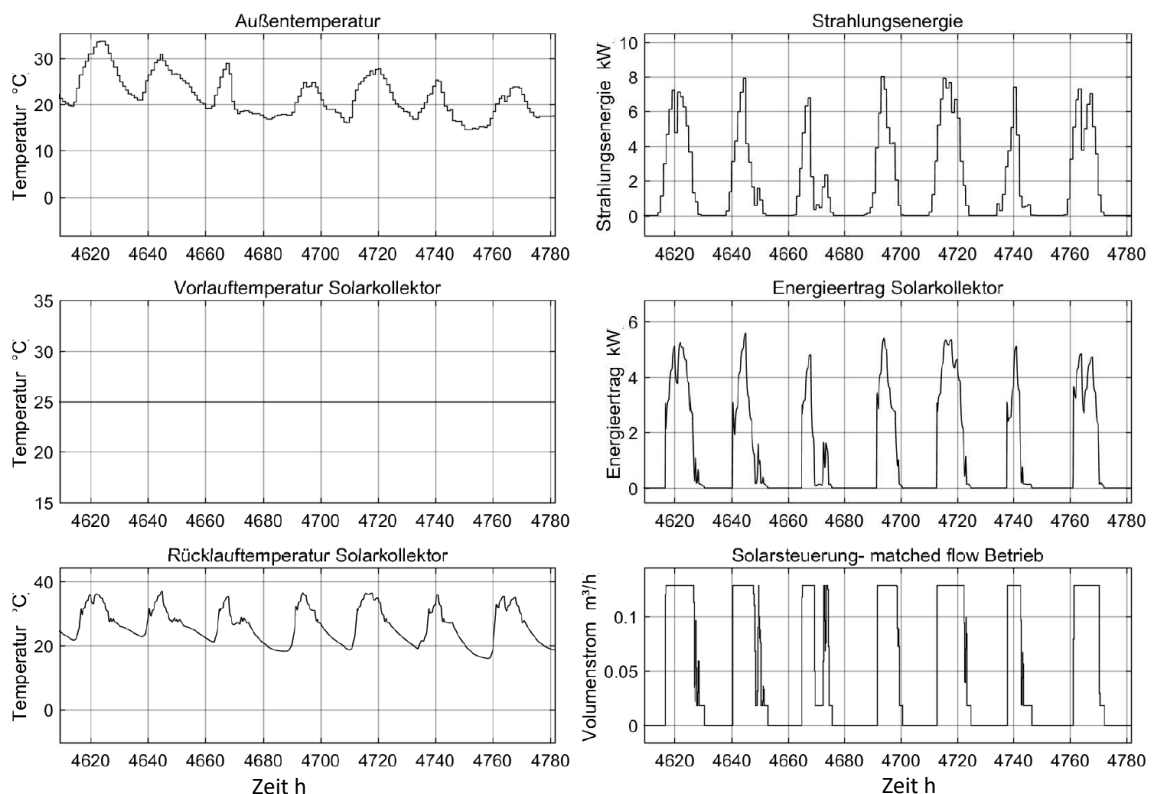


**Abbildung 6-25: Wirkungsgrad des Solarkollektors (Bramac Solar Dach PRO10, 9,2 m<sup>2</sup> Aperaturenfläche)  
Zenitwinkel 22°, Azimutwinkel +45° (Südwest)**

- 1 Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse, wurden die Rahmenbedingungen mit den Ergebnissen
- 2 zusammengefasst und in Abbildung 6-26 direkt gegenübergestellt.



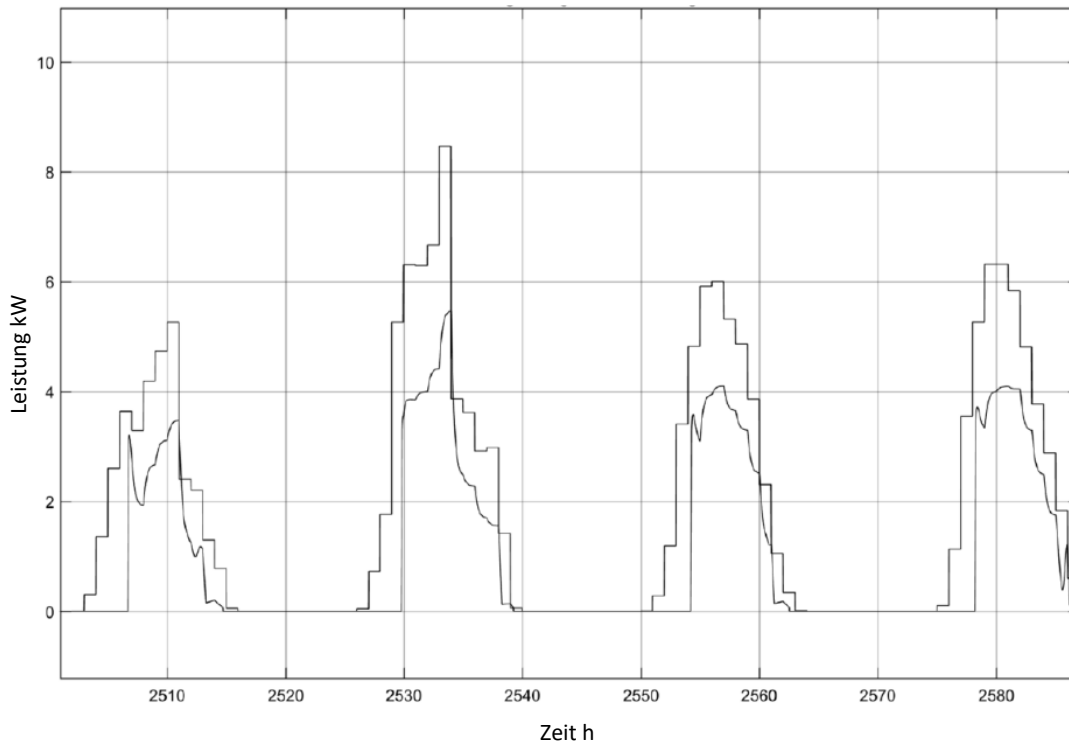
**Abbildung 6-26: Gegenüberstellung der Rahmenbedingungen und der Ergebnisse zur Kontrolle der richtigen Funktion des Kollektormodells (Bramac Solar Dach PRO10, 9,2 m<sup>2</sup> Aperaturenfläche) Zenitwinkel 35°, Azimutwinkel +0° (Südwest)**



**Abbildung 6-27: Gegenüberstellung der Rahmenbedingungen und der Ergebnisse zur Kontrolle der richtigen Funktion des Kollektormodells (Bramac Solar Dach PRO10, 9,2 m<sup>2</sup> Aperaturenfläche) Zenitwinkel 35°, Azimutwinkel +0° (Südwest)**

1 Aus der Abbildung 6-26 sind nur die groben Züge der Ergebnisse erkennbar. In Abbildung 6-27 ist ein Teilbereich  
 2 im Hochsommer herausgeschnitten, bei der die Funktionsweise der Steuerung und die Entstehung des Ertrages gut  
 3 erkennbar sind.

4 Wird der Energieertrag mit der vorhandenen Strahlungsenergie überlagert, erkennt man gut, wie die Verluste  
 5 zustande kommen. In Abbildung 6-28 ist zu sehen, dass im Sommer, bei einer tiefen Vorlauftemperatur, tendenziell  
 6 weniger Verluste vorhanden sind, als das im Durchschnitt zutrifft. Im Winter sind dementsprechend mehr Verluste  
 7 vorhanden.



**Abbildung 6-28: Vergleich des Energieertrages zur einfallenden Strahlungsenergie zur Kontrolle der richtigen Funktion des Kollektormodells (Bramac Solar Dach PRO10, 9,2 m<sup>2</sup> Aperaturenfläche) Zenitwinkel 35°, Azimutwinkel +0° (Südwest) obere Linie: einfallende Strahlungsenergie, untere Linie: Ertrag Solarkollektor**

8 Bei der Zusammenlegung des Tiefenbohrungsmodells mit dem Solarkollektorenmodell wird klar, dass diese in  
 9 Wechselwirkung stehen. Die Tiefenbohrung hält mit der großen Kapazität die Vorlauftemperatur niedrig, dabei wird  
 10 gleichzeitig der Ertrag des Kollektors in einer entsprechend hochgehalten.

11 Die Abbildung 6-29 zeigt die Simulationsergebnisse für eine Bohrung mit der Tiefe von 105 Metern. Die  
 12 Größenordnung der Entnahme liegt ungefähr bei der zugeführten Energie über die Solarkollektoren. Auf Basis der  
 13 Temperaturverläufe kann man gut erkennen, wann die Umwälzpumpe in Betrieb ist.

14 Zur Abschätzung des Energiebedarfs einer Umwälzpumpe, wird die Leistungsaufnahme mit 115 W angesetzt.  
 15 Wenn die Pumpe zu einem Drittel des Jahres in Betrieb ist, wird bei voller Leistung eine Energiemenge von rund 336  
 16 kWh aufgenommen, was jährliche Kosten von gut 60 € entspricht. Durch eine höhere Pumpgeschwindigkeit könnte  
 17 man den Energieertrag vergrößern, da die Verweilzeit der Energie im Kollektor kleiner wird und die Wärmeverluste  
 18 dadurch geringer ausfallen. Aufgrund der hydraulischen Eigenschaften muss bei Vergrößerung des Pumpvolumens  
 19 überproportional viel Energie zum Pumpen aufgewendet werden, somit vergrößert sich auch die Leistungsaufnahme.

20 Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde keine Variantenstudie zur Ausrichtung der Solarkollektoren ausgeführt.  
 21 Wie in anderen Studien [11] und [29] gezeigt, ist es naheliegend, dass der Energieertrag am effizientesten ist, wenn  
 22 der Bedarf da ist. Die Frage liegt bei der Effizienzabweichung. Der größte Ertrag eines Solarkollektors liegt Richtung  
 23 Süden gerichtet, bei einem Azimutwinkel von ungefähr 30-35°. Bei der Nutzung als Zusatzheizung liegt der größte  
 24 Ertrag eher bei 60°, da durch den steilen Winkel die Ertragsanteile im Winter besser genutzt werden können, wo  
 25 diese quasi ohne Zwischenspeicherung verwendet werden können.

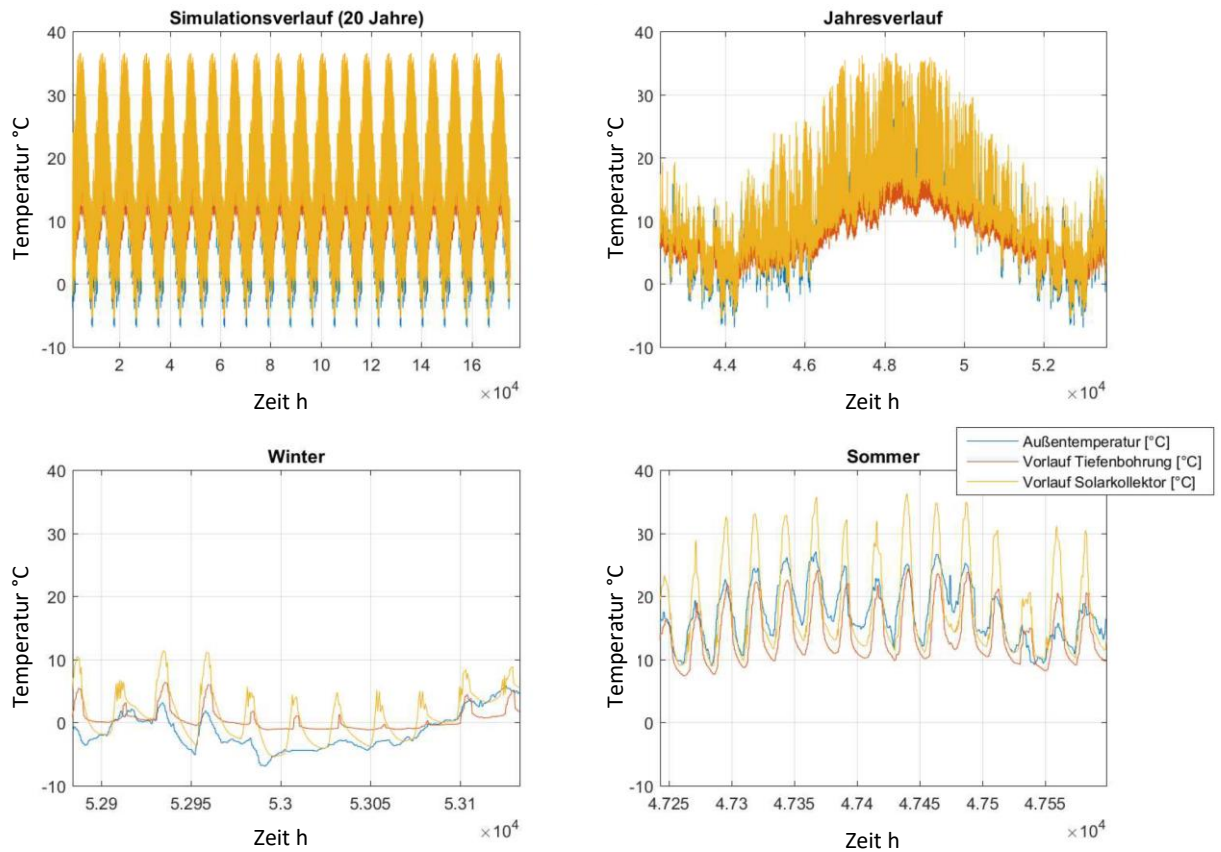


Abbildung 6-29: Ergebnisse für das gekoppelte Tiefenbohrungsmodell mit Solarkollektor 105 Metern Höhe (11 m<sup>2</sup> Aperaturenfläche) Zenitwinkel 22°, Azimutwinkel +45° (Südwest)

### 1 Systemeffizienz

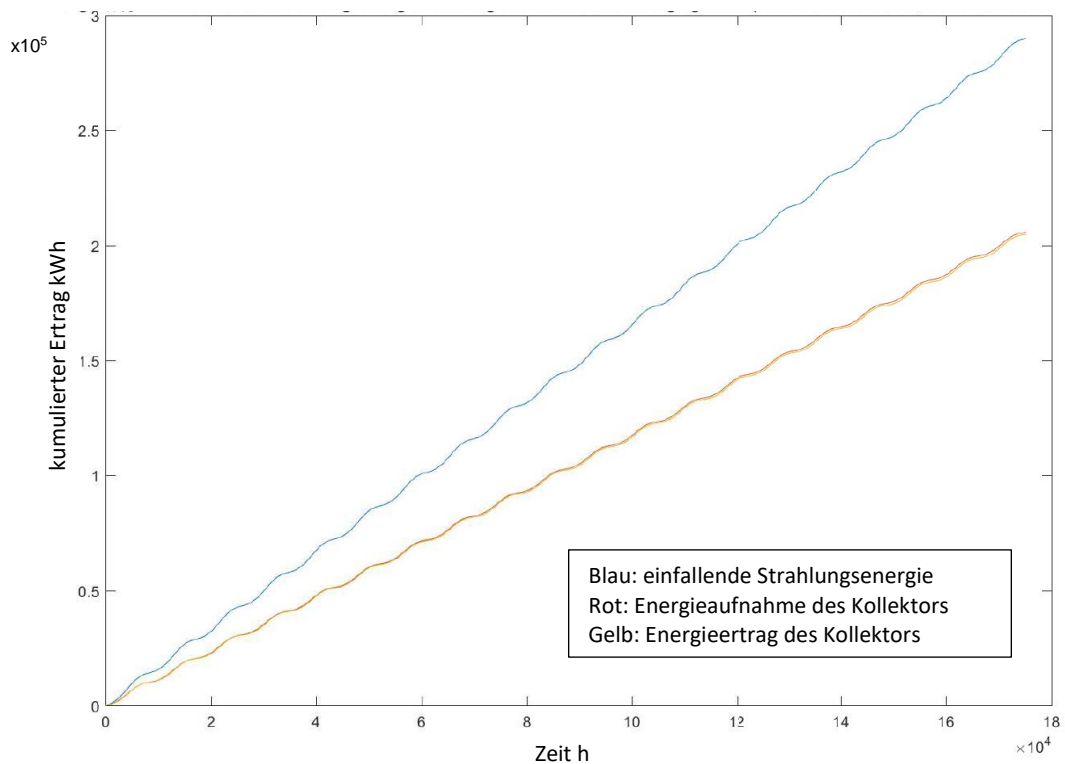
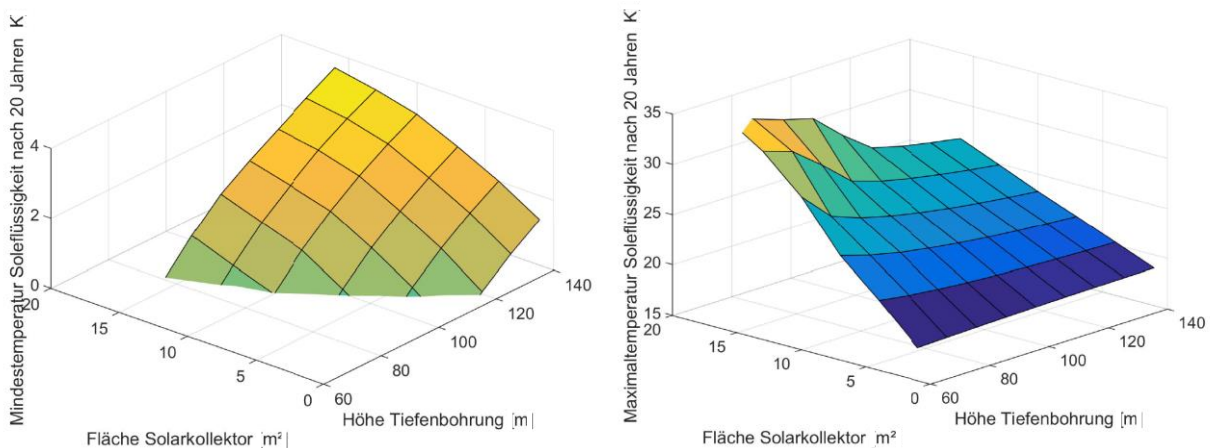


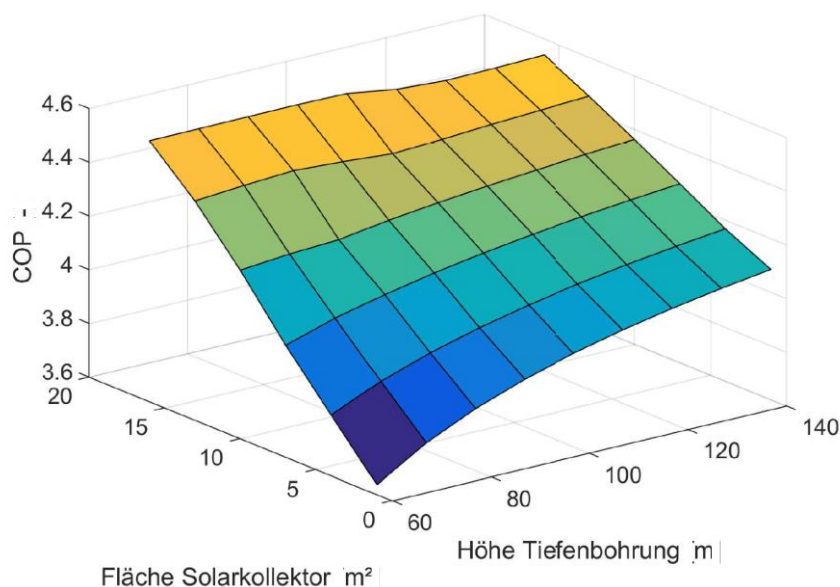
Abbildung 6-30: Verhältnis von Strahlungsenergie zur Energieaufnahme über die Kollektorfläche und Energiegewinn bei einer Tiefenbohrung von 105 Metern Höhe und einem Solarkollektor mit 11 m<sup>2</sup> Aperaturenfläche, Zenitwinkel 22°, Azimutwinkel +45° (Südwest)

1 Der Wirkungsgrad des Solarkollektors wird am Energiegewinn des Solarkollektors im Verlauf gemessen. Abbildung  
 2 6-30 zeigt die 3 Kurven. Die oberste Kurve ist die einfallende Strahlungsenergie, die nächste Kurve nach unten ist  
 3 die Energieaufnahme durch den Solarkollektor und die unterste Kurve zeigt den Energiegewinn, der durch den  
 4 Solarkollektor abgeführt werden kann. In dieser Abbildung erkennt man den direkt proportionalen Zusammenhang  
 5 zwischen allen drei Kurven. Durch die relativ neutrale Energiebilanz, sind alle drei Kurven nahezu gerade. Würden  
 6 die Solarkollektoren einen Überschuss produzieren, würde sich mit der Zeit ein Abflachen des Energiegewinns  
 7 einstellen.

8 Zur Beurteilung der möglichen Anlagenkonfigurationen, wurde eine Parameterstudie mit unterschiedlichen  
 9 Solarkollektorgrößen und Tiefenbohrungsgrößen durchgeführt und in den folgenden 2 Abbildungen wurden die  
 10 minimale und maximale Temperatur berechnet. Im Anwendungsfall darf die Temperatur der Tiefenbohrung nicht  
 11 unter 0 °C sinken, da die thermischen Eigenschaften des Bodens zu stark verändert werden würden und eine  
 12 Entnahme in gesicherte Höhe nicht bestätigt werden kann.



**Abbildung 6-31: Extremwerte der thermischen Verhältnis in der Tiefenbohrung; links: Minimale Temperatur in der Tiefenbohrung, Ergebnisse unter 0 °C werden ausgeschieden; rechts: Maximale Temperatur in der Tiefenbohrung.**



**Abbildung 6-32: Durchschnittliche Leistungszahl der Wärmepumpe nach 20 Jahren**

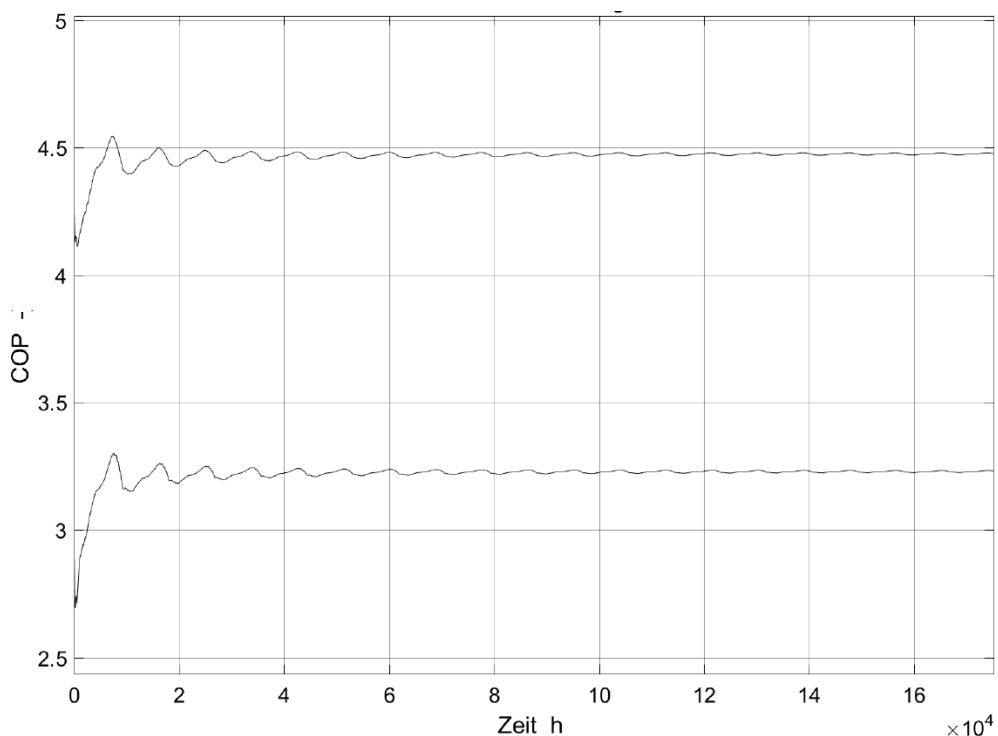
13 Durch die Auswertung der thermischen Eigenschaften im Untergrund wie in Abbildung 6-31 dargestellt, erkennt  
 14 man den brauchbaren Bereich an Anlagenkonfigurationen. Durch den Einsatz vom Solarkollektor mit 10 m<sup>2</sup> Größe,  
 15 können 30 Steigmeter Tiefenbohrung gespart werden. Bei einem Preis von 80€/lfm entspricht dies 2.400€ (exkl.  
 16 MwSt.). Der Solarkollektor in der Größenordnung von Bramac Solar Dach Pro 10E Solarkollektor mit 9,2m<sup>2</sup>  
 17 Apparaturenfläche kostet nur im Einkauf, ohne Montage, ungefähr 3.200€ (exkl. MwSt.), somit liegen die Kosten für

1 einen Quadratmeter Solarkollektor bei ungefähr 350€/ m<sup>2</sup> (exkl. MwSt.). Diesen Kosten könnten jenen für die  
 2 Dachdeckung entgegengestellt werden, die ohne den Solarkollektor erforderlich wäre, auf was hier verzichtet wird,  
 3 wobei aber auch keine Kosten für die Montage und Installation angesetzt werden. Für die Bewertung der Ersparnis  
 4 kann nur auf Basis der Leistungszahl argumentiert werden, mit der Verwendung der Ergebnisse aus Abbildung 6-32  
 5 kann man Anlagenkosten ableiten.

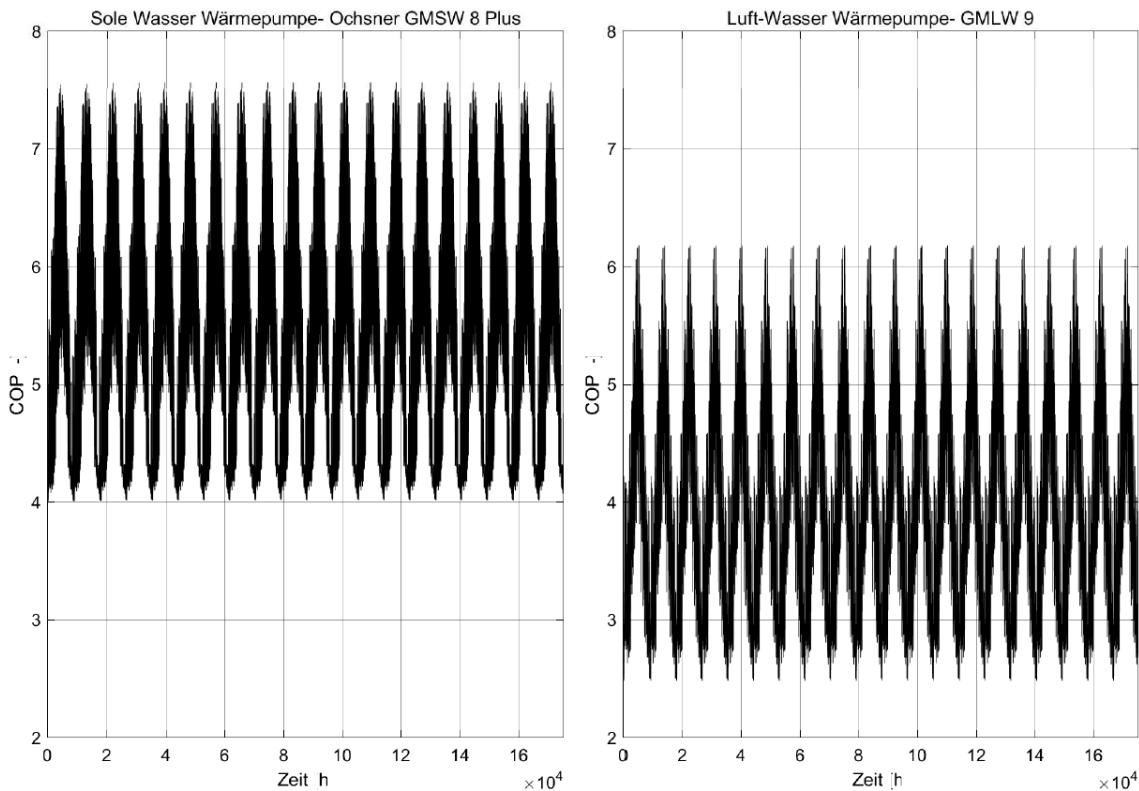
6 Zur Plausibilitätsprüfung der Werte in Abbildung 6-32 wird ein konkreter Fall mit Hilfe der Daten aus den  
 7 einzelnen Simulation veranschaulicht. Die Leistungszahl ist nicht zu jedem Zeitpunkt konstant und ist stark abhängig  
 8 von der Temperaturspreizung. Auf Basis des vereinfachten Gebäudemodells wurde nicht auf die solaren Erträge des  
 9 Hauses eingegangen und bei der Leistungszahl wurde nicht zwischen Warmwasserbereitung und  
 10 Heizenergiebereitung differenziert, da ein genaues Gebäudemodell zur Unterscheidung erforderlich wäre. Aus  
 11 diesem Grund wurden die Leistungszahlen mit der Wärmebereitstellung für 45°C berechnet.

12 Zur Validierung der Ergebnisse, wurden auch die Leistungskurven der Luft- Wasser- Wärmepumpe gemäß Anhang  
 13 A eingearbeitet. Im Vergleich zu den aufgezeichneten Werten gemäß Tabelle 5-10, entsprechen die Werte sehr gut  
 14 den simulierten Werten aus Abbildung 6-33. Im Vergleich hat die Wärmepumpe, beobachtet am 04.10.2016, eine  
 15 Leistungszahl von 3,25, der simulierte Endwert liegt bei 3,23, bei der aktuellen Entwicklung ist aufgrund der kurzen  
 16 Simulationszeit eine Schwankungsbreite von ±0,1 gegeben. Aufgrund der Aufnahme der Messwerte vor der  
 17 Heizsaison, ist die abgelesene Leistungszahl mit ziemlich hoher Sicherheit überschätzt und konvergiert mit  
 18 zunehmender Betriebszeit in den nächsten Jahren gegen einen Endwert. Der solare Eintrag hat keine Auswirkung auf  
 19 die Leistungszahl der Luft- Wasser Wärmepumpe.

20 Die dargestellte Entwicklung der Leistungszahlen in der Abbildung 6-33 ist zu jedem Zeitpunkt auf Basis der  
 21 gesamten hergestellten Heizenergie, zur gesamten zugeführten elektrischen Energie, berechnet. Da der  
 22 Temperaturverlauf, bis auf statistische Schwankungen von Jahr zu Jahr, im Wesentlichen unverändert bleibt,  
 23 konvergiert die Entwicklung der Leistungszahl mit einer gewissen statistischen Bandbreite, die umso geringer wird,  
 24 je länger die Messreihe andauert. Im Vergleich zwischen Abbildung 6-34 und 6-33 erkennt man, dass für die  
 25 Leistungszahl, wenn diese auf Basis der geringen Temperaturspreizung sehr günstig wäre, kein Bedarf vorhanden ist.



**Abbildung 6-33: Entwicklung der Leistungszahlen über 20 Jahre; die obere Kurve stellt die Leistungszahl einer Sole- Wasser- Wärmepumpe in Kombination mit einer Tiefenbohrung von 105m Tiefe, in Kombination mit einer 11 m<sup>2</sup> Solarkollektorfläche dar; die untere Kurve ist die Entwicklung der Leistungszahl einer Luft- Wasser-Wärmepumpe**



**Abbildung 6-34: Aktuelle, zur Verfügung stehende, Leistungszahl über 20 Jahre; Links: Leistungszahl einer Sole- Wasser- Wärmepumpe in Kombination mit einer Tiefenbohrung von 105m Tiefe, in Kombination mit einer 11 m<sup>2</sup> Solarkollektorfläche; Rechts: Leistungszahl einer Luft-Wasser-Wärmepumpe**

1 Die Leistungszahl der Wärmepumpe kann nach der Variantenstudie in Abbildung 6-32, von 4,0 auf ungefähr 4,5  
 2 verbessert werden. Nach Abbildung 6-21 wird der Strombedarf von 25% auf 22,22% gesenkt, es entsteht eine  
 3 Reduktion des Endenergiebedarfes um ungefähr 11 %. Diese Reduktion wirkt sich direkt auf die Kosten und auf die  
 4 Kohlendioxidemissionen aus. Der Strombedarf für die Variantenstudie wurde ohne Berücksichtigung der Verzinsung  
 5 bewertet, denn die derzeitige Lage am Finanzmarkt, macht eine Prognose über Jahrzehnte nur schwer möglich. Mit  
 6 Hilfe einer finanzmathematischen Analyse, können die gegebenen Werte einfach verzerrt werden. Für die Erstellung  
 7 von aussagekräftigen Werten in der Zukunft, müsste eine Kaufkraftbereinigung durchgeführt werden, was im Rahmen  
 8 dieser Diplomarbeit jedoch nicht behandelt wird. Die Berechnung der Stromkosten wurde mit nachfolgender  
 9 Rechnung durchgeführt:

$$\text{jährl.HK} = \frac{HEB}{COP} \cdot P_{Strom} + \frac{PA_{BSTE,TB} + P_{TB} \cdot H + PA_{BSTE,SK} + P_{SK} \cdot A + P_{WP}}{n} \quad (6-108)$$

10 mit:

*jährl.HK* jährliche Heizkosten €/a

*HEB* jährlicher Heizenergiebedarf kWh

*COP* Leistungszahl –

*P<sub>Strom</sub>* Stromkosten €/kWh Annahme: 0,167€/kWh

*PA<sub>BSTE,TB</sub>* Pauschale Baustelleneinrichtung zur Herstellung der Tiefenbohrung € Annahme: 2.000 €

*P<sub>TB</sub>* Bohrkosten zur Herstellung der Tiefenbohrung €/l/m Annahme: 40 €/l/m

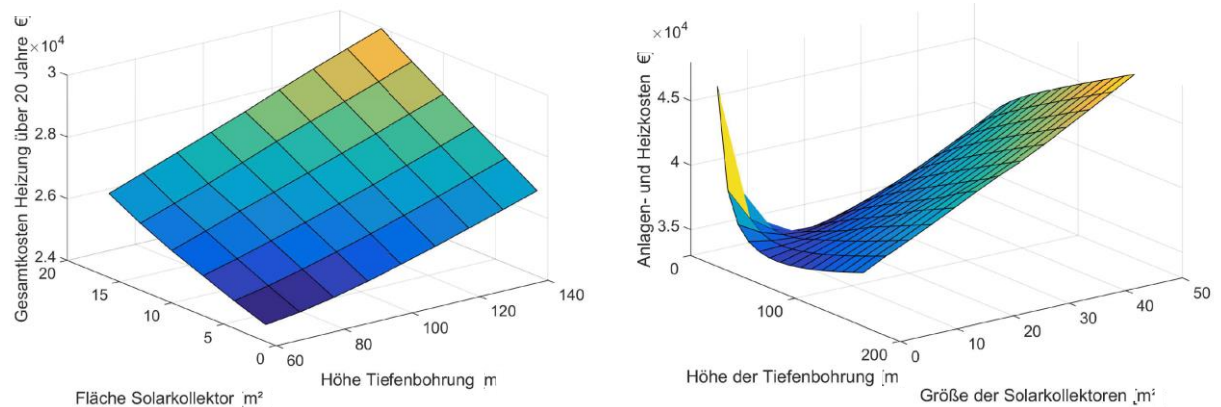
*PA<sub>BSTE,SK</sub>* Pauschale Baustelleneinrichtung zur Herstellung de Solarkollektors € Annahme: 1.000 €

*P<sub>SK</sub>* Kosten des Solarkollektors €/m<sup>2</sup> Annahme: 265 €/m<sup>2</sup>



$P_{WP}$	Kosten der Sole – Wasserwärmepumpe € Annahme: 10.000 €
$H$	Höhe der Tiefenbohrung m
$A$	Größe der Aperaturenfläche Solarkollektoren $m^2$
$n$	Anzahl der Simulationsjahre zu Abschreibung $a$

1



**Abbildung 6-35: Kostenmäßige Optimierung einer Tiefenbohrung kombiniert mit einem Solarkollektor;**  
**Links: Optimierung für den Betriebszeitpunkt nach 20 Jahren Betriebszeit;**  
**Rechts: Optimierung für den Betriebszeitpunkt nach 30 Jahren Betriebszeit**

2 In Abbildung 6-35 erkennt man, dass der optimale Betriebspunkt aus wirtschaftlicher Sicht theoretisch in einem  
3 Bereich liegt, in dem die Anwendung nicht fehlerfrei funktioniert, das heißt, dass eine knapp ausgelegte Anlage über  
4 20 Jahre das beste Preis- Leistungsverhältnis hätte. Bei längerer Nutzung werden die Kosten für den Strom  
5 zunehmend mehr und die optimale Dimensionierung verschiebt sich in Richtung einer größeren Anlagenkonfiguration.  
6 Aufgrund der vorhandenen Ergebnisse, kann diese Anlagenkonfiguration aus wirtschaftlicher Sicht nicht als  
7 Standardlösung empfohlen werden. Anhand der Optimierungskurve erkennt man nahezu keine ausgeprägte Lage, bei  
8 der ein Optimum vorherrscht. Abweichend zur eingangs geschätzten Verbesserung der Leistungszahl von ungefähr  
9 1,0, wird nur eine Steigerung von 0,5 erreicht und durch die erforderliche Technik werden zusätzlich Fehlerquellen  
10 geschaffen, die in verhältnismäßig kurzen Abständen gewartet werden müssen. Allerdings bestünde die Möglichkeit,  
11 bei bestehenden, unterdimensionierten Anlagen, eine Verbesserung durchzuführen. Bei einer Gebäudeerweiterung  
12 könnte die Einspeisung zum Beispiel auch zur Verbesserung des Untergrunds genutzt werden. Aus der Sicht der  
13 globalen Treibhausgasbelastung, müssten also Speichersysteme in großen Maßstäben umgesetzt werden, da die  
14 vergrößerte Effizienz nicht von der Hand zu weisen ist.  
15

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die derzeitigen Vorgaben zum Energieausweis werden in Österreich bis Anfang 2021 konsequent verschärft, um die vereinbarten, europäischen Ziele [6] zu erreichen. Europaweit, sowie global betrachtet, geht der Trend Richtung Energieoptimierung (vgl. Abbildung 1-8) und das Ziel sind Plusenergiehäuser, die aber nicht über das ganze Jahr eine positive Energiebilanz erzielt, womit der Aspekt der Energiespeicherung mit der Nutzung von alternativen Energiequellen ein weiterer Baustein zur Dekarbonisierung der Energiewirtschaft ist. Zur Senkung der jährlich ausgestoßenen Treibhausgase, müssen Emissionsreduktionen erzielt werden, die höher als die Zuwachsrate der Weltbevölkerung (vgl. Abbildung 1-1) sind.

Das komplexe Wissensgebiet über Gebäude, im Zusammenspiel mit der Haustechnik, ist sowohl für Bauingenieure als auch für Maschinenbauer interdisziplinär. Um effizient funktionierende Objekte zu entwickeln, ist umfangreiches Fachwissen beider Themengebiete zur detaillierten thermischen Gebäudemodellierung erforderlich (vgl. Kapitel 5.1.4), wobei erschwerend hinzukommt, dass ein Gebäude ein individuelles Produkt ist, dass sich den individuellen Rahmenbedingungen optimal anpassen muss, um effizient betrieben werden zu können.

Die Herausforderung liegt als Planer und Ausführender darin, Kunden zu einem sehr frühen Zeitpunkt gut zu beraten. Die Bereitstellungsform der Wärmeenergie ist eine entscheidende Frage bei der Planung, die das Aussehen und die Architektur des Gebäudes beeinflussen und neben den bereits straffen Vorgaben der Bauordnung das Bauwerk prägen. Zusammenfassend betrachtet ist für jeden Kunden das menschliche Schutzbedürfnis wichtig. Der Kunde möchte keine Heizung haben, er möchte, dass es im Haus über das ganze Jahr behaglich warm oder kühl ist. Wie das geschieht, ist im Grunde nebensächlich.

Der Schwerpunkt der energietechnischen Forschung liegt derzeit auf der besseren Verteilung von Energie in Form eines Smart Grid. Trotz einer optimalen Energieausnutzung bestehen saisonale Schwankungen, die eine Speicherung von Sonnenenergie aus wirtschaftlichen Überlegungen zweckmäßig machen. Bildet man Energiebedarf und -produktion vereinfacht mit Sinuswellen ab, liegt die Speicherkapazitätsgröße des saisonalen Speichers bei (vgl. Kapitel 3.2):

$$E_{0,nutz} = \frac{HEB}{\pi} + (1 - P) \cdot E_{0,nutz} \quad (7-109)$$

$$E_{0,nutz} \cdot P = \frac{HEB}{\pi}$$

24 Mit:

*HEB* jährlicher Heizenergiebedarf ohne Abzug von solaren Gewinnen aus haustechnischen Anlagen

*P* Restwert des Speicherinhaltes über dem Referenzniveau gem. Gleichung (7 – 110)

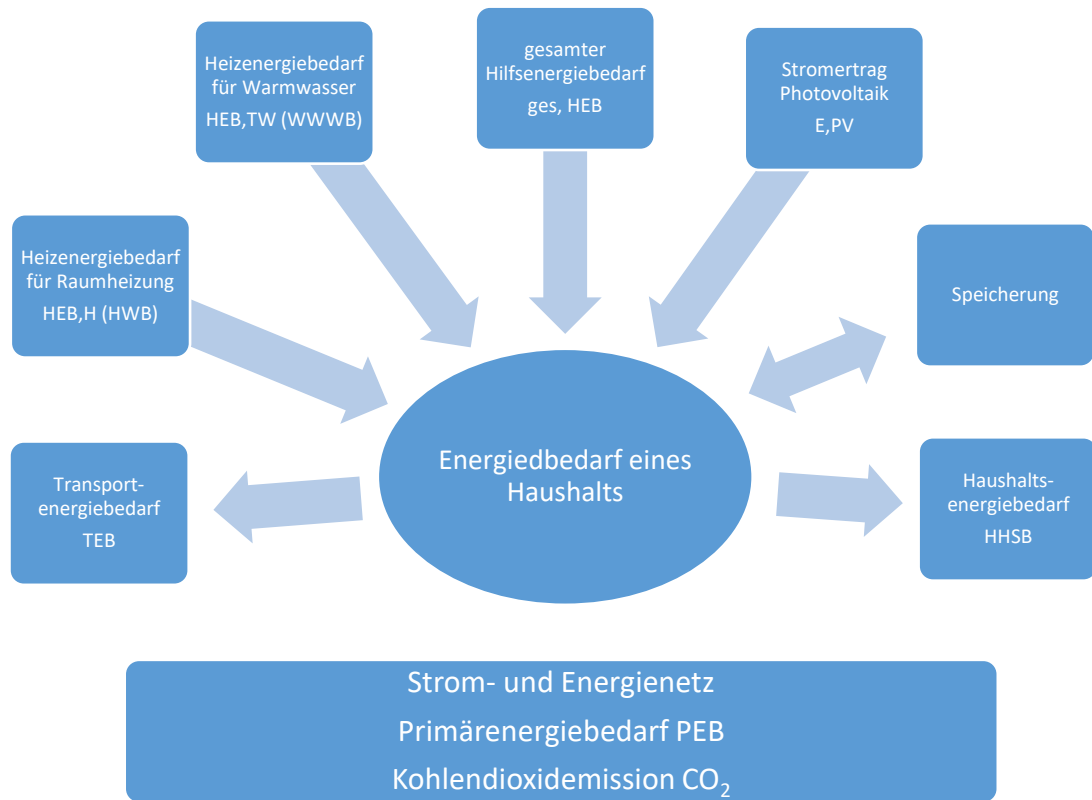
*E<sub>0,nutz</sub>* Energieinhalt des Speichers über dem nutzbaren Niveau

Die Speichergöße kann mit den Gleichungen (7-109) und (7-110) iterativ berechnet werden. Abbildung 3-13 gibt Auskunft zur Energiedichte, wobei zu beachten ist, dass bei der Speicherung zwischen der nutzbaren Energiemenge und der Energiemenge über dem Umgebungsniveau (Referenzniveau) unterschieden werden muss.

Aufbauend auf bestehendes Wissen, müssen neue Systeme entwickelt werden, die nicht nur über das Jahr gesehen positiv bilanzieren, sondern auch die Fähigkeit besitzen, eine Glättung von Bedarf und Produktion zu erzielen. Der Ausgleich kann nur über ein Speichermedium mit bestimmter Speicherkapazität erfolgen (vgl. Abbildung 6-2). Bei jeder Übergabe von Energie, entstehen nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, Potenzialverluste zur Umgebung (vgl. Kapitel 2.1.2). Die Kernaussage ist also, dass Energie bei jeder Übergabestelle an Wirkungspotenzial verliert und am besten gleich am Ursprung genutzt werden sollte. Das stochastische Ertragsprofil der erneuerbaren Energie zwingt zu einer flexiblen Gestaltung der Heizsysteme. Mit Hilfe von Energiespeicherung können Energieströme verkleinert werden, wodurch wiederum die Effizienz steigt.

Bislang wurde Energie durch das konservative Versorgungsnetz nur in eine Richtung bereitgestellt, wann immer es erforderlich war. Um die Schädigung der Atmosphäre zu verringern, steigen jedoch die Anforderungen und die Zusammenhänge werden komplexer. Heutzutage bestehen Möglichkeiten, Energien im Bauwerk zu gewinnen und auf

1 andere Bedarfsbereiche zu verteilen. Abbildung 7-1 stellt eine gesamtheitliche Betrachtung des Energiebedarfes von  
 2 Haushalten dar, die an die Erfordernisse der alternativen Energiegewinnung angepasst sind. Das allgemeine Strom-  
 3 und Energienetz muss sich dementsprechend anpassen und so gut wie möglich entlastet werden. Betrachtet man  
 4 den energetischen Endverbrauch der Traktion gemäß Abbildung 1-4, erkennt man an dieser Stelle das größte  
 5 Handlungspotential. Eine Bereitstellung von überschüssiger Energie des Gebäudes zum Zweck der Traktion, ist zur  
 6 Reduktion des gesamten Energiebedarfs zielführend.



**Abbildung 7-1: Einflussgrößen auf den Primärenergiebedarf aufgrund des Energiebedarfs von Haushalten, unter Berücksichtigung von alternativen Energiequellen, die saisonale Überschüsse erwirtschaften und gespeichert werden können. Der Heizenergiebedarf ist nur ein Teil des gesamten Bedarfs.**

7 In dieser Arbeit wird speziell die sensible Wärmespeicherung untersucht. Im Zuge der Berechnung von  
 8 Speichermassen und Wärmeverteilungen, stößt man auf die Wärmeleitgleichung, die eine partielle  
 9 Differentialgleichungen (sh. Gleichung (5-57)) darstellt, die ein exponentielles Abklingverhalten beschreibt. Ohne  
 10 auf den Speicherinhalt genau einzugehen, kann man die Eigenschaften des Speichers nach Gleichung (7-110)  
 11 beschreiben (vgl. Kapitel 6.1). Die Herleitung erfolgt für Speicher mit homogenen Speicherinhalt und aufgrund der  
 12 Eigenschaften, kann eine inhomogene Wärmeverteilung auf eine Vergrößerung der Speicherfläche umgerechnet  
 13 werden.

$$\begin{aligned}
 E_{ref}(\tau) &= P \cdot E_{0,ref} \\
 \tau &= \log_{(1-p_{Loss})} P \leftrightarrow P = e^{\tau \cdot \ln(1-p_{Loss})} \\
 p_{Loss} &= \frac{A_{Speicher}}{V_{Speicher}} \cdot \frac{U_{Speicher}}{\rho \cdot c} \\
 E_{ref}(\tau) &= e^{\tau \cdot \ln\left(1 - \left(\frac{A_{Speicher}}{V_{Speicher}} \cdot \frac{U_{Speicher}}{\rho \cdot c}\right)\right)} \cdot E_{0,ref}
 \end{aligned}
 \tag{7-110}$$

14 Mit:

$\tau$  Verweilzeit der Energie im Speicher bei dem der Prozentsatz  $P$  der  
 Energiemenge zum Zeitpunkt 0 vorhanden ist sek

$P$	Prozentsatz des verbleibenden Speicherinhalts über dem Referenzniveau -
$E_{ref}(\tau)$	Energieinhalt über dem Referenzniveau zum Zeitpunkt 0 J oder kWh
$E_{0,ref}$	Energieinhalt über dem Referenzniveau zum Zeitpunkt t J oder kWh
$p_{Loss}$	Verhaltensbeiwert des Speichers
$A_{Speicher}$	Oberfläche des Speichers $m^2$
$V_{Speicher}$	Volumen des Speichers (Nettovolumen zur Abschätzung auf der sicheren Seite) $m^3$
$U_{Speicher}$	Wärmedurchgangskoeffizient der Speicherhülle $W/m^2K$
$\rho$	Dichte des Speichermediums $kg/m^3$
$c$	spezifische Wärmespeicherkapazität $J/kgK$

1 Die Speicherung von Energie kann auf zwei Arten effizient ausgelegt werden. Die erste Variante ist, dass man  
2 eine Speicherung um das Referenzniveau durchführt (z.B. bei der Anwendung von Tiefenbohrungen vgl. Kapitel 6.2),  
3 die zweite Variante ist ein gut ausgelegter Verhaltensbeiwert des Speichers, der im Wesentlichen durch 3  
4 Eigenschaften beschrieben werden kann (z.B. bei der Anwendung von saisonalen Warmwasserspeichern vgl. Kapitel  
5 6.1):

- 6 • Geometrie über das A/V- Verhältnis  $m^{-1}$
- 7 • Wärmedämmeigenschaften der thermischen Hülle  $W/m^2K$
- 8 • Spezifische Volumenwärmespeicherkapazität  $J/m^3K$

9 Die Modelle zur Simulation der Speicherverhalten, sind im Rahmen dieser Arbeit für Tiefenbohrungen und  
10 Warmwasserspeicher analytisch. Die Lösungen beider Modelle sind, bis auf sehr geringe Ungenauigkeiten (kleiner  
11 1 %), die auf Basis der numerischen Berechnung liegen, genau. Der Energiebedarf der Abnehmer wurde mit einem  
12 stark vereinfachten Modell ermittelt (vgl. Abbildung 5-14 und 5-17). Aufgrund der Tatsache, dass der Energieinhalt  
13 durch die große Speichermasse bei der saisonalen Speicherung geglättet wird (vgl. Abbildung 6-2), würde eine  
14 detaillierte Simulation des Gebäudes keine wesentlichen Erkenntnisse über das Speicherverhalten liefern.

15 Durch die Koppelung von Solarkollektoren mit Tiefenbohrungen, bildet sich eine günstige Synergie, von der beide  
16 Anlagenkomponenten profitieren. Die Solarkollektoren liefern mit geringer Größe überdurchschnittlich hohe  
17 Energiegewinne, der Nachteil liegt aber in der erforderlichen Verwendung von Wärmepumpen (vgl. Kapitel 5.2 und  
18 Kapitel 6.2). Die Modellierung wurde zur verbesserten Übersicht, wie bereits in der Automobilindustrie Standard, in  
19 Matlab Simulink mit Hilfe von StateFlow durchgeführt. Die Modellblöcke können durch die Benutzeroberfläche leicht  
20 verschoben werden und machen eine umfassende Modellanalyse möglich (sh. Anhang C).

21 Die Speicherung von Sonnenenergie in Tiefenbohrungen ist eine sinnvolle Maßnahme zur Verbesserung der  
22 thermischen Eigenschaften des Untergrundes und zur Reduktion der Emissionen. Aufgrund der zugrundeliegenden  
23 Modelle, die ohne Rohrleitungsverluste und Hilfsenergiebedarf berechnet wurden, kann aus wirtschaftlicher Sicht  
24 bei der Regelnutzungsdauer von 20 Jahren keine finanzielle Optimierung der Anlagenkonfiguration festgestellt  
25 werden (vgl. Abbildung 6-35). Das niedrige Temperaturniveau der Tiefenbohrung steigert den Energieertrag des  
26 Solarkollektors von 40% der einfallenden Strahlungsenergie auf nahezu 100% der aufgenommenen Energie des  
27 Kollektors, was einer einfallenden Strahlung von 72 % entspricht (Solarkollektor  $11m^2$ , Tiefenbohrung  $105m$ , vgl.  
28 Abbildung 6-30). Die Auswirkungen der Kollektorausrichtung wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, eine  
29 Verbesserung durch eine steilere Ausrichtung ist jedoch nach [11] anzunehmen.

30 Aus technischer und wirtschaftlicher Sicht ergeben kleine Warmwasserwärmespeicher für die saisonale  
31 Wärmespeicherung wenig Sinn, da die Kosten viel höher liegen als für ein konventionelles Heizsystem (vgl. Abbildung  
32 3-14) und Risiken der unzureichenden Heizenergieversorgung durch die statistischen Schwankungen der solaren  
33 Strahlungsenergie gegeben sind. Die verhältnismäßig hohen Verluste für kleine Speicher unter  $1.000 m^3$  machen eine  
34 Speicherung unwirtschaftlich (vgl. Kapitel 3-14) und für ein Einfamilienhaus wäre ein saisonaler Speicher aus

1 Warmwasser mit der Größe bis zu 300m<sup>3</sup> erforderlich. Die Speicherung von Warmwasser in Form von Solarthermie  
2 ist nur über die Hälfte des Jahres möglich und die Solarkollektoren verlieren mit zunehmender Temperatur ihre  
3 Leistungsfähigkeit (vgl., Abbildung 6-24 und 6-25). Große Speichersysteme sind auf Basis der naturwissenschaftlichen  
4 Gesetzmäßigkeiten effizienter als kleine Speichersysteme (vgl. Abbildung 6-4 und Gleichung (6-86)), die logische  
5 Konsequenz daraus ist also die Vermeidung von kleinen Speichersystemen.

6 Um große Warmwasserspeicher zu nutzen, wäre ein Smart Grid für den thermischen Energiebedarf anzudenken.  
7 Eine logische Kombination der zurzeit vorhandenen Anlagenkomponenten wäre ein flächendeckende, kommunale  
8 Niedertemperaturenergiebereitstellung (Fördertemperatur ungefähr 20°C-25°C), in Form eines Fernwärme- und  
9 Kühlnetzes.

10 Eine Wärmepumpe mit der Entnahmetemperatur von 20°C und Zieltemperatur 35°C erzielt eine theoretische  
11 Leistungszahl nach Carnot (gem. Gleichung (2-22)) von 20,54, das heißt, unter realen Bedingungen ist mit einem  
12 Gütegrad von 50%, eine Leistungszahl von 10,27 für den Heizenergiebedarf möglich. Der Warmwasserwärmebedarf  
13 mit einer Zieltemperatur von 60°C liefert, unter Berücksichtigung des Gütegrades von 50%, eine Leistungszahl von  
14 4,16. Bildet man unter der Annahme, dass der Warmwasserwärmebedarf dem Heizwärmebedarf entspricht, das  
15 arithmetische Mittel der Leistungszahlen, so folgt daraus eine mittlere Leistungszahl von 7,21. Im Vergleich dazu  
16 wurde im Forschungsbericht [33], eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl von 4,09 festgestellt. Nach Abbildung  
17 6-21 und Gleichung (6-107), ist eine Reduktion des Stromanteils von 24,4% auf 13,9%, abzüglich der  
18 Bereitstellungsverluste und des Pumpenenergieeinsatzes, möglich.

19 Im Sommer könnte eine Energierückführung in den saisonalen Speicher durch eine aktive Kühlung der Gebäude  
20 erfolgen, somit könnte der Anteil der solaren Strahlungsenergie genutzt werden, der bislang störend und nicht  
21 verwendbar war. Die EVN gibt derzeit eine Kohlendioxidbelastung von 116,46 g/kWh an. Liegt der Stromanteil bei  
22 der Heizenergiebereitung bei 13,9%, bedeutet dies eine Kohlendioxidbelastung von 16,19 g/kWh. Im Vergleich liegt  
23 die Fernwärme aus Heizwerken gemäß Tabelle 5-14, bei 51 g/kWh, das heißt die Kohlendioxidbelastung könnte um  
24 2/3 reduziert werden.

25 Die Ausführungsform des Niedertemperaturfernwärmenetzes könnte dem Trinkwassernetz ähnlich sein, da die  
26 Leitungen keinen wesentlichen Temperaturbelastungen ausgesetzt sind. Die dichte Bebauungsstruktur und die  
27 sommerliche Überwärmung von Städten könnten, mit der richtigen Lenkung im Niedertemperatursystem, zum Zweck  
28 des Energieschutzes, genutzt werden.

29 Der anthropogene Einfluss führt derzeit zur globalen Erderwärmung (sh. Kapitel 1.1). Damit verbunden ist die  
30 Erhöhung des klimatologischen Gefahrenpotentials, wie zum Beispiel Schäden durch Blitze, Sturmböen, Starkregen,  
31 Hagel und Tornados und durch die Treibhausgasemissionen werden auch das Abschmelzen der Polkappen und der  
32 Rückzug der Gletscher gefördert. Das derzeitige Energieproblem zur Bereitstellung des Energiebedarfes ist im  
33 Wesentlichen ein Verteilungsproblem, in Summe gesehen sind nämlich auch ohne Verwendung von fossilen  
34 Energiequellen, ausreichend alternative Energiequellen für den menschlichen Bedarf vorhanden. Das erforderliche  
35 Wissen zum Schutz der nachfolgenden Generationen ist vorhanden, zur Umsetzung müssen die möglichen  
36 Lösungswege bis zur Umsetzung in der Praxis verbessert werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P. M. Midgley, *Climate Change 2013 The Physical Science Basis*, Geneva: IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *World Population Prospects: The 2015 Revision, DVD Edition*, United Nations, 2015.
- [3] International Energy Agency, „International Energy Agency- Secure Sustainable Together,“ OECD/IEA, 2016. [Online]. Available: [http://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final consumption](http://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final%20consumption). [Zugriff am 20.08.2016].
- [4] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, Abteilung III/2 - Energiebilanz und Energieeffizienz, *Energiestatus 2016*, Wien: Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, 2016.
- [5] STATISTIK AUSTRIA, *Energiestatistik: Energiebilanzen Österreich 1970 bis 2014.*, Wien: STATISTIK AUSTRIA, 2016.
- [6] Official Journal of the European Union, *DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)*, 2010.
- [7] Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB - Dokument zur Definition des Niedrigstenergiegebäudes und zur Festlegung von Zwischenzielen in einem "Nationalen Plan" gemäß Artikel 9 (3) zu 2010/31/EU, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2014.
- [8] Calculations derived with IEA (2014a), *World energy balances*, Paris: IEA World Energy Statistics and Balances (database), 2014.
- [9] ITER ORGANIZATION, „Iter,“ ITER Organization Head of Communication, 2016. [Online]. Available: [www.iter.org](http://www.iter.org). [Zugriff am 21.08.2016].
- [10] C. Riccabona und T. Bednar, *Baukonstruktionslehre 4 - Bauphysik*, Wien: Manz Verlag Schulbuch GmbH, 2010.
- [11] S. Handler, *Increasing energy efficiency of small residential buildings by solarthermal activation of concrete ceilings*, Wien: Dissertation an der Technischen Universität Wien, 2014.
- [12] Energie-Control Austria, „E-Control,“ Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft, 2016. [Online]. Available: <https://www.e-control.at/>. [Zugriff am 23.08.2016].
- [13] P. Biermayr, M. Eberl, M. Enigl, H. Fechner, C. Krstöfl, K. Leonhartsberger, F. Maringer, S. Moidl, C. Schmidl, C. Strasser, W. Weiss und E. Wopienka, *Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2015*, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2016.
- [14] G. Reynders, T. Nuytten und D. Saelens, „ROBUSTNESS OF REDUCED-ORDER MODELS FOR PREDICTION AND SIMULATION OF THE THERMAL BEHAVIOR OF DWELLINGS,“ in *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambéry, France, 2013.
- [15] H. Knoblauch und U. Schneider, *Bauchemie*, 6. Auflage, Wien: Werner Verlag - eine Marke von Wolter Kluwer Deutschland GmbH, 2006.

- 
- [16] K. Stierstadt, *Thermodynamik; Von der Mikrophysik zur Makrophysik*, München: Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 2010, ISBN: 978-3-642-05097-8.
- [17] R. Bointner, S. Ghaemi, R. Haas, H. Huber-Fauland, K. Ponweiser, D. Wertz, T. Leeb, P. Wegerer, C. Harreither, C. Ipsen, K. Krec, T. Steiner, K. Stieldorf, R. Wimmer und S. Eikemeier, Gebäude maximaler Energieeffizienz mit integriertererneuerbarer Energieerschließung, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2012.
- [18] M. Šuri, T. Huld, E. Dunlop und H. Ossenbrink, „Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries,“ *Solar Energy* 81, pp. 1295- 1305, 2007.
- [19] T. Huld, R. Müller und A. Gambardella, „A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa,“ *Solar Energy*, 86, pp. 1803-1815, 2012.
- [20] E. Rebhan, *Efficiency of nonideal Carnot engines with friction and heat losses*, Melville: American Journal of Physics Bd. 70, 2002.
- [21] Austrian Standards, ÖNORM EN ISO 9806:2016, Solarenergie - Thermische Sonnenkollektoren - Prüfverfahren, Wien: Austrian Standards, 2016.
- [22] Bayrisches Zentrum für Angewandte Energieforschung, „BINE Informationsdienst,“ FIZ Karlsruhe - Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH, 05 09 2016. [Online]. Available: <http://www.bine.info/publikationen/publikation/latentwaermespeicher-in-gebaeuden/phasenuebergang-puffert-waerme-forts/>.
- [23] Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz OIB-330.6-009/15, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015.
- [24] F. Friembichler, T. Bednar, S. Handler, M. Gladt, M. Neusser, R. Hofer und H. Schöberl, *Thermische Bauteilaktivierung - Entwicklung eines Rechenkerns.*, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013.
- [25] C. Meunier, L. Schoen, L. Voigt und C. Zinsius, „ProBas Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme,“ Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes, [Online]. Available: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>. [Zugriff am 18 09 2016].
- [26] Austrian Standards, ÖNORM EN 12975-2 - Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren - Teil 2: Prüfverfahren, Wien: Austrian Standards, 2006.
- [27] Austrian Standards, Solarenergie - Thermische Sonnenkollektoren - Prüfverfahren (ISO 9806:2013), Wien: Austrian Standards, 2014.
- [28] Solar Keymark Database, „The Solar Keymark Database,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.solarkeymark.dk/>. [Zugriff am 19 09 2016].
- [29] Sonnenhaus-Institut e.V., „Sonnenhaus-Institut,“ Sonnenhaus-Institut e.V., [Online]. Available: <http://www.sonnenhaus-institut.de/solararchitektur/solar-baufirmen-sonnenhaeuser/solarheizung/solaranlage-heizkonzept.html>. [Zugriff am 16 09 2016].
-

- [30] U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC., „National Center for Photovoltaics,“ 13 05 2016. [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/ncpv/>. [Zugriff am 18 09 2016].
- [31] RICHTLINIE 2002/31/EG DER KOMMISSION vom 22.März. 2002 zur Durchführung der Richtlinie 92/75/EWG des Rates betreffend die Energieetiketierung für Raumklimageräte, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, 2002.
- [32] Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich: Verordnung 421 Teil II, Raumklimageräte-Verbrauchsangabenverordnung, Wien: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, 2004.
- [33] M. Marek, G. Danny, T. Kramer, T. Oltersdorf und J. Wapler, Wärmepumpen Effizienz, Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb, Kurzfassung, Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Bereich Thermische Anlagen und Gebäudetechnik, Abteilung Solares Bauen , 2011.
- [34] „Energie Aktiv- Informationsplattform des Landes Salzburg,“ Energieberatung Salzburg, 2010. [Online]. Available: <http://www.produktdatenbank-get.at/#>. [Zugriff am 17 09 2016].
- [35] DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 812/2013 DER KOMMISSION vom 18. Februar 2013, Zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energieeffizienz kennzeichnung von Warmwasserbereitern, Warmwasserspeichern und Verbundanlagen aus Warmwasserbereitern und Solareinrichtungen, Brüssel: Amtsblatt der Europäischen Union, 2013.
- [36] VERORDNUNG (EU) Nr. 814/2013 DER KOMMISSION vom 2.August 2013, zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Warmwasserbereitern und Warmwasserspeichern, Brüssel: Amtsblatt der Europäischen Union, 2013.
- [37] J.-O. Dalenbäck und T. Jilar, „Swedish solar heating with seasonal storage-design, performance and economy,“ *International Journal of Ambient Energy*, pp. 123-128, 01 07 1985; 6(3).
- [38] BINE Informationsdienst - Energieforschung für die Praxis, „Sommersonne Heizt im Winter,“ 2009. [Online]. Available: [www.bine.info](http://www.bine.info). [Zugriff am 25 09 2016].
- [39] Verein Deutscher Ingenieure e.V., Thermische Nutzung des Untergrundes, Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [40] FIZ Karlsruhe GmbH - Büro Bonn, „ENERGIESPEICHER- Forschungsinitiative der Bundesregierung: Langzeitwärmespeicher zur Gebäudebeheizung,“ FIZ Karlsruhe - Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH, 07 07 2016. [Online]. Available: <http://forschung-energiespeicher.info/>. [Zugriff am 25 09 2016].
- [41] Bine Informationsdienst, „Energieforschung für die Praxis,“ FIZ Karlsruhe - Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH, [Online]. Available: [www.bine.info](http://www.bine.info). [Zugriff am 15 09 2013].
- [42] EVN AG, „EVN: Gas und Kohle,“ EVN AG, [Online]. Available: [www.evn.at](http://www.evn.at). [Zugriff am 25 09 2016].
- [43] A. Floß und C. Dietrich, „Effektivitätssteigerung von Wärmespeichern, Mit neuer Effizienzanalyse zu größeren Speicherkapazitäten in hydraulischen Systemen,“ *FACH.JOURNAL 2010*, pp. 4-8, 02 04 2013.
- [44] Solites, Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, „Saisonalspeicher.de: Das Wissensportal für die saisonale Wärmespeicherung,“ Steinbeis Innovation gGmbH (SIG), 2016. [Online]. Available: <http://www.saisonalspeicher.de/>. [Zugriff am 25 09 2016].



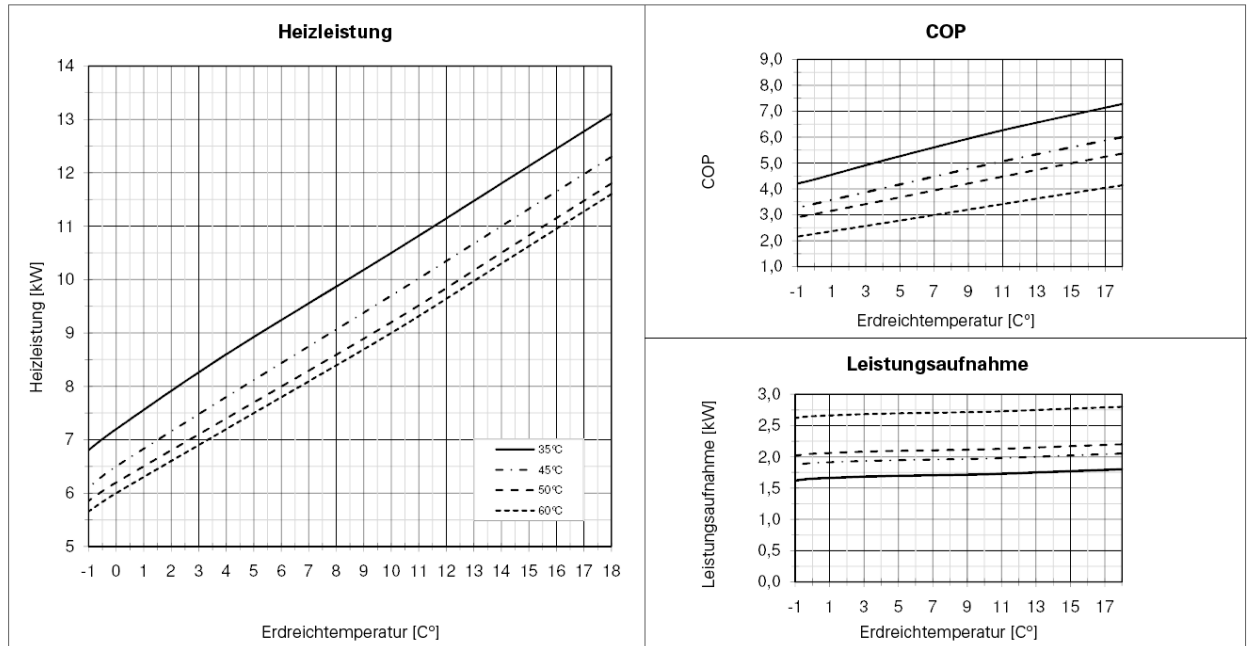
- 
- [45] Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 4640-4: Thermische Nutzung des Untergrundes, Dirkte Nutzung, Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH, 2004, Inhaltliche Prüfung 2009.
- [46] T. Richter und T. Wick, Einführung in die Numerische Mathematik, 2.Auflage Sommer 2014, Heidelberg: Universität Heidelberg, 2014.
- [47] Austrian Standards, ÖNorm B 8110-5: 2011-03-01, Klimamodell und Nutzungsprofile, Wien: Austrian Standards, 2011.
- [48] Austrian Standards, ÖNorm B 8110-6: 2010-01-01, Grundlagen und Nachweisverfahren Heizwärmebedarf und Kühlbedarf, Wien: Austrian Standards, 2010.
- [49] Österreichisches Institut für Bautechnik, Leitfaden Energietechnisches Verhalten von Gebäuden, Version 2.6, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2007.
- [50] Austrian Standards, ÖNorm H 5056: 2011-03-01, Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Heiztechnik Energiebedarf, Wien: Austrian Standards, 2011.
- [51] Austrian Standards, ÖNorm H 5058: 2011-03-01, Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden- Energiebedarf, Wien: Austrian Standards, 2011.
- [52] J. Claesson und S. Javed, „A Load-Aggregation Method to Calculate Extraction Temperatures of Borehole Heat Exchangers,“ in *ASHRAE Transactions* 118:530-539, Chicago, 2012.
- [53] E. Kjellsson, Solar Collectors Combined with Ground-Source Heat Pumps in Dwellings, Analyses of System Performance, Lund: Building Physics LTH, Lund University, 2009.
- [54] Hummelsberger Stahl- und Metallbau, „Vakuum Pufferspeicher,“ 2016. [Online]. Available: <http://vakuum-pufferspeicher.de/>. [Zugriff am 26 10 2016].
- [55] Geologische Bundesanstalt, „Geologische Bundesanstalt,“ Korbler GmbH, [Online]. Available: <https://www.geologie.ac.at/>. [Zugriff am 30 10 2016].
- [56] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, „eHyd,“ kraftwerk | Agentur für neue Kommunikation, 2015. [Online]. Available: <http://ehyd.gv.at/>. [Zugriff am 30 10 2016].
- [57] Wiener Brückenbau und Grundbau (Magistratsabteilung 29), „wien.at,“ Presse- und Informationsdienst der Stadt Wien (MA 53), 2016. [Online]. Available: <https://www.wien.gv.at/verkehr/grundbau/kataster.html>. [Zugriff am 30 10 2016].
- [58] H. Kobus, T. Söll und H. Mehlhorn, „Temperaturanomalien in Porengrundwasserleitern zufolge Warm- oder Kaltwassereinleitung,“ *Wasserwirtschaft* 73, pp. 265-270, 1983.
- [59] Klima- und Energiefonds, *Photovoltaik- Fibel 2015*, Wien: Klima- und Energiefonds, 2015.
- [60] P. Biermayr, M. Eberl, M. Enigl, H. Fechner, C. Kristöfl, K. Leonhartsberger, F. Maringer, C. Schmidl, S. Moidl, C. Strasser, W. Weiss und E. Wopienka, *Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2014*, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2015.
- [61] Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrundes, Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH, 2006-2015.

- [62] D. Deunert und T. Holthuizen, „Wärmeenergieversorgungsanlage mit einem offenen Erdspeicher“. AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR BA ME Patent EP 2 713 110 A1, 02 04 2014.

## Anhang A- Datenblätter

### OCHSNER WÄRMEPUMPEN | ERDREICH DIREKTERWÄRMUNG GMDW 8 PLUS

#### LEISTUNGSKURVEN GMDW 8 PLUS:

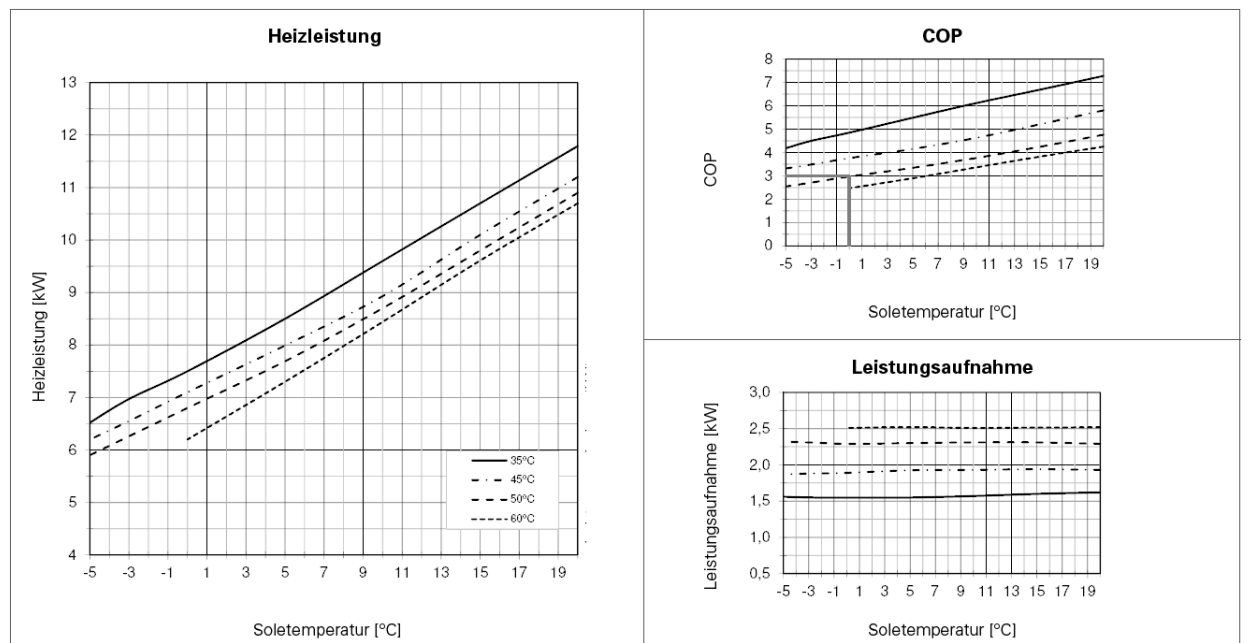


www.ochsner.com

Abbildung A.1: Leistungskurven einer Sole- Wasser Wärmepumpe der Fa. Ochsner: bei 0 °C Erdreichtemperatur und 50 Kelvin Temperaturspreizung ergibt sich eine Leistungszahl von 3,0

### OCHSNER WÄRMEPUMPEN | EDREICH SOLE GMSW 8 PLUS

#### LEISTUNGSKURVEN GMSW 8 PLUS:



www.ochsner.com

Abbildung A.2: Leistungskurven einer Sole- Wasser Wärmepumpe der Fa. Ochsner: bei 0 °C Erdreichtemperatur und 50 Kelvin Temperaturspreizung ergibt sich eine Leistungszahl von 3,0

OCHSNER WÄRMEPUMPEN | LUFT-WASSER MIT AUSSENEINHEIT GMLW 9 PLUS

**GMLW 9 plus**

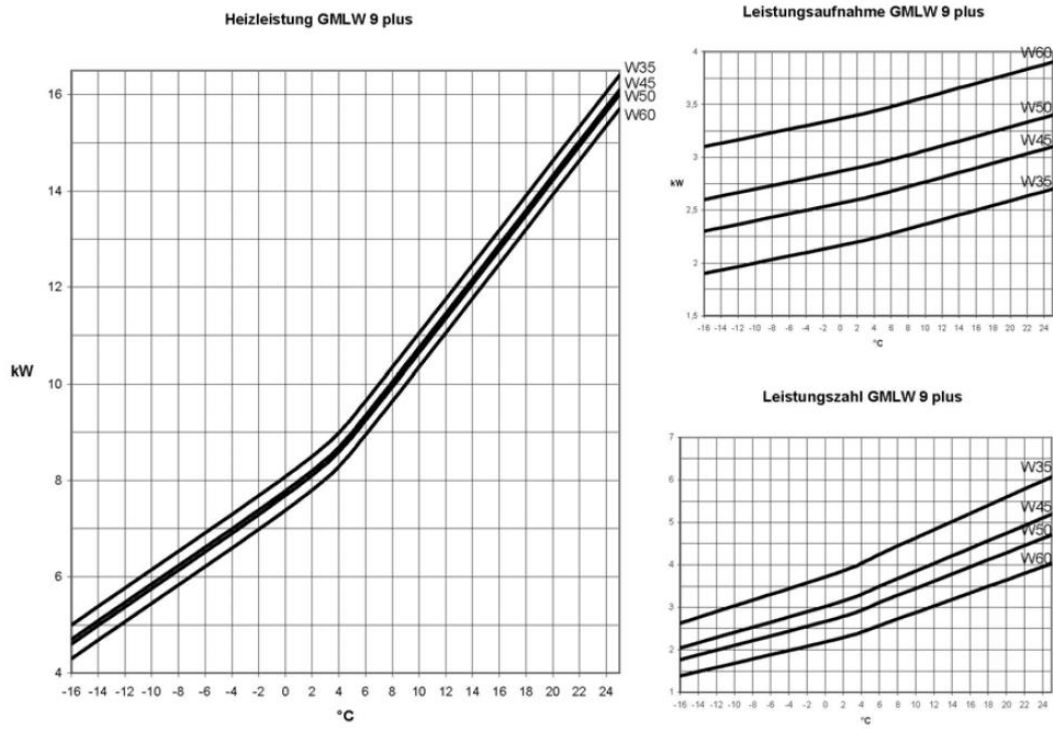


Abbildung A.3: Leistungskurven einer Luft- Wasser-Wärmepumpe der Fa. Ochsner: bei 0 °C Lufttemperatur und 50 Kelvin Temperaturspreizung ergibt sich eine Leistungszahl von 2,7



Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente

## 1. Allgemeine Informationen

### 1.1 Beschreibung

Flachkollektor zur solaren Warmwasserbereitstellung in Deutschland, inkl. Warmwasserspeicher (150 l), Pump- und Regelstation, Rohrleitungen (Länge 20 m); System als typisch für Deutschland aus Firmenangaben erzeugt für den Referenzstandort Würzburg; Bruttofläche des Kollektorfelds beträgt 4,74 m<sup>2</sup>. Energiedaten und Materialbilanz nach #1

### 1.2 Referenzen

#1 <http://www.gemis.de/de/doc/prc/{86D8FCE0-0B25-4942-9160-14BF69E934D9}.htm>

### 1.3 Projektspezifika

gemis

### 1.4 Weitere Metadaten

Quelle	Öko-Institut
Projekte	BMU LCA-EE 2012
Bearbeitet durch	IINAS - International Institute for Sustainability Analysis
Datensatzprüfung	Review durchgeführt
Ortsbezug	Deutschland
Zeitbezug	2010

### 1.5 Technische Kennwerte

Auslastung	1500 h/a
Brenn-/Einsatzstoff	Ressourcen
Flächeninanspruchnahme	3,77 m <sup>2</sup>
Jahr	2010
Lebensdauer	20 a
Leistung	0,0013 MW
Nutzungsgrad	100 %
Produkt	Wärme - Heizen
Funktionelle Einheit	1 TJ Warmwasser

Abbildung A.4: Auszug aus der ProBas Datenbank:  
Beschreibung zur Solaranlage mit Eingangswerten [25]



Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente

## 1. Allgemeine Informationen

### 1.1 Beschreibung

Photovoltaikanlage aus 20 monokristallinen Solarmodulen mit 175 Wp in Deutschland, Daten aus #1. Einstrahlung mit 1.000 kWh/m<sup>2</sup>\*a angenommen (guter Standort), System mit Alu-Rahmen inkl. Aufständigung nach DIN. Die Installation erfolgt auf einem Dach. Daten für Stahl-, Alu-, Kupferaufwand geschätzt. Die Anlage ist mit einem Winkel von 30° aufgeständert sind. Der Wechselrichter hat einen mittleren Wirkungsgrad von 96%. Je Modul sind 1,25 m<sup>2</sup> nötig, die Flächeninanspruchnahme beträgt 21,65 m<sup>2</sup>. Das Gewicht beträgt pro Modul 17,4 kg, insgesamt 103,6 kg/kW. Alle Daten nach #1 außer Kosten nach #2.

Der Nutzungsgrad der Module beträgt 11,56 %, bezogen auf die solare Einstrahlung. Hier wurde der Nutzungsgrad auf 100% gesetzt, um den Regeln der KEV-Bilanzierung zu genügen.

### 1.2 Referenzen

#1 Energy Centre of the Netherlands (ECN) 2005: Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production, M.J. de Wild-Schoten; E.A. Alsema (Utrecht University); Table I.

#2 DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)/IWES (Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik)/IfnE (Ingenieurbüro für neue Energien) 2010: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - Leitstudie 2010?; Nitsch, Joachim et al.; i.A. des BMU, FKZ 03MAP146; Stuttgart usw.

#3 <http://www.gemis.de/de/doc/prc/{9422B23D-8441-4376-AF48-3D591AD776B0}.htm>

### 1.3 Projektspezifika

gemis

### 1.4 Weitere Metadaten

Quelle	Öko-Institut
Projekte	
Bearbeitet durch	IINAS - International Institute for Sustainability Analysis
Datensatzprüfung	Review durchgeführt
Ortsbezug	Deutschland
Zeitbezug	2010

### 1.5 Technische Kennwerte

Auslastung	1000 h/a
Brenn-/Einsatzstoff	Ressourcen
Flächeninanspruchnahme	21,7 m <sup>2</sup>
Jahr	2010
Lebensdauer	30 a
Leistung	0,00336 MW
Nutzungsgrad	100 %
Produkt	Elektrizität

Abbildung A.5: Auszug aus der ProBas Datenbank: Beschreibung zur PV-Anlage mit Eingangswerten [25]



<b>Summary of EN 12975 Test Results, annex to Solar KEYMARK Certificate</b>		<b>Licence number</b>	<b>011-7S1753 F</b>							
		<b>Date of issue</b>	<b>17.07.2012</b>							
<b>Company holding the licence</b>	<b>Monier Group Services GmbH</b>		<b>Country</b>	<b>Germany</b>						
<b>Brand (optional)</b>	<b>Monier Braas GmbH, Bramac Dachsysteme International GmbH</b>		<b>Website</b>	<b><a href="http://www.monier.com">www.monier.com</a></b>						
<b>Street, number</b>	<b>Frankfurter Landstr. 2-4</b>		<b>E-mail</b>	<b><a href="mailto:webmaster.group@monier.com">webmaster.group@monier.com</a></b>						
<b>Postal Code</b>	<b>61440</b>	<b>Tel.</b>	<b>+49</b>	<b>61 71 61 0 06</b>						
<b>City</b>	<b>Oberursel</b>	<b>Fax</b>	<b>+49</b>	<b>61 71 61 23 00</b>						
<b>Collector Type (flat plate / evacuate tubular / un-glazed)</b>			<b>Flat plate collector</b>							
<b>Integration <u>in</u> the roof possible ?</b>			<b>Yes</b>							
Collector name	Aperture area (A <sub>a</sub> ) [m <sup>2</sup> ]	Gross length [mm]	Gross width [mm]	Gross height [mm]	Gross area (A <sub>G</sub> ) [m <sup>2</sup> ]	Power output per collector unit G = 1000 W/m <sup>2</sup> T <sub>m</sub> -T <sub>a</sub> :				
						0 K	10 K	30 K	50 K	70 K
						[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
Braas TK 4, Bramac SolarDach PRO 4E	3,68	2.040	2.027	106	4,13	3.036	2.890	2.562	2.189	1.772
Braas TK 6, Bramac SolarDach PRO 6E	5,52	2.039	3.019	110	6,16	4.550	4.331	3.840	3.281	2.656
Braas TK 8, Bramac SolarDach PRO 8E	7,36	2.039	4.012	110	8,18	6.067	5.775	5.120	4.374	3.541
Braas TK 10, Bramac SolarDach PRO 10E	9,20	2.039	5.005	110	10,21	7.584	7.219	6.400	5.468	4.426
<b>Collector efficiency parameters related to aperture area (A<sub>a</sub>)</b>		Type of fluid and flow rate see note 1		$\eta_{0a}$		0,824	-			
				$a_{1a}$		3,830	W/(m <sup>2</sup> K)			
				$a_{2a}$		0,015	W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )			
<b>Stagnation temperature - Weather conditions see note 2</b>				t <sub>stg</sub>		198	°C			
<b>Effective thermal capacity</b>				c <sub>eff</sub> = C/A <sub>a</sub>		10,47	kJ/(m <sup>2</sup> K)			
<b>Max. operation pressure - see note 3</b>				p <sub>max</sub>		1000	kPa			
Incidence angle modifiers K <sub>θ</sub> (θ)	G <sub>DIF</sub> /G <sub>TOT</sub>		θ <sub>T</sub> / θ <sub>i</sub> K <sub>θ</sub> (θ <sub>i</sub> )	50°	10°	20°	30°	40°	60°	70°
	min	max								
	G <sub>DIF</sub> /G <sub>TOT</sub> : min&max - while measuring		0,06	0,2	K <sub>θ</sub> (θ <sub>i</sub> )	0,92				
						<i>Optional values</i>				
<b>Testing Laboratory</b>		<b>AIT Austrian Institute of Technology GmbH</b>								
<b>Website</b>		<b><a href="http://www.ait.ac.at">www.ait.ac.at</a></b>								
<b>Test report id. number</b>		2.04.00975.1.0-LT/2.04.00975.1.0-QT/ 2.04.00975.1.0-LT(1)/2.04.00975.1.0-QT(1)								
<b>Date of test report</b>		11.06.2012 / 05.07.2012								
<b>Perf. test method</b>		EN 12975-2 6.1.5 (indoor)								
<b>Comments of testing laboratory :</b>  										
Note 1	Fluid	Water	Flow rate	0,034	kg/s per m <sup>2</sup>	AIT Austrian Institute of Technology GmbH Donau-City-Strasse 1   1220 Wien, Austria T +43 (0) 50550-0   F +43 (0) 50550-0 office@ait.ac.at   www.ait.ac.at				
Note 2	Irradiance, G <sub>s</sub> =1000 W/m <sup>2</sup> ; Ambient temperature, T <sub>a</sub> =30 °C									
Note 3	Given by manufacturer									

DIN CERTCO • Alboinstraße 56 • 12103 Berlin  
 Tel: +49 30 7562-1131 • Fax: +49 30 7562-1141 • E-Mail: info@dincertco.de • www.dincertco.de

Abbildung A.6: Prüfprotokoll des TÜV Rheinland zum Bramac Solakollektor Teil 1

Annual collector output based on EN 12975 Test Results, annex to Solar KEYMARK Certificate	Licence number	011-7S1753 F
	Issued	17.07.2012

Annual collector output kWh														
Collector name	Location and collector temperature (T <sub>m</sub> )													
	Athens			Davos			Stockholm			Würzburg				
	25°C	50°C	75°C	25°C	50°C	75°C	25°C	50°C	75°C	25°C	50°C	75°C		
Braas TK 4, Bramac SolarDach PRO 4E	4.757	3.380	2.187	3.873	2.645	1.624	2.657	1.732	1.037	2.886	1.866	1.099		
Braas TK 6, Bramac SolarDach PRO 6E	7.130	5.066	3.278	5.805	3.964	2.434	3.982	2.596	1.554	4.325	2.797	1.647		
Braas TK 8, Bramac SolarDach PRO 8E	9.506	6.754	4.370	7.740	5.286	3.245	5.310	3.461	2.072	5.767	3.729	2.196		
Braas TK 10, Bramac SolarDach PRO 10E	11.883	8.443	5.463	9.675	6.607	4.057	6.637	4.326	2.590	7.209	4.661	2.745		

Collector mounting: Fixed or tracking	Fixed; slope = latitude - 15° (rounded to nearest 5°)
---------------------------------------	---

Overview of locations				
Location	Latitude °	Gtot kWh/m <sup>2</sup>	Ta °C	Collector orientation or tracking mode
Athens	38	1.765	18,5	South, 25°
Davos	47	1.714	3,2	South, 30°
Stockholm	59	1.166	7,5	South, 45°
Würzburg	50	1.244	9,0	South, 35°

Gtot	Annual total irradiation on collector plane	kWh/m <sup>2</sup>
Ta	Mean annual ambient air temperature	°C
Tm	Constant collector operating temperature (mean of in- and outlet temperatures)	°C

Calculation of the annual collector performance is done by the official Solar Keymark spreadsheet tool. Hour by hour the collector output is calculated according to the efficiency parameters from the Keymark test using constant collector operating temperature (T<sub>m</sub>). Detailed description with all equations used is available from the Solar Keymark web site (direct link: <http://www.estif.org/solarkeymark/annexb1.php>)

DIN CERTCO • Alboinstraße 56 • 12103 Berlin Tel: +49 30 7562-1131 • Fax: +49 30 7562-1141 • E-Mail: info@dincertco.de • www.dincertco.de.	Datasheet version:
	VERSION 3.6, 2012.01.20
	Calculation program version:
	3.07, October 2011 (SP)

Abbildung A.7: Prüfprotokoll des TÜV Rheinland zum Bramac Solakollektor Teil 2



# AUSTRIA / ÖSTERREICH

## Global irradiation and solar electricity potential Horizontally mounted photovoltaic modules

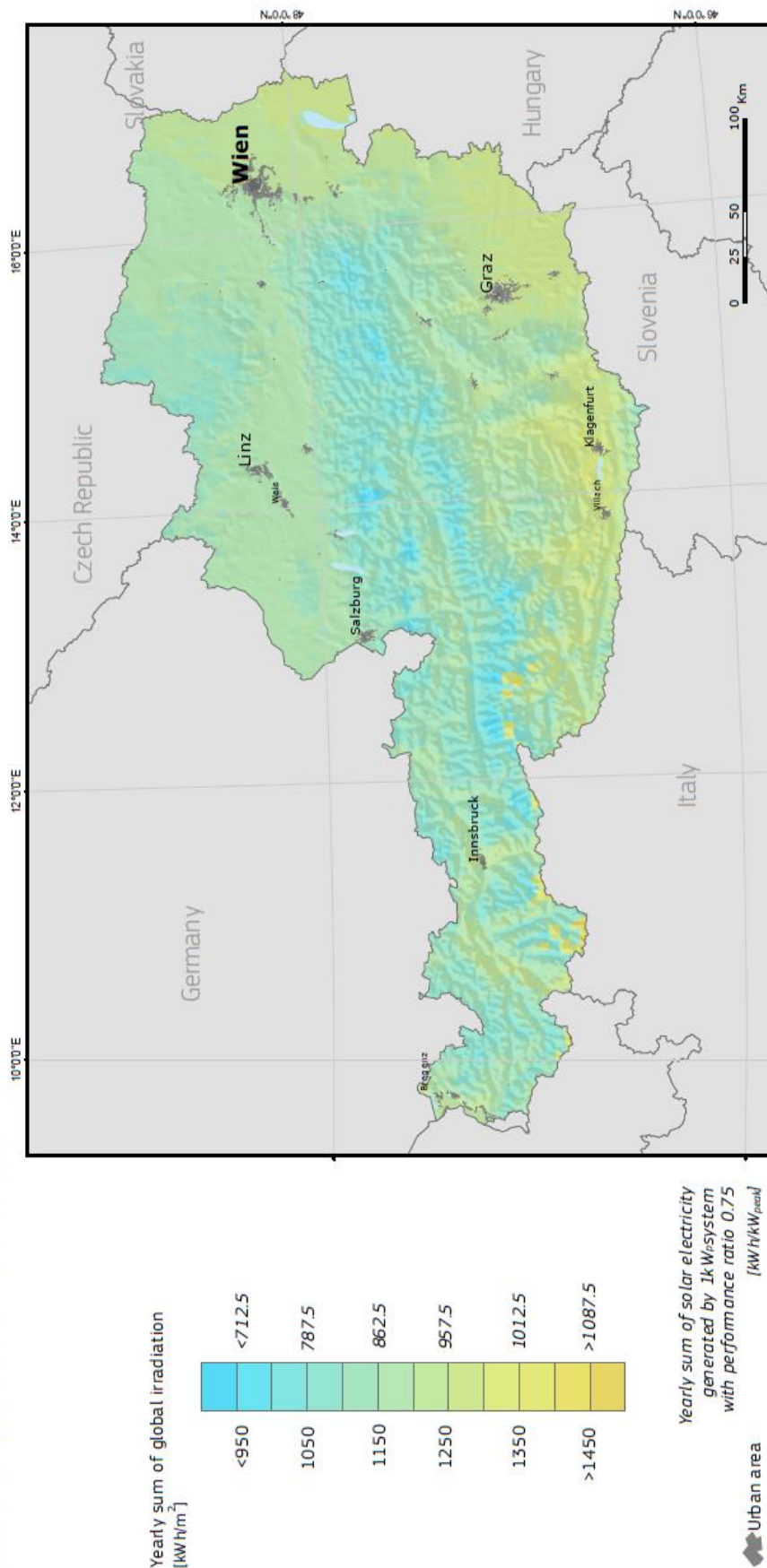


Abbildung A.8 Globaleinstrahlung in Österreich (direkte und diffuse Strahlung) auf horizontal geneigte Flächen, Richtung Süden gerichtet; Mittelwert der Datenerhebung von 1996-2011 mit einer Rastergröße von 1x1 km nach [18] und [19]

## Anhang B- Referenzobjekt

In diesem Anhang sind die wesentlichen bautechnische Eckdaten des Referenzobjektes, ohne nähere Beschreibung der Aufbauten, angegeben. Die Bruttogeschoßfläche des Bauwerkes auf den 3 Geschöben mit 2 oberirdischen Geschöben und einer kleinen Teilunterkellerung beträgt 268 m<sup>2</sup>, der spez. standortbezogene HWB beträgt=22,3 kWh/a. Der hygienische Luftwechselbedarf wird mithilfe einer kontrollierten Wohnraumlüftung sichergestellt. Mit der Wärmerückgewinnung von 90 Prozent wird ein Leitwert von 6,22 W/K berücksichtigt.

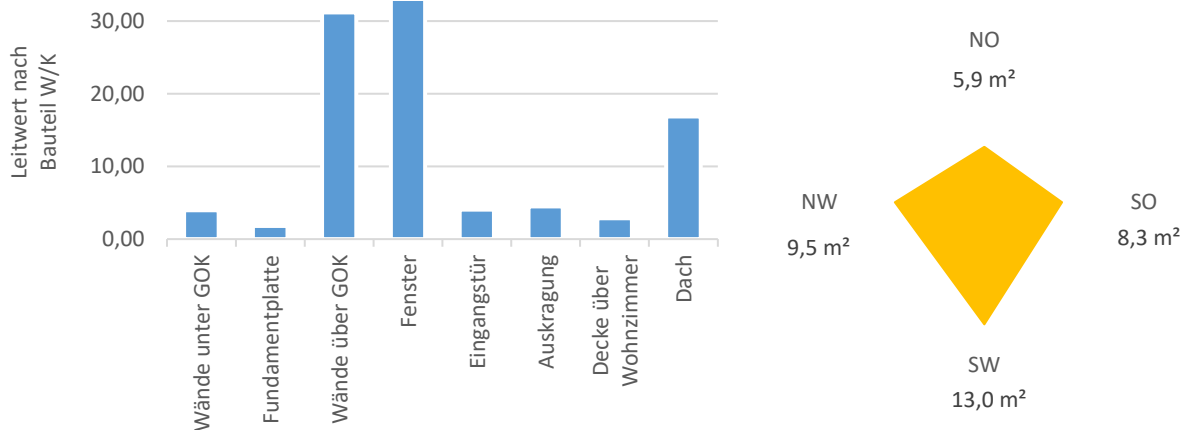


Abbildung B.1: Links: Gegenüberstellung der Wärmeleitwerte beim Vergleichsobjekt L, ges=98,34 W/K, Rechts: Größe und Orientierung der Fenster

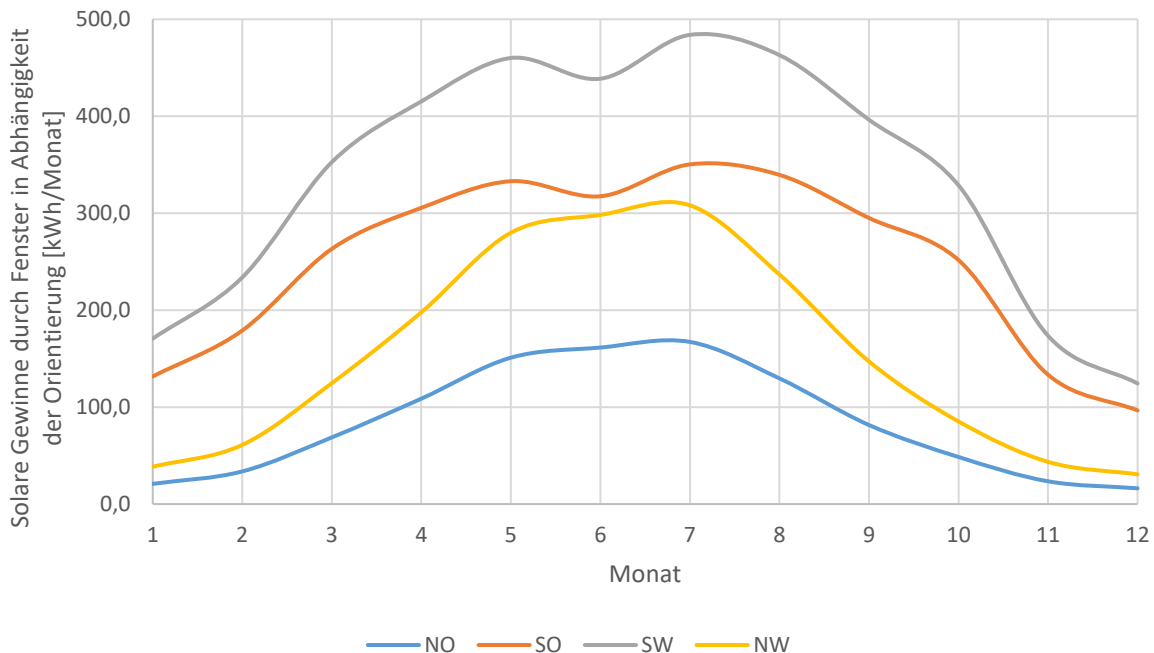


Abbildung B.2: Solarer Ertrag der Fenster in Abhängigkeit der Orientierung, aufgrund der Auskragungen und dem steilen Einfallswinkel ist eine konstruktive Verschattung im Hochsommer gegeben

Aufgrund der verhältnismäßig großen Glasflächenanteile, wird der Gesamtleitwert des Einfamilienhauses zu einem Drittel von den Fensterflächen bestimmt. Im Gegenzug dazu erwirtschaften die Glasflächen auch in der Übergangszeit hohe Gewinne. Die inneren Gewinne wurden für einen Haushalt mit 4 Personen mit 712 W Dauerleistung angenommen.

Die Speichermasse des Bauwerks ist durch die Außenwände und massiven Decken bestimmt, zur groben Abschätzung werden nur die Bauteile mit der größten Ausdehnung berücksichtigt. Die Tabelle B.1 zeigt die Berechnung der Wärmespeicherkapazität, das Ergebnis liegt bei rund 75 kWh/K. Für einen Kelvin Temperaturunterschied, müssen dem Haus 75 kWh an Wärmeenergie zugeführt werden.

**Tabelle B.1: Abschätzung der Wärmespeicherkapazität des Vergleichsobjekts**

Bauteil	Material	Dicke m	Fläche m <sup>2</sup>	Volumen m <sup>3</sup>	Wichte kg/m <sup>3</sup>	Gewicht kg	Spezifische Wärmespeicher- kapazität J/kg.K	Wärmespeicher- kapazität J/K	Wärmespeicher- kapazität kWh/K
Fundamentplatte KG	Beton	0,25	19,35	4,84	2500	12.094	879	1,06E+07	2,95
Wände KG	Beton	0,25	40,32	10,08	2500	25.200	879	2,22E+07	6,15
FUP EG +DE. ü. KG	Beton	0,25	116,00	29,00	2500	72.500	879	6,37E+07	17,70
Wände EG	Beton	0,20	84,40	16,88	2500	42.200	879	3,71E+07	10,30
Decke über EG	Beton	0,20	128,00	25,60	2500	64.000	879	5,63E+07	15,63
Wände OG	Beton	0,20	125,87	25,17	2500	62.935	879	5,53E+07	15,37
Zwischenwände	Ziegel	0,15	98,00	14,70	650	9.555	920	8,79E+06	2,44
Dachstuhl	Holz			7,00	420	2.940	1700	5,00E+06	1,39
Dämmstoff	EPS-F	0,20	350	70,00	40	2.800	1500	4,20E+06	1,17
<b>Summe</b>						<b>294.224</b>			<b>73,10</b>

## Anhang C- Neu entwickeltes Modell zur saisonalen Wärmespeicherung mit Tiefenbohrung in Simulink

In Abbildung C.1 ist das neu entwickelte Modell mit Hilfe von Simulink dargestellt. Die Darstellung erfolgt mit einem Petri-Netz, das eine einfache Adaptierung der Anlagenteile zulässt und die Abhängigkeiten einfach wiedergibt. Das vorliegende Modell basiert auf Teilen bereits bestehender und validierter Modelle, die Schwierigkeit bei der Implementierung der Modelle liegt in den variierenden Zeitschritten der Teilabschnitte, die bedingt durch die unterschiedlichen Funktionsweisen erforderlich sind. In den weiteren Abbildungen werden die Teilabschnitte der Programme dargestellt.

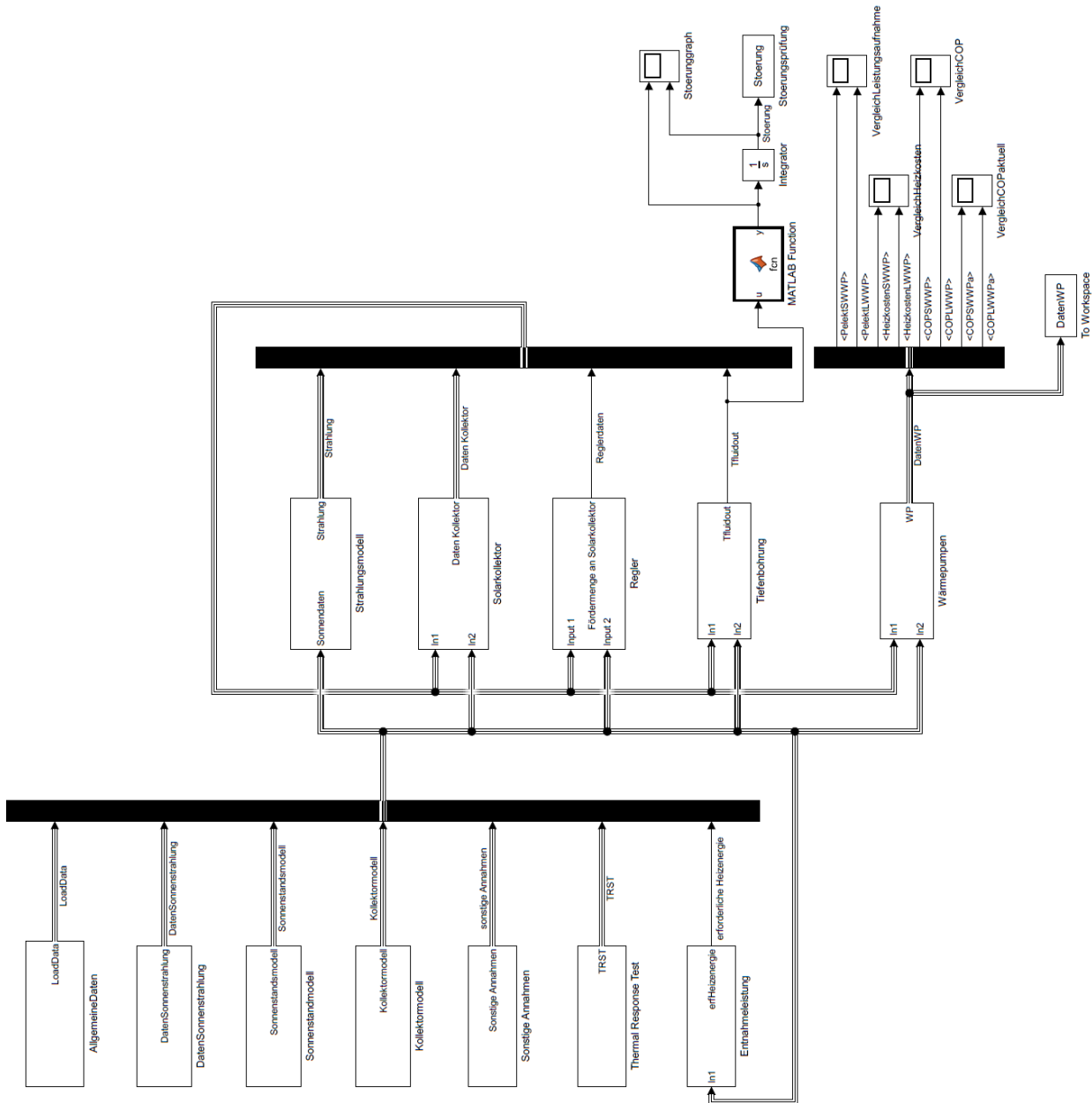


Abbildung C.1: Übersicht des Tiefenbohrungsmodells, gekoppelt mit Leistungsentnahme durch ein vereinfachtes Gebäudemodell und Leistungszuführung über Solarkollektoren

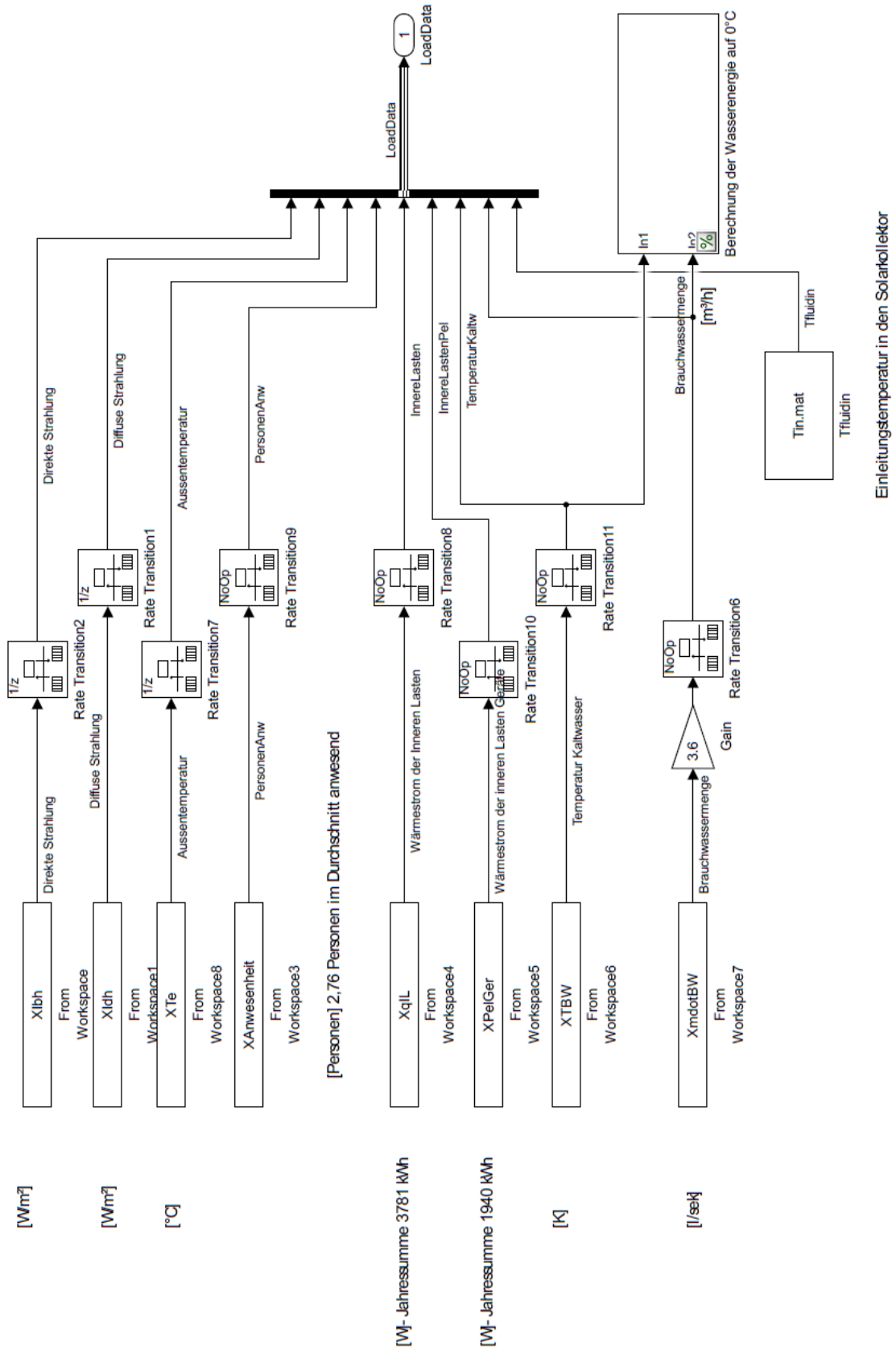


Abbildung C.2: Modellteil „Allgemeine Daten“: Randbedingungen, angefangen von Raumtemperatur bis hin zur Brauchwasserentnahme

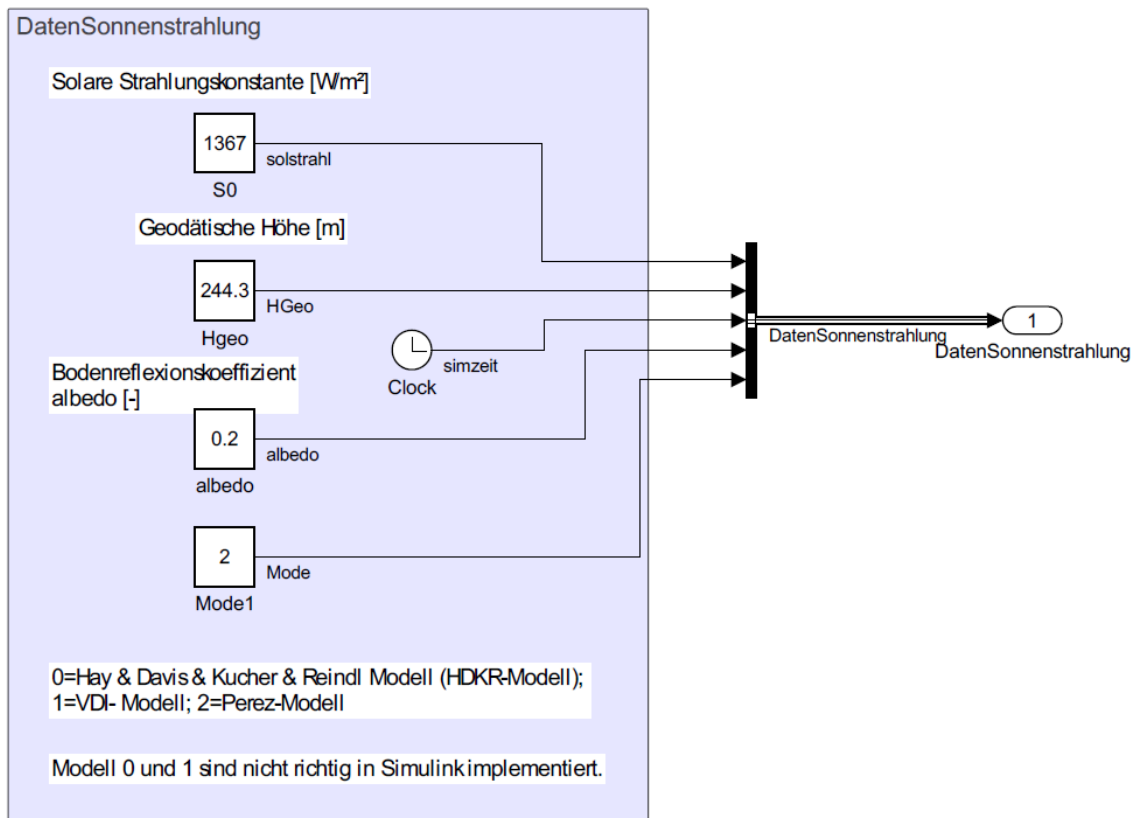


Abbildung C.3: Modellteil „Daten“ Sonnenstrahlung: Randbedingungen für den Standort

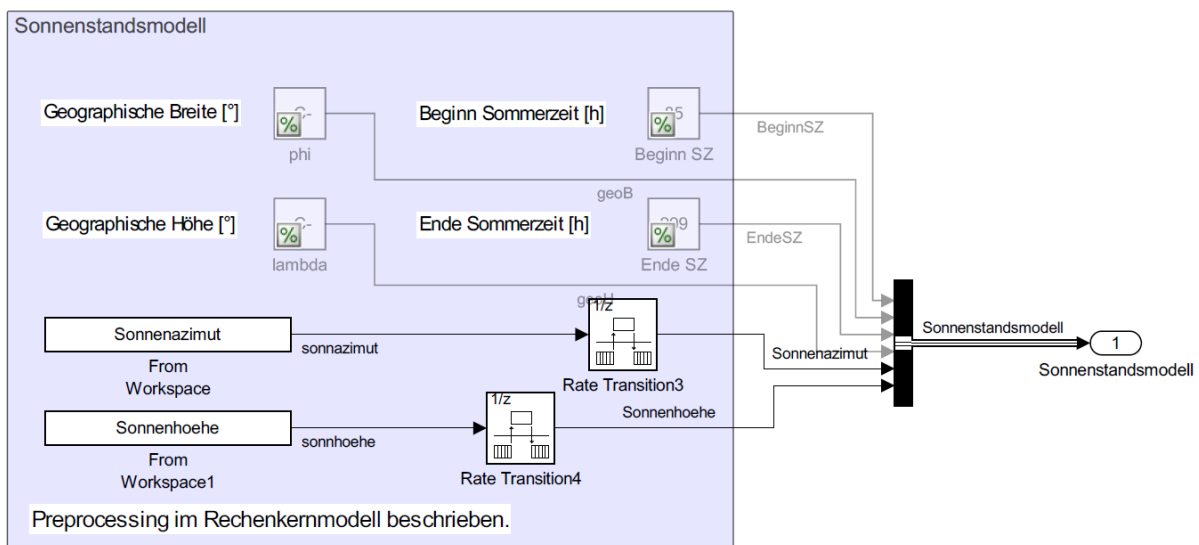


Abbildung C.4: Modellteil „Sonnenstandsmodell“: Sonnenstand nach dem Rechenkernmodell [24] für den Standort Wien, berechnet und als Randbedingung angenommen

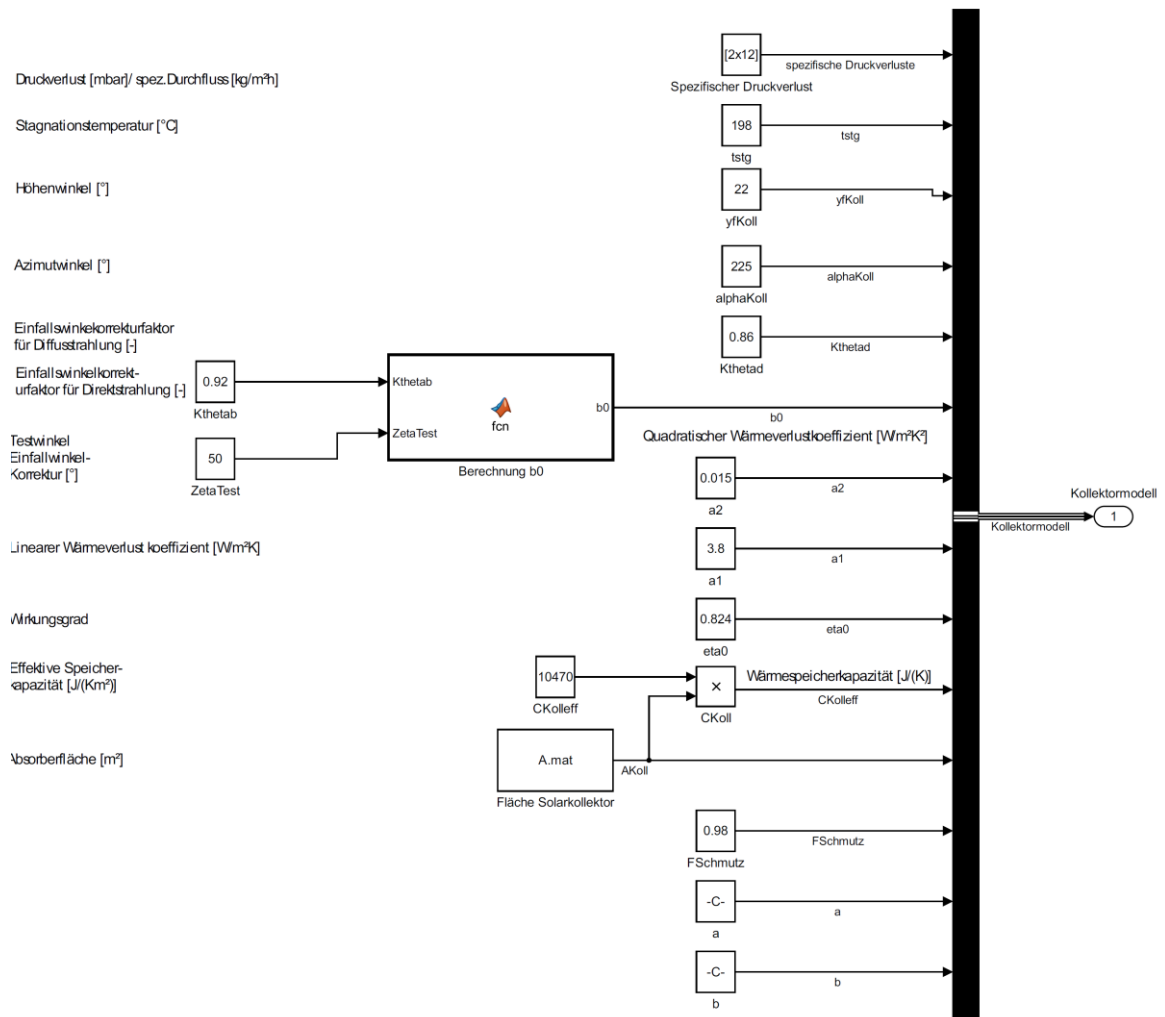


Abbildung C.5: Modellteil „Kollektormodell“: Randbedingungen für den Solarkollektor gemäß den Prüfprotokollen des Solarkollektors aus Anhang A, Abbildung A.6 und A.7

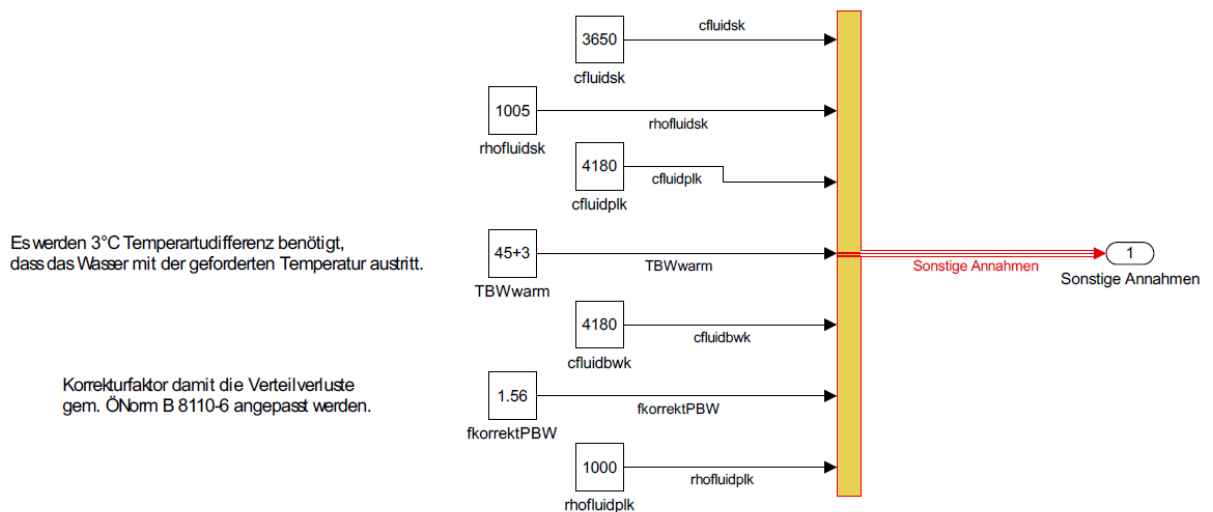


Abbildung C.6: Modellteil „Sonstige Annahmen“: Eigenschaften für die Solarwasserflüssigkeit und das Warmwasser

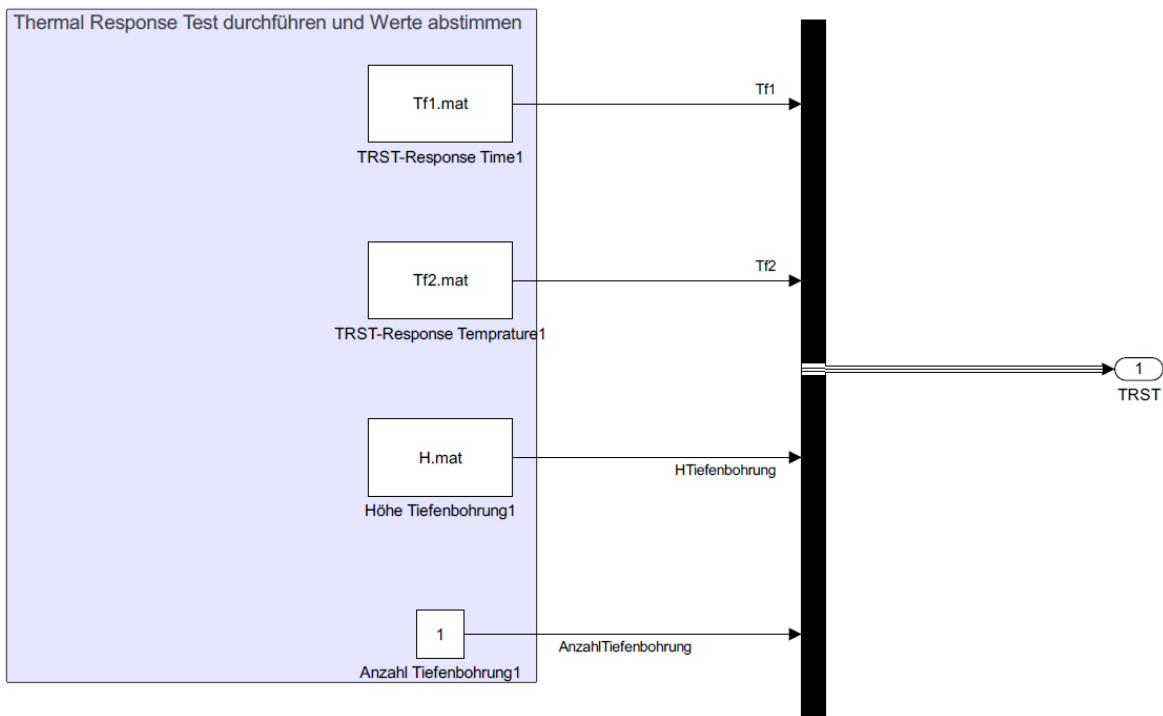


Abbildung C.7: Modellteil „Thermal Response Test“: Der TRST kann vorweg auf Basis der Untergrunddaten berechnet werden oder genauer mit Hilfe einer Probebohrung festgestellt werden. Eine Probebohrung hat den Vorteil, das auch Grundwasserverhältnisse abgeklärt werden können.

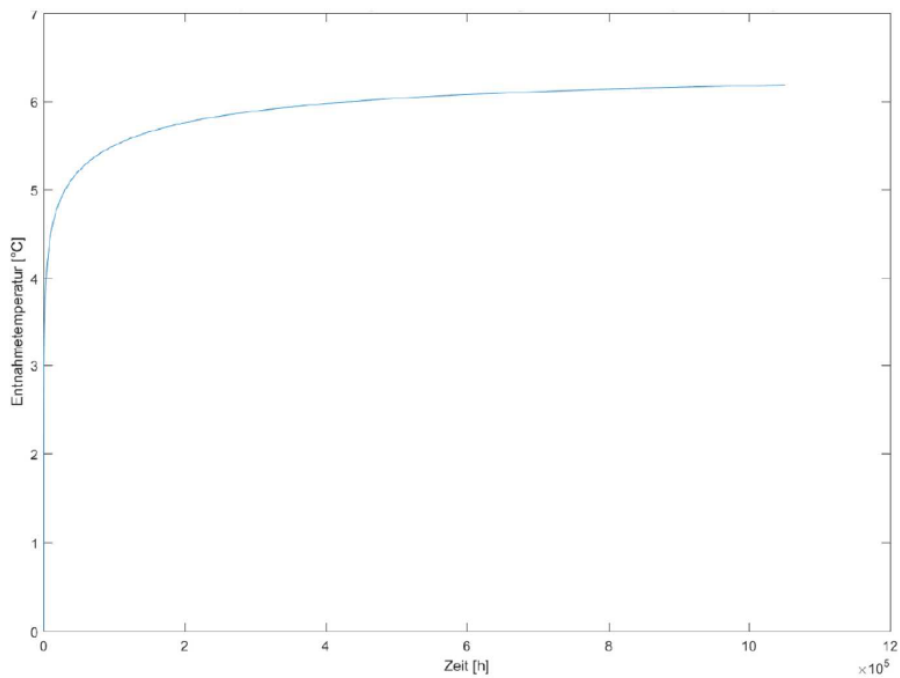


Abbildung C.8: Beispiel eines TRST für eine Tiefenbohrung; mit den Angaben zur Diffusivität kann die Temperaturänderung gegenüber der Referenztemperatur im Boden unter konstantem Leistungseintrag berechnet werden.



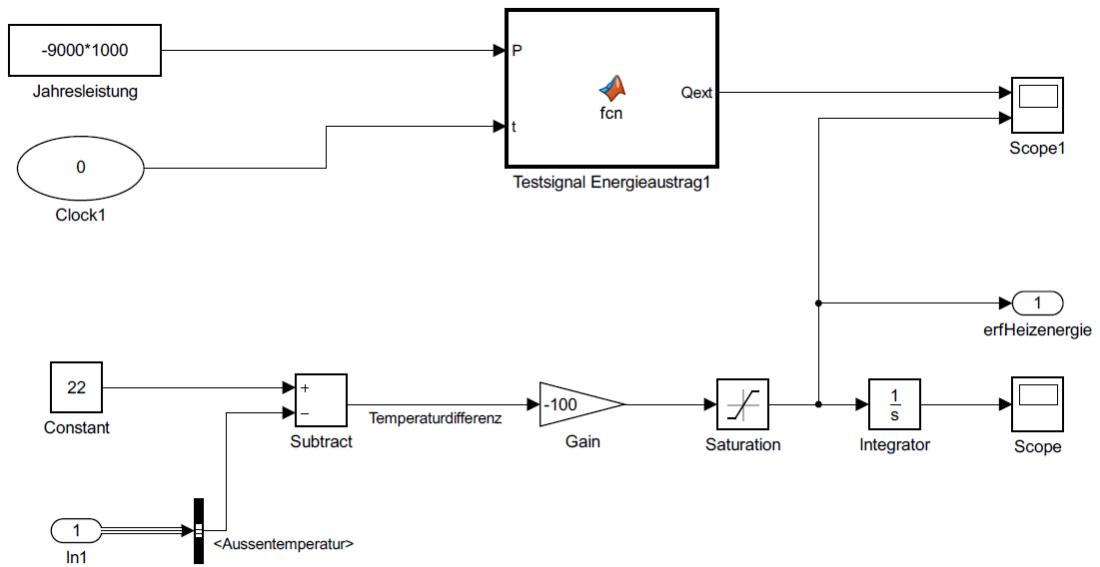


Abbildung C.9: Modellteil „Entnahmeleistung“: Vereinfachtes Gebäudemodell mit Leitwert und Beschränkung (durch Saturation) des Wertebereiches in negative Teilwerte

Mit:

```
function Qext = fnc(P,t)
%#codegen

Qext=P/8760*cos (t/8760*2*pi ()) +P/8760;
```

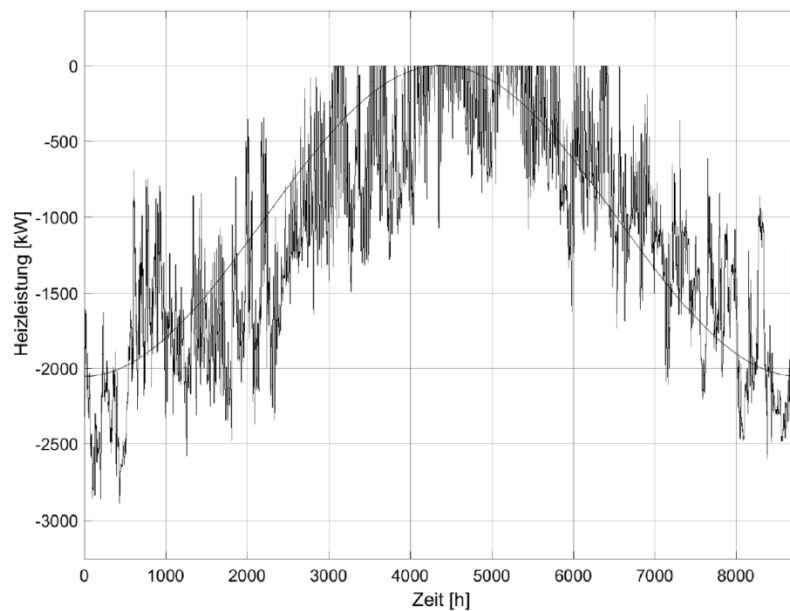
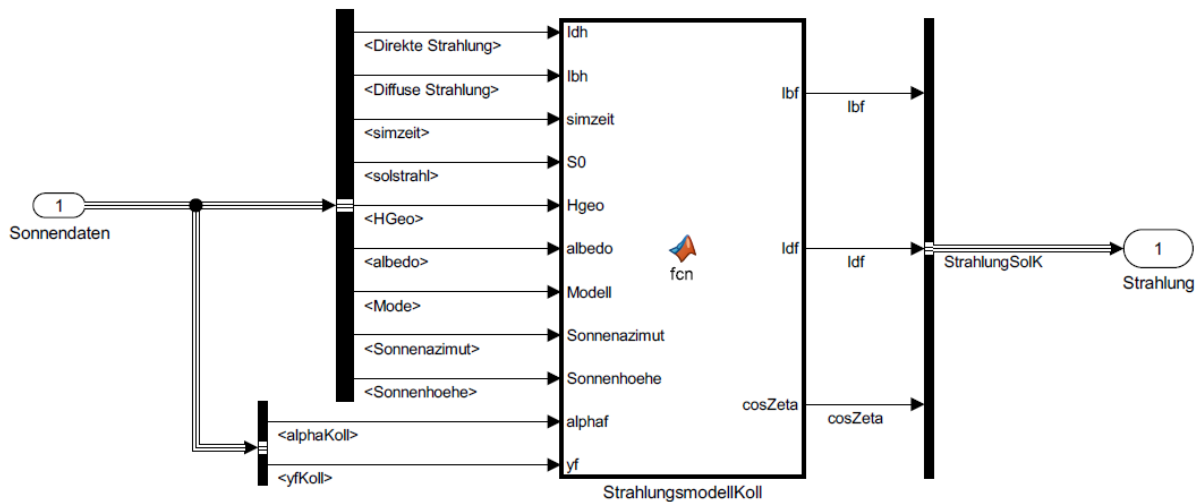


Abbildung C.10: Erforderliche Heizleistung mit der Begrenzung (durch Saturation) auf  $\mathbb{R}^+$



**Abbildung C.11: Modellteil „Entnahmeleistung“: Vereinfachtes Gebäudemodell mit Leitwert und Beschränkung (durch Saturation) des Wertebereiches in negative Teilwerte**

Nachfolgend ist das Strahlungsmodell nach VDI, HDKR und Perez im Quellcode dargestellt:

```
function[Ibf,Idf,cosZeta]=
fcn(Idh,Ibh,simzeit,S0,Hgeo,albedo,Modell,Sonnenazimut,Sonnenhoehe,alphaf,yf)
%#codegen
yf=yf*pi/180; alphaf=alphaf*pi/180; Idf=0;

%% % Berechnung der Direktstrahlung (mit Begrenzung nach [VDI12])
    if Sonnenhoehe>0
        ys=Sonnenhoehe;
    else
        ys=0;
    end
    Tlinke=0;
    Tag=floor(simzeit/24)+1;
    if Tag <= 31
        Tlinke=1.7;
    elseif Tag <= 59
        Tlinke=2.1;
    elseif Tag <= 90
        Tlinke=2;
    elseif Tag <= 120
        Tlinke=1.9;
    elseif Tag <= 151
        Tlinke=2.1;
    elseif Tag <= 182
        Tlinke=2.5;
    elseif Tag <= 212
        Tlinke=2.5;
    elseif Tag <= 243
        Tlinke=2.3;
```

```

elseif Tag <= 273
    Tlinke=2.4;
elseif Tag <= 304
    Tlinke=1.8;
elseif Tag <= 334
    Tlinke=2.2;
elseif Tag > 334
    Tlinke=1.9;
End
S=S0*(1+0.033*cos((360*Tag/365)*pi/180));
IbnormMax=S*(exp(-Tlinke/(0.9+9.4*sin(ys)))*exp(-Hgeo/800));
cosZeta=sin(ys)*cos(yf)+cos(ys)*sin(yf)*cos(abs(alphaf-Sonnenazimut));
if ys==0
    Ibnorm=0;
Else
    Ibnorm=Ibh/sin(ys);
End
Ibf=cosZeta*min(Ibnorm,IbnormMax);
if Ibf<0
    Ibf=0;
End

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    alphas=Sonnenazimut;
    if Sonnenhoehe>0
        ys=Sonnenhoehe;
    else
        ys=0;
    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %Berechnung des Einstrahlwinkels
    cosZeta=sin(ys)*cos(yf)+cos(ys)*sin(yf)*cos(abs(alphaf-alphas));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if Modell==0
    %HDKR-Modell
        Tag=floor(simzeit/24)+1;
        S=S0*(1+0.033*cos((360*Tag/365)*pi/180));
        if ys==0
            Ai=0;
        Else
            Ai=Ibh/(S*sin(ys));
        End
        if Ibh+Idh>0
            f=sqrt(Ibh/(Ibh+Idh));
        else
            f=0;

```

```

end
    Idfiso=Idh*(1-Ai)*(1+cos(yf))/2;
if Ibh>0
    Idfzs=Idh*Ai*Ibf/Ibh;
else
    Idfzs=0;
end
    Idfhz=Idh*(1-Ai)*(1+cos(yf))/2*f*(sin(yf/2))^3;
IdfHDKR=Idfiso+Idfzs+Idfhz;
    % Anteil aus Bodenreflexstrahlung
    IdUmg=(Idh+Ibh)*0.5*albedo*(1-cos(yf));
% gesamte Diffusstrahlung vom Himmel
    Idf=IdfHDKR+IdUmg;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
elseif Modell==1
%VDI6007 Modell
    % Berechnung SSW
    Tag=floor(simzeit/24)+1;
if Tag<=31
    Tlinke=3.7;
elseif Tag<=59
    Tlinke=4.1;
elseif Tag<=90
    Tlinke=4.6;
elseif Tag<=120
    Tlinke=5.1;
elseif Tag<=151
    Tlinke=5.3;
elseif Tag<=181
    Tlinke=6.1;
elseif Tag<=212
    Tlinke=6.1;
elseif Tag<=243
    Tlinke=5.9;
elseif Tag<=273
    Tlinke=5.4;
elseif Tag<=304
    Tlinke=4.2;
elseif Tag<=334
    Tlinke=3.6;
elseif Tag<=365
    Tlinke=3.5;
End
S=S0*(1+0.033*cos((360*Tag/365)*pi/180));
IbnormMax=S*(exp(-Tlinke/(0.9+9.4*sin(ys)))*exp(-Hgeo/800));
IbhMax=IbnormMax*sin(ys);
IbhMin=0;

```

```

qamatm=1.2940+2.4417*10^-2*(ys*180/pi)^1-
3.9730*10^4*(ys*180/pi)^2+3.8034*10^-
6*(ys*180/pi)^3+2.2145*10^8*(ys*180/pi)^4+5.8332*10^-11*(ys*180/pi)^5;
qam=qamatm*(0.506-0.010788*Tlinke);
IdhMax=0.5*S*sin(ys)*(qam- exp(-Tlinke/(0.9+9.4*sin(ys)))*exp(-geo/800));
IdhMin=(IbhMax+IdhMax)*(1-0.72);
IghMax=IbhMax+IdhMax;
IghMin=IbhMin+IdhMin;
Igh=Ibh+Idh;

if ((IghMax-IghMin)/1)>0
    SSW=(Igh-IghMin)/((IghMax-IghMin)/1);
Else
    SSW=0;
End

if SSW<0
    SSW=0;
elseif SSW>1
    SSW=1;
End

% Berechnung Idf

RZeta=(126.5-60*sin(ys))*((cosZeta+0.7)/1.7)^2;
Rwbnl=(26/2*(1-cos(2*yf)));
Rwbl1=-6.5*(1-((yf*180/pi-40)/45)^2);
if Rwbl1>0
    Rwbl1=0;
End

if ys*180/pi<30
    Rwbl0=6*(1-((ys*180/pi-15)/15)^2);
Else
    Rwbl0=0;
End

Rwbl=(-64.5*sqrt(sin(abs(ys)))+Rwbl0)*(1-yf*180/pi/180)+Rwbl1;
if ys*180/pi>21.5
    ysR=21.5;
else
    ysR=ys;
end

R180=-21*(1-4*ysR*180/pi/90);

Rdbed=0.182*(1.178*(1+cos(yf))+(pi-yf)*cos(yf)+sin(yf));

if yf==0
    Rd=Rdbed;
else

```

```

        Rd=Rdbed+ (R180+Rwbl+Rwbnl+RZeta) /100;
    end
    if Rd<0
        Rd=0;
    End

    XIdfMax=Idh*Rd;
    XIdfMin=Idh*Rdbed;

    IdfMax=XIdfMax*SSW;
    IdfMin=XIdfMin*(1-SSW);

    IdfVDI=IdfMax+IdfMin;
    % Anteil aus Bodenreflexstrahlung
        IdUmg= (Idh+Ibh) *0.5*albedo*(1-cos(yf));
    % Gesamt-Diffusstrahlung
    Idf=IdfVDI+IdUmg;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

elseif Modell==2
    %Perez-Modell
        if ys<0.01
            ys=0.01;
        end

        S=S0*(1+0.033*cos((360*Tag/365)*pi/180));
        if ys>0
            AM=1/sin(ys);
        Else
            AM=0;
        End

        if AM>10
            AM=exp(-0.0001184*Hgeo) / (cos(pi/2-ys)+0.5057*(96.080-(pi/2-ys))^-1.634);
%nach [DUF13] S10
        end
        delta=AM*Idh/S;

        if Idh>0
            eps=( (Idh+Ibh/sin(ys))/Idh+1.041*(pi/2-ys)^3) / (1+1.041*(pi/2-ys)^3);
        else
            eps=0;
        end
        F11=0;
        F12=0;
        F13=0;
        F21=0;
        F22=0;

```

```
F23=0;
if eps<1
    F11=0;
    F12=0;
    F13=0;
    F21=0;
    F22=0;
    F23=0;
elseif eps>=1 && eps<1.065
    F11=-0.008;
    F12=0.588;
    F13=-0.062;
    F21=-0.06;
    F22=0.072;
    F23=-0.022;
elseif eps>=1.065 && eps<1.23
    F11=0.13;
    F12=0.683;
    F13=-0.151;
    F21=-0.019;
    F22=0.066;
    F23=-0.029;
elseif eps>=1.23 && eps<1.5
    F11=0.33;
    F12=0.487;
    F13=-0.221;
    F21=0.055;
    F22=-0.064;
    F23=-0.026;
elseif eps>=1.5 && eps<1.95
    F11=0.568;
    F12=0.187;
    F13=-0.295;
    F21=0.109;
    F22=-0.152;
    F23=-0.014;
elseif eps>=1.95 && eps<2.8
    F11=0.873;
    F12=-0.392;
    F13=-0.362;
    F21=0.226;
    F22=-0.462;
    F23=0.001;
elseif eps>=2.8 && eps<4.5
    F11=1.132;
    F12=-1.237;
    F13=-0.412;
    F21=0.288;
    F22=-0.823;
```

```
F23=0.056;
elseif eps>=4.5 && eps<6.2
    F11=1.06;
    F12=-1.6;
    F13=-0.359;
    F21=0.264;
    F22=-1.127;
    F23=0.131;
elseif eps>=6.2
    F11=0.678;
    F12=-0.327;
    F13=-0.25;
    F21=0.156;
    F22=-1.377;
    F23=0.251;
end
F1=F11+F12*delta+F13*(pi/2-ys);
F2=F21+F22*delta+F23*(pi/2-ys);
a=max(0,cosZeta);
b=max(0.087,cos(pi/2-ys));
    IdfPerez=Idh*(0.5*(1+cos(yf))*(1-F1)+a/b*F1+F2*sin(yf));
%if IdfPerez>500
%    halt=1;
%end
    if IdfPerez<0
        IdfPerez=0;
end
    % Anteil aus Bodenreflexstrahlung
    IdUmg=(Idh+Ibh)*0.5*albedo*(1-cos(yf));
    % Gesamt-Diffusstrahlung
    Idf=IdfPerez+IdUmg;
end
end
```



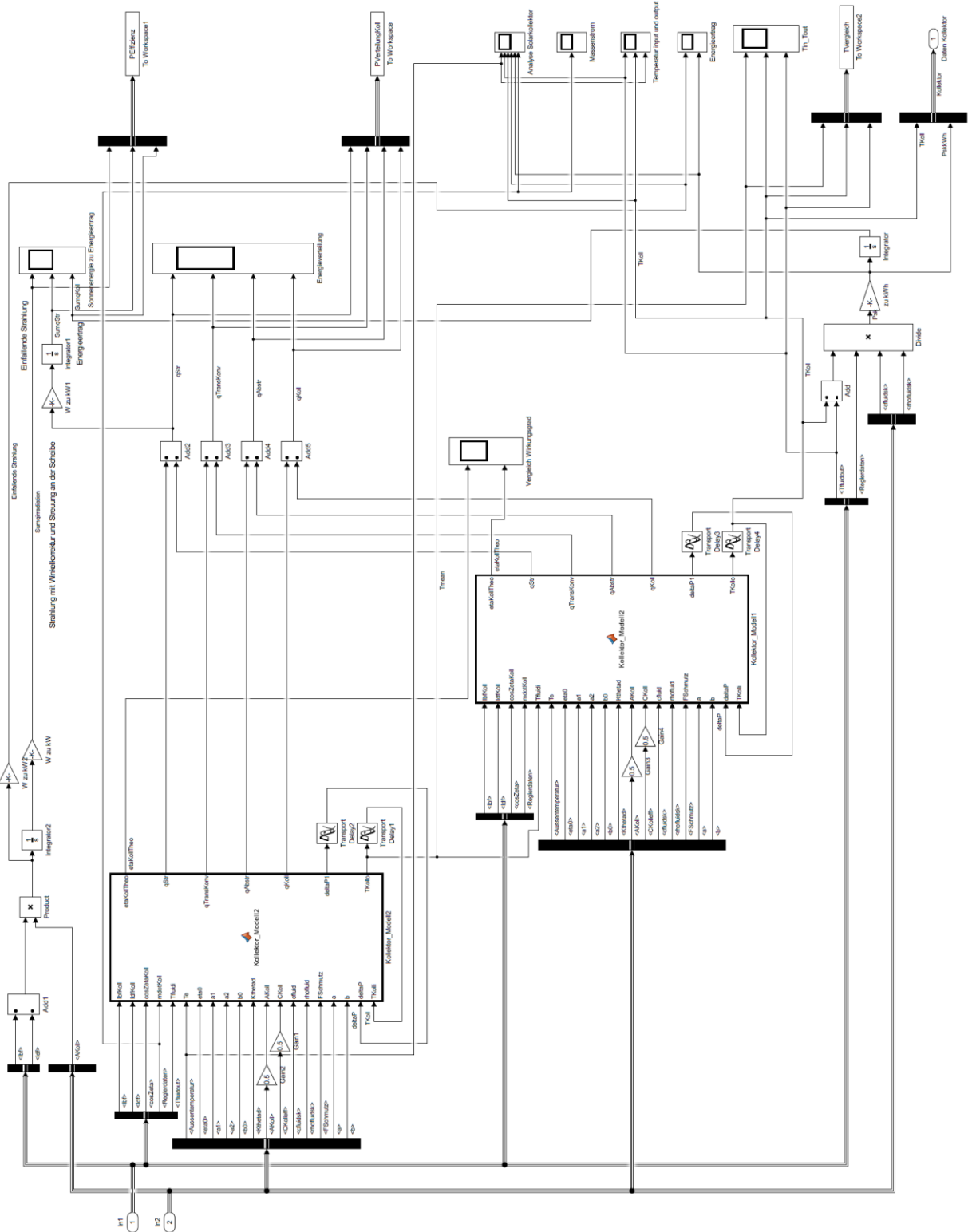


Abbildung C.12: Modellteil „Solarkollektor“: Aufteilung des Solarkollektors in 2 Hälften, damit das Rechenmodell genauere Ergebnisse liefert. Kernstück dieses Modells sind die großen Blöcke, die restlichen kleineren Blöcke dienen zum Großteil der Auswertung der Sonnendaten

Folgende Funktion wurde in Anlehnung an [24] für die Kollektorböcke verwendet:

```
function [etaKollTheo,qStr, qTransKonv, qAbstr, qKoll, deltaP1,
TKollo]=Kollektor_Modell12(IbfKoll, IdfKoll, cosZetaKoll, mdotKoll, Tfluidi, Te, eta0,
a1, a2, b0, Ktheta, AKoll, CKoll, cfluid, rhofluid, FSchmutz, a, b, deltaP, TKolli)
%#codegen
```

```

%% % Definition von Variablen
    %Koeffizient für Druckverlust %% % Berechnung der Kollektortemperatur und der
    Fluidaustrittstemperatur
Kthetab=zeros(1);
theta=acos(cosZetaKoll)*180/pi;
if
b0==1
    Kthetab=1;
elseif theta<=60
    Kthetab=1-b0*(1/cos(theta*pi/180)-1);
elseif theta>60
    Kthetab=(1-b0)*(1-(theta-60)/30);
end qStr=eta0*(IbfKoll*FSchmutz*Kthetab+IdfKoll*FSchmutz*Kthetad)*AKoll;
qTransKonv=a1*(TKolli-Te)*AKoll; qAbstr=a2*(TKolli-Te)^2*AKoll;
% qKoll=mdotKoll*cfluid*(2*TKoll(i,1)-2*TKoll1);
qKoll=mdotKoll*cfluid*rhofluid/1000*(TKolli-Tfluidi); % Die Kollektortemperatur
Schritt (n-1) minus der Temperatur der Eintrittsflüssigkeit (n-1)
TKollo=(qStr-qTransKonv-qAbstr-qKoll)/CKoll+TKolli;
%% % Berechnung des Druckverlusts VolStr=mdotKoll*3600/rhofluid*1000; %l/h
deltaPl=deltaP+(a*VolStr^2+b*VolStr)/1000*100000; %Pa

%% % Ausgabe

%TKoll2=zeros(1);
%TKoll2=TKoll;

if (IbfKoll+IdfKoll)>0
    etaKollTheo=(eta0*(IbfKoll*FSchmutz*Kthetab+IdfKoll*FSchmutz*Kthetad)-a1*(TKolli-
    Te)-a2*(TKolli-Te)^2)/(IbfKoll+IdfKoll);
else
    etaKollTheo=0;
end if etaKollTheo>1 || etaKollTheo<0 etaKollTheo=0;
end

end

```

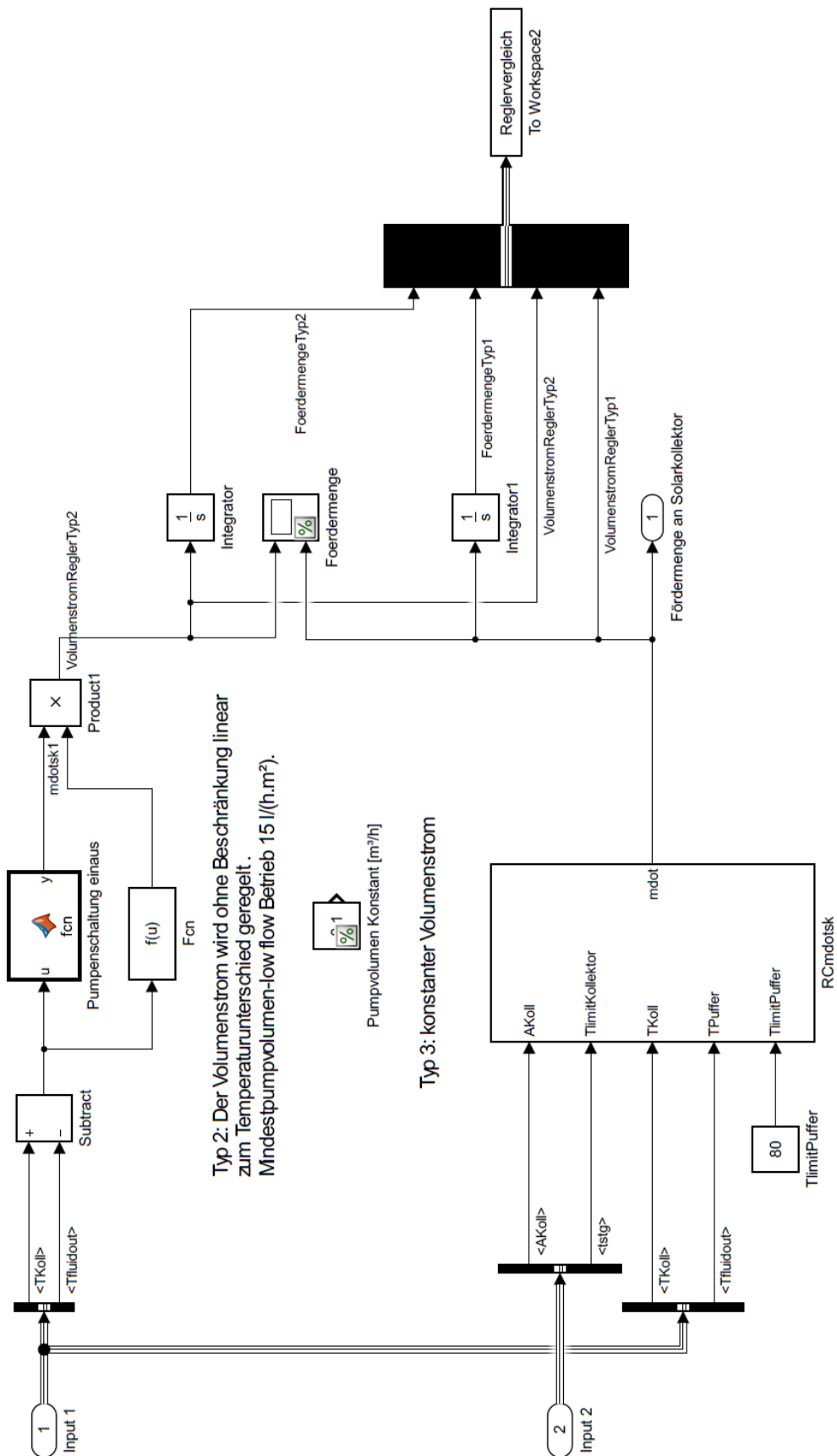


Abbildung C.13: Modellteil „Regler“: Der Regler dient zur Steuerung des Pumpkreislaufes zwischen Solarkollektor und Tiefenbohrung. Im Modell werden Typ 2 links (Fördermenge direkt proportional zum Energieeintrag) und Typ 3 rechts (Fördermenge in Anlehnung an das Rechenkernmodell in Stateflow implementiert [24]) verglichen; Typ 1 mit konstantem Pumpvolumen kommt nicht zur Anwendung

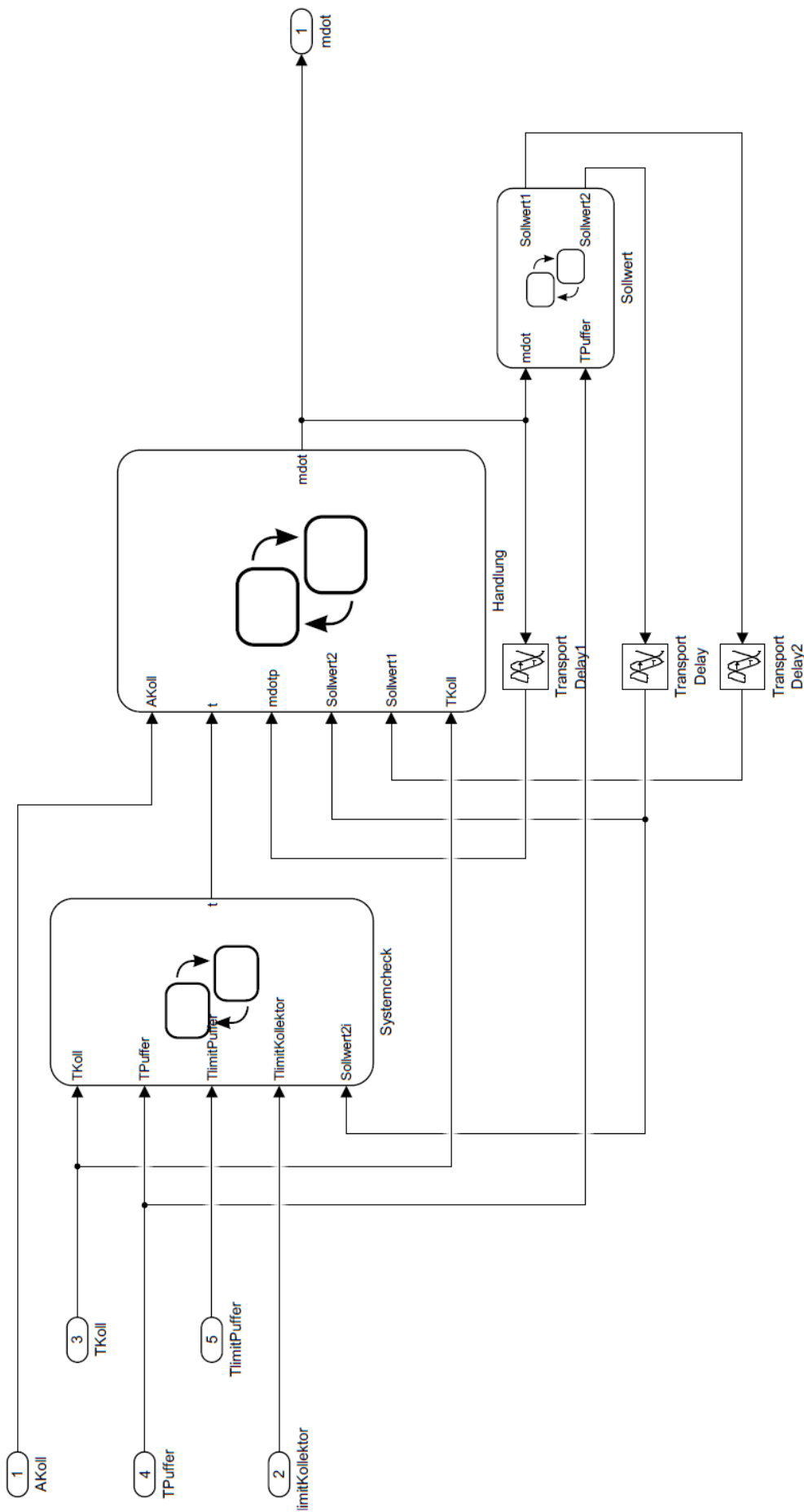


Abbildung C.14: Reglermodell Typ 2, Umsetzung in Stateflow 1



Abbildung C.15: Reglermodell Typ 2, Umsetzung in Stateflow 2: Verweis auf eine Wertetabelle mit Systemcheck (Prüfung der Sollwerte)

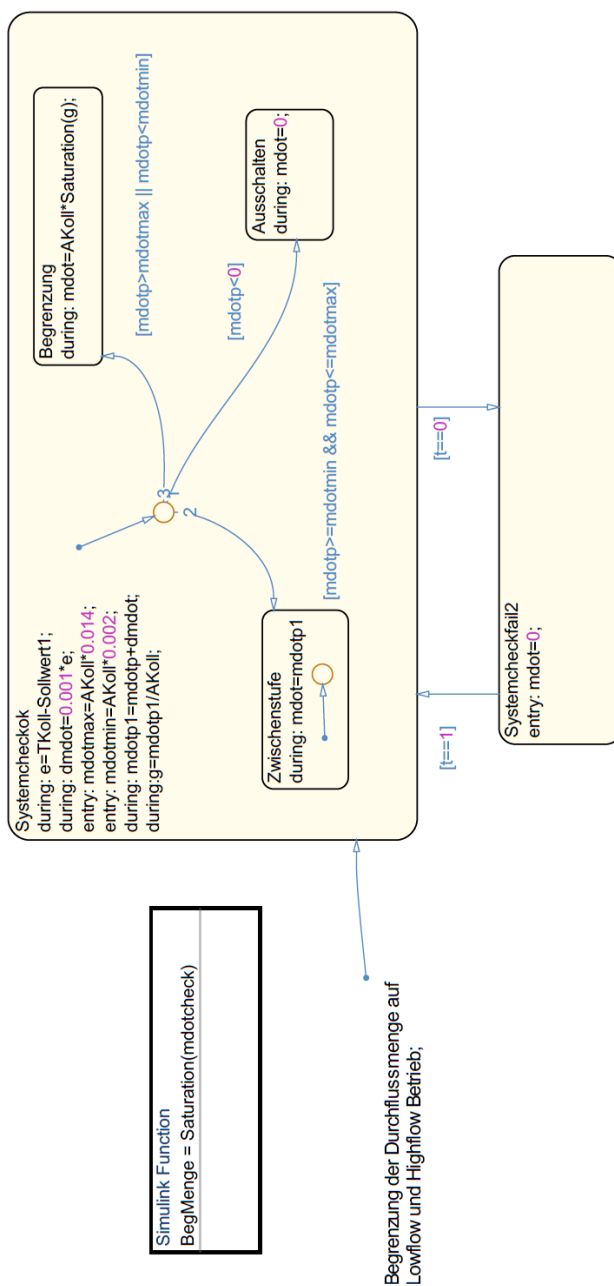


Abbildung C.16: Reglermodell Typ 2, Umsetzung in Stateflow 3: Bestimmung der Durchflussmenge mit Begrenzung der minimalen und maximalen Fördermengen

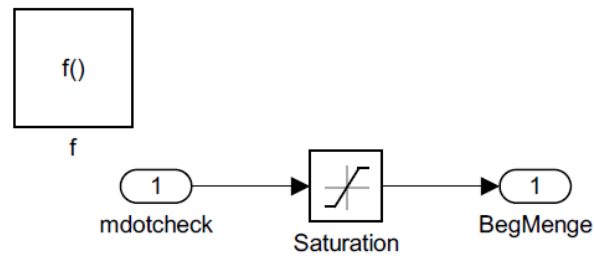


Abbildung C.17: Reglermodell Typ 2, Umsetzung in Stateflow 4: Begrenzung der Pumpleistung im Systemcheck

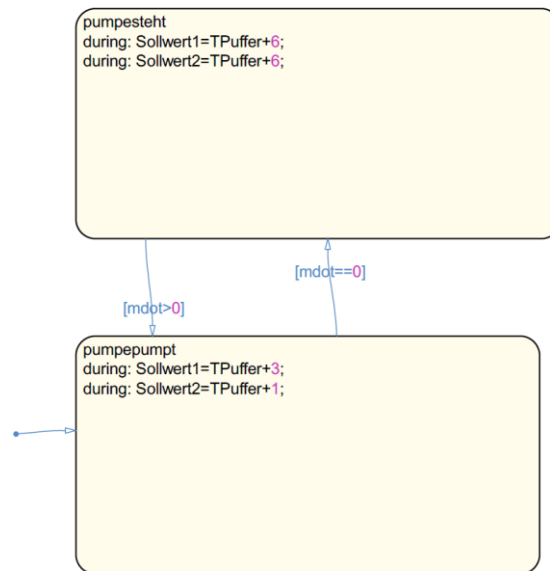


Abbildung C.18: Reglermodell Typ 2, Umsetzung in Stateflow 5: Berechnung der Sollwerte zur Systemprüfung im nächsten Zeitschritt

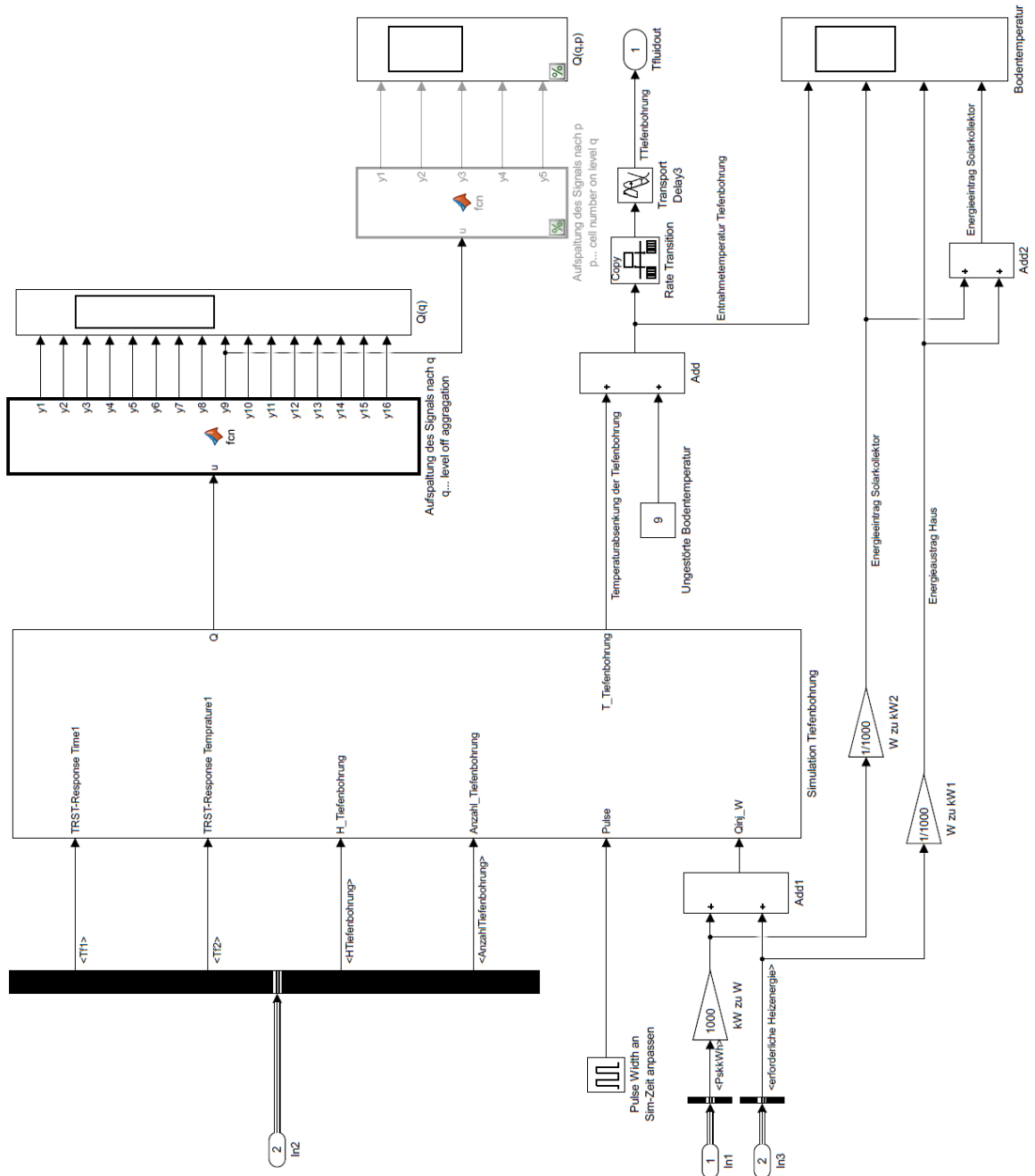


Abbildung C.19: Modellteil „Tiefenbohrung“ nach [52]: das Kernstück ist die Simulation der Tiefenbohrung; im Vorfeld wird die Abstimmung zwischen Simulationsschrittweite des restlichen Modells mit der Tiefenbohrung getroffen, damit physikalisch korrekte Ergebnisse berechnet werden. Die Simulationsschrittweite muss bei der Simulation in konstanten Schritten gehalten werden und im Einschaltmechanismus „Pulse Width“ angepasst werden, da ansonsten keine korrekten Ergebnisse geliefert werden.

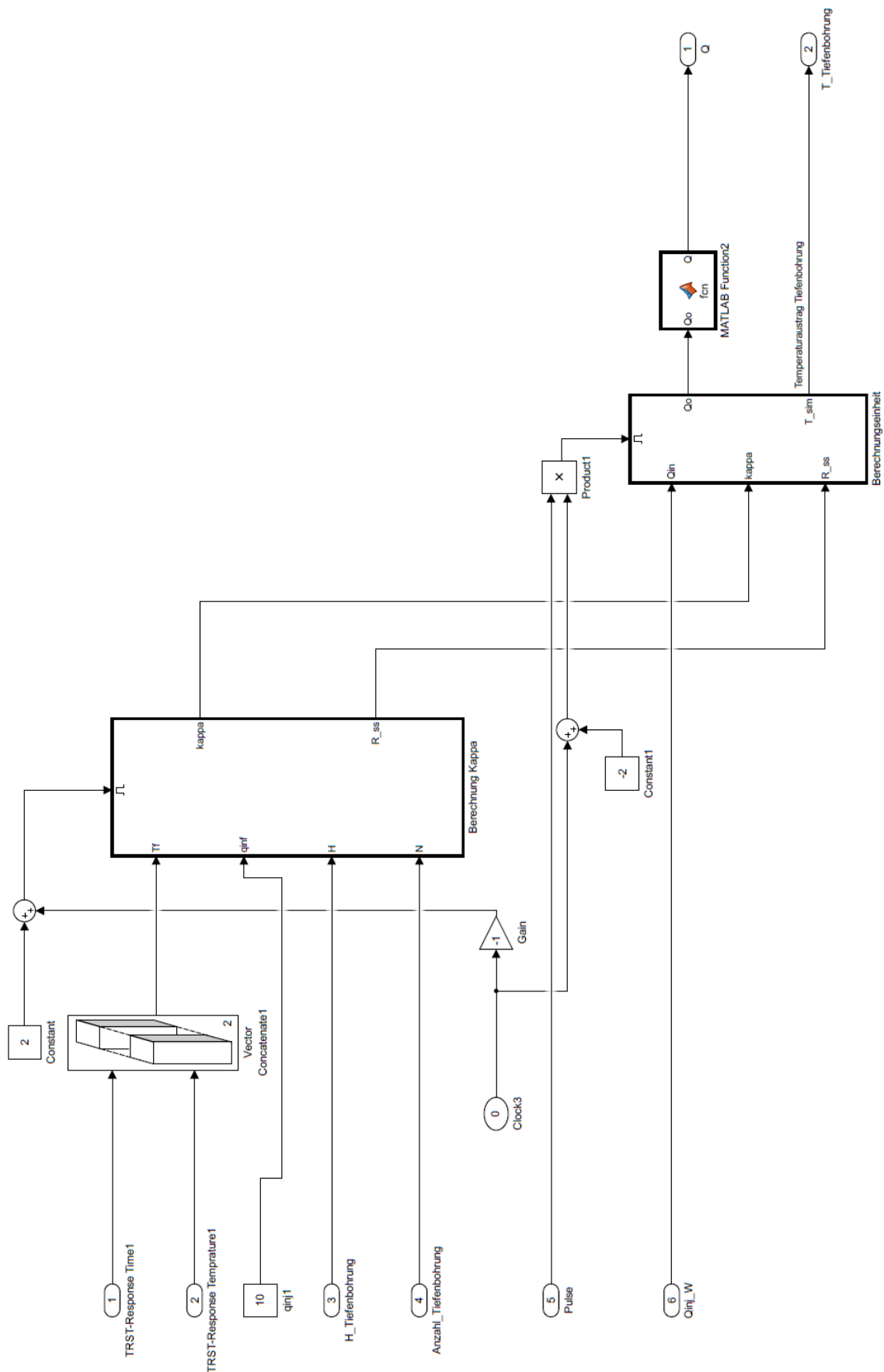


Abbildung C.20: Modellteil „Lastaggregation“: Zur Rechenzeitbeschleunigung werden die Werte Rss und Kappa in den ersten 2 Stunden der Simulation berechnet und anschließend konstant gehalten, sie dienen der Lastaggregation und damit der Rechenzeitverkürzung



Im ersten Block wird die Berechnung von Kappe und Rss mit folgender Syntax durchgeführt:

```
function [kappa,R_ss] = fcn(Tf,qinj,H,N) %Qin,simzeit
%#codegen

P_q=5;           %Anzahl der addierten Zellen auf Level q
q_max=16;        %Anzahl der Ebenen
%
Tfstat=Tf(11334,2);
R_ss=Tfstat/(qinj*H*N);
teta=zeros(16,5);
%Q=zeros(16,5,3);
teta_q_0=zeros(17,1);
kappa=zeros(16,5);
    teta_q_0(1,1)=0;
    for q=1:q_max
        teta_q_0(q+1,1)=teta_q_0(q,1)+2^(q-1)*P_q;
    end
    for q=1:q_max
        for p=1:P_q
            if p==1
                teta(q,p)=teta_q_0(q,1)+2^(q-1)*p;
                T_step1=interp1(Tf(:,1),Tf(:,2),teta(q,1));
                T_step2=interp1(Tf(:,1),Tf(:,2),teta_q_0(q,1));
            Else
                teta(q,p)=teta_q_0(q,1)+2^(q-1)*p;
                T_step1=interp1(Tf(:,1),Tf(:,2),teta(q,p));
                T_step2=interp1(Tf(:,1),Tf(:,2),teta(q,p-1));
            End
            kappa(q,p)=(T_step1-T_step2)/Tfstat; %Tfstat=Tf(inf).. stationäre
Temperaturhebung
        end
    end
end
```

Im zweiten Block wird die Load Aggregation durchgeführt, dabei wird die aktuelle eingetragene Energie eingebunden und Stunde für Stunde zeitlich verschoben. Nach einem gewissen Zeitraum sind nur mehr Last kumulierte Lasten vorhanden:

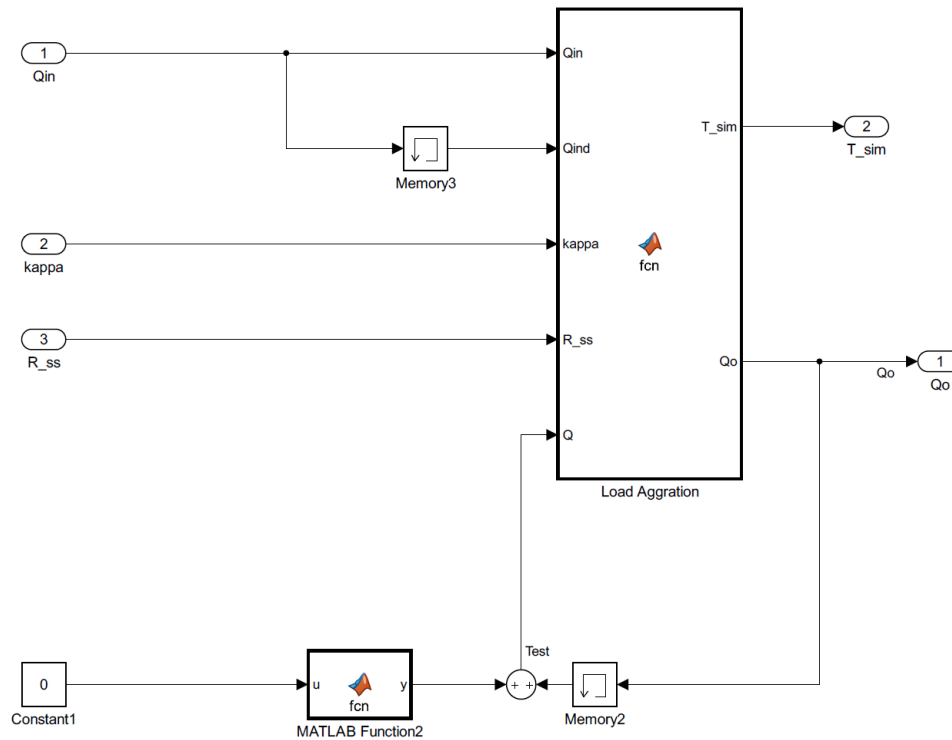


Abbildung C.21: Modellteil zur Lastaggregation

Mit:

```
function [T_sim,Qo] = fcn(Qin,Qind,kappa,R_ss,Q)
%#codegen
P_q=5;
    %Anzahl der addierten Zellen auf Level q
q_max=16;      %Anzahl der Ebenen
%% Load Aggration
    Q(1,1,1)=Qin;
    T=0;
    for q=1:q_max
        a=2^(q-1);
        for p=1:P_q
            if q==1 && p==1
                Q(1,1,3)=Q(1,1,2)+1/a*(Qind-Q(1,1,2));
            elseif p==1
                Q(q,1,3)=Q(q,1,2)+1/a*(Q(q-1,P_q,1)-Q(q,1,2));
            Else
                Q(q,p,3)=Q(q,p,2)+1/a*(Q(q,p-1,2)-Q(q,p,2));
            End
            T=T+Q(q,p,3)*kappa(q,p);
            Q(q,p,1)=Q(q,p,2);
            Q(q,p,2)=Q(q,p,3);
        End
    End
    T_sim=T*R_ss;
    Qo=Q
```

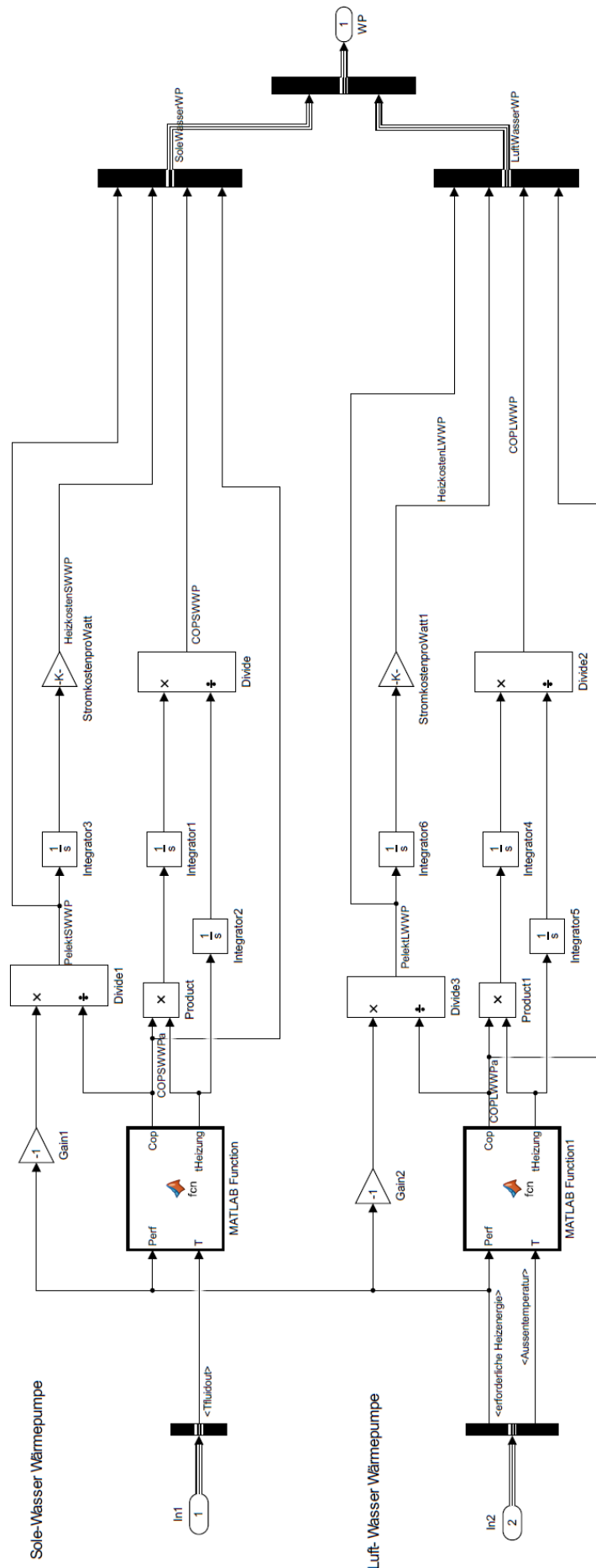


Abbildung C.22: Modellteil „Wärmepumpe“: Im direkten Vergleich Luft-Wasser zu Sole- Wasser, die Kurven sind gem. den Wärmepumpen im Anhang A mit Hilfe zweier Geraden angenähert.

Beide Wärmepumpentypen wurden für eine Temperatur des Warmwassers von 50°C ausgelegt, somit sind die Ergebnisse auf der sicheren Seite abgeschätzt. Für die Sole -Wasser Wärmepumpe wurden im Einzelnen folgende Geraden verwendet:

```
function [Cop,tHeizung] = fcn(Perf,T)
%#codegen

if T>=9.5
    tHeizung = Perf/((0.2286*(T-9.5)+8.8)*1000);
else
    tHeizung = Perf/((0.1684*T+7.2)*1000);
end

if T>=8.5
    Cop = (0.1217*(T-8.5)+4.7);
Else
    Cop = (0.0706*T+3.8);
end
```

Für die Luft -Wasser Wärmepumpe wurden im Einzelnen folgende Geraden verwendet:

```
function [Cop,tHeizung] = fcn(Perf,T)
%#codegen

if T>=4.5
    tHeizung = Perf/((0.2769*(T-4.5)+8.8)*1000);
Else
    tHeizung = Perf/((8.8-(4.5-T)*0.1902)*1000);
end

if T>=3.0
    Cop = 2.95+(T-3)*0.10476;
Else
    Cop = 2.95-(3-T)*0.04736;
end
```