



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Bachelorarbeit**

Nicole Mergenthal

## **Analyse eines Eisspeichersystems**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Nicole Mergenthal**  
**Analyse eines Eisspeichersystems**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/Energie- und Anlagentechnik  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
Ingenieurbüro emutec GmbH  
Marktsegment Luftfahrt  
Oststraße 11  
22488 Norderstedt

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell  
Zweitprüfer/in : Dipl.-Ing. Gerd Prigge  
Industrielle/r Betreuer/in: Dipl.-Ing. Gerd Prigge

Abgabedatum: 28.02.2014

# **Zusammenfassung**

**Nicole Mergenthal**

## **Thema der Bachelorthesis**

Analyse eines Eisspeichersystems

## **Stichworte**

Wärmespeicher, Eisspeicher, Latentwärme, Solarkollektor, Wärmetauschersystem, Wärmepumpe, Wärmeversorgungsanlage, Dimensionierung

## **Kurzzusammenfassung**

Das Thema dieser Arbeit ist die Analyse eines Eisspeichersystems. Bei einem Eisspeicher handelt es sich um eine Zisterne, welche mit Wasser befüllt ist und in der zwei Wärmetauschersysteme integriert sind. Bei Bedarf entzieht eine Wärmepumpe dem Eisspeicher über das eine Wärmetauschersystem Wärme, um ein Gebäude zu beheizen. Bei diesem Vorgang wird dem Wasser Wärme entzogen, kühlt aus und gefriert gegebenenfalls.

Der Eisspeicher bezieht seine Wärme zur Regeneration des Eises über das zweite Wärmetauschersystem aus einer Solarthermieanlage und aus dem ihn umgebenden Erdreich. Im Sommer kann die Regeneration des Eisspeichers auch durch einen umgekehrten Prozess der Wärmepumpe realisiert werden. In diesem Fall wird die Wärme aus dem Gebäude entnommen und taut den Eisspeicher auf.

**Nicole Mergenthal**

## **Title of the paper**

Analysis of an ice storage system

## **Keywords**

Thermal storage, ice storage, latent heat, solar collector, heat exchanger system, heat pump, heating systems, dimensioning

## **Abstract**

The topic of this thesis is the analysis of an ice storage system in structural engineering. An ice storage is a water-filled cistern which contains two heat exchanger. If required a heat pump extracts heat of the ice storage with one of the heat exchangers to warm up a building. During this process, the water releases heat, cools up and might even freezes.

The ice storage obtains heat to regenerate the ice from the second heat exchanger from a solar thermal system and from the surrounding soil. In summer the regeneration of the ice storage can also be realized by an inverse process of the heat pump. In this case the heat is extracted from the building, and is defrosting the ice storage.

## Inhalt

---

Symbol, Bedeutung und Einheit .....	I
Indizes und Bedeutung .....	III
Abkürzungsverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	V
Tabellenverzeichnis .....	VI
Diagrammverzeichnis .....	VII
Danksagung .....	VIII
1. Einführung in die Thematik .....	1
1.1. Entwicklungsgeschichte .....	2
1.2. Ziel und Gang dieser Arbeit .....	3
2. Anlagenbeschreibung .....	4
2.1. Systemgrenzen .....	7
2.2. Technischer Regelvorgang .....	8
3. Anlagenkomponenten des Eisspeichersystems .....	9
3.1. Wärmequellen .....	9
3.1.1. Direkte Sonnenstrahlung .....	12
3.1.1.1. Diffuse Sonnenstrahlung .....	13
3.1.2. Lufttemperatur .....	14
3.2. Wärmesenke .....	16
3.2.1. Solarkollektor .....	16
3.2.2. Umgebendes Erdreich .....	27
3.3. Wärmespeicher .....	28
3.3.1. Sensible und latente Wärme .....	32
3.3.2. Wärmetauschersystem .....	35
3.3.3. Wärmeverluste und Wärmegewinne .....	39
3.4. Anlagenregelung auf der Primärseite .....	40
3.4.1. Dreiwegeventil .....	40
3.4.2. Solarpumpe im Kollektorkreis .....	41
3.5. Wärmepumpe und Kältemaschine .....	43
3.6. Rohrleitungssystem .....	45
3.6.1. Membranausdehnungsgefäß MAG .....	45
3.6.2. Sicherheitsventil .....	46
3.6.3. Rückschlagklappe .....	46
3.6.4. Entlüftungsventil .....	46
4. Dimensionierung des Eisspeichers .....	47

4.1.	Allgemeine Daten zur Dimensionierung .....	47
4.2.	Auslegung bei max. Außentemperatur, 5,0 m <sup>2</sup> Kollektorfläche .....	49
4.3.	Auslegung bei max. Außentemperatur, 7,5 m <sup>2</sup> Kollektorfläche .....	52
4.4.	Auslegung bei min. Außentemperatur, 5 m <sup>2</sup> Kollektorfläche .....	53
4.5.	Auslegung bei min. Außentemperatur, 7,5 m <sup>2</sup> Kollektorfläche .....	54
4.6.	Auslegung bei min. Außentemperatur und hohem Verbrauch .....	55
4.7.	Wertung der Ergebnisse aus der Dimensionierung .....	56
5.	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	57
6.	Schlussbemerkung und Ausblick .....	60
Literaturverzeichnis .....		61
Anhangsverzeichnis .....		A
Anhang 1: Interview Bernd Schwarzfeld .....		B
Anhang 2: Technische Zeichnung – Anlagenschema .....		C
Anhang 3: Technische Zeichnung – Anlagenschema – Systemgrenzen.....		D
Anhang 4: Technische Zeichnung – Anlagenschema – technischer Regelvorgang .....		E
Anhang 5: Globalstrahlung in Deutschland (Monatssumme – Januar 2012).....		F
Anhang 6: Globalstrahlung in Deutschland (Monatssumme – Juli 2012) .....		G
Anhang 7: Globalstrahlung in Deutschland 2012.....		H
Anhang 8: Globalstrahlung in Deutschland 2011 .....		I
Anhang 9: Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit.....		J

## Symbol, Bedeutung und Einheit

---

Symbol	Bedeutung	Einheit
$A$	Fläche	$m^2$
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität	$J/kg \cdot K$
$d$	Durchmesser	$m$
$G$	Globalstrahlung	$W/m^2$
$h$	Höhe	$m$
$H$	Enthalpie	$J$
$k$	Wärmeübergangskoeffizient	$W/m^2 \cdot K$
$L$	Länge	$m$
$\ln$	Natürlicher Logarithmus	-
$m$	Masse	$kg$
$\dot{m}$	Massenstrom	$kg/s$
$p$	Druck	$N/m^2$
$P$	Leistung	$W$
$Q$	Wärme	$J$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$W$
$R$	Radius	$m$
$s$	Dicke	$m$
$T$	Temperatur	$K$
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/m^2 \cdot K$
$V$	Volumen	$m^3$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$m^3/s$

Griechisches Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\Delta$	: Differenz	-
$\varepsilon$	Leistungszahl	-
$\eta$	: Wirkungsgrad	-
$\lambda$	: Wärmeleitfähigkeitskoeffizient	W/m·K
$\pi$	: Kreiszahl	-
$\rho$	: Reflexionsgrad	-
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	Transmissionswärmegrad	-

## Indizes und Bedeutung

---

Indizes	Bedeutung
<i>AB</i>	Abgeführt
<i>abd</i>	Transparente Abdeckung
<i>E</i>	Erstarrung
<i>ERD</i>	Erdreich
<i>el</i>	elektrisch
<i>ENT</i>	Entzug
<i>ES</i>	Eisspeicher
<i>F</i>	Aggregatzustand Fest
<i>FL</i>	Aggregatzustand Flüssig
<i>G</i>	Aggregatzustand Gas
<i>Geb</i>	Gebäude
<i>ges</i>	Gesamt
<i>K</i>	Konvektion und Wärmeleitung
<i>Kon</i>	Kondensation
<i>L</i>	Latent
<i>MAG</i>	Membranausdehnungsgefäß
<i>N</i>	Nutz
<i>PE</i>	Polyethylen
<i>R</i>	Reflexion an der Absorberfläche
<i>REG</i>	Regeneration
<i>S</i>	Sensibel
<i>Sch</i>	Schmelz
<i>SK</i>	Solarkollektor
<i>Sole</i>	Sole
<i>ST</i>	Strahlung
<i>U</i>	Umgebung
<i>V</i>	Verdampfung
<i>ZU</i>	Zugeführt



## Abkürzungsverzeichnis

---

Abkürzung	: Bedeutung
BZE	: Büro für zeitgemäße Energieanwendung
CO <sub>2</sub>	: Kohlenstoffdioxid
DIN	: Deutsches Institut für Normen
EN	: Europäische Norm
EnEV	: Energiesparverordnung
e. V.	: eingetragener Verein
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
GbR	Gesellschaft bürgerlichen Rechts
Gl.	: Gleichung
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
MAG	: Membranausdehnungsgefäß
PE	: Polyethylen
R22	: Chlordifluormethan
Spez.	: Spezifisch
USA	: United States of America
Vgl.	: Vergleich
z. B.	: zum Beispiel

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Anlagenschema .....	4
Abbildung 2: Primärkreis Fließrichtungen .....	5
Abbildung 3: Sekundärkreis Fließrichtungen .....	6
Abbildung 4: Anlagenschema – Systemgrenzen.....	7
Abbildung 5: Anlagenschema – technischer Regelvorgang .....	8
Abbildung 6: Monatssumme Juli der regionalen Einstrahlung in Deutschland .....	10
Abbildung 7: Monatssumme Januar der regionalen Einstrahlung in Deutschland.....	10
Abbildung 8: Jahressumme 2011 der regionalen Einstrahlung in Deutschland.....	11
Abbildung 9: Jahressumme 2012 der regionalen Einstrahlung in Deutschland.....	11
Abbildung 10: Aufbau und Funktion eines Niedertemperaturkollektors (Flachkollektor) .....	16
Abbildung 11: Strahlungsgesetz .....	19
Abbildung 12: Wärme- und optische Verluste bei einem Solarkollektor .....	20
Abbildung 13: Röhrenabsorber auf einem Flachdach .....	22
Abbildung 14: Flachkollektor auf einem Dach mit Neigungswinkel .....	22
Abbildung 15: Wärmetauschersystem .....	35
Abbildung 16: Anlagenschema – Wärmetauschersystem .....	35
Abbildung 17: Eisspeicher beim Erstarrungsvorgang .....	37
Abbildung 18: Eisspeicher vor dem Erstarrungsvorgang .....	37
Abbildung 19: Erstarrungsvorgang – Radien und Wärmeleitfähigkeitskoeffizient.....	38
Abbildung 20: Anlagenregelung.....	40
Abbildung 21: Dreiwegeventil .....	40
Abbildung 22: log p, h Diagramm am Kältemittel R22.....	43
Abbildung 23: Schema eines Membranausdehnungsgefäß .....	45
Abbildung 24: Gruppe Druckmessung, MAG, Sicherheitsventil .....	46
Abbildung 25: Rückschlagklappe.....	46
Abbildung 26: Entlüftung der Solaranlage.....	46
Abbildung 27: Skalierung Eisspeicher .....	48

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Statistische Werte der Globalstrahlung in Deutschland.....	10
Tabelle 2: Werte zum Röhrenabsorber.....	23
Tabelle 3: Werte zum Flachkollektor.....	24
Tabelle 4: maximale Temperaturdifferenz von Lufttemperatur und Eisspeicher.....	24
Tabelle 5: durchschnittliche Temperaturdifferenz von Lufttemperatur und Eisspeicher.....	25
Tabelle 6: Vergleich Kollektorfläche und Verbrauch in Bezug auf die Überschussenergie....	28
Tabelle 7: Umwandlungsenthalpie.....	33
Tabelle 8: Werte für die Berechnung des Wärmetauschersystems.....	36
Tabelle 9: Prozent der Masse des Eises im Eisspeicher .....	38
Tabelle 10: Jahresvergleich: Durchschnittstemperatur und Heizgradtage.....	47
Tabelle 11: Werte über Temperaturdifferenzen .....	48
Tabelle 12: Werte über die Dichte und Wärmeleitfähigkeit der Fluide.....	48
Tabelle 13: Ergänzende Werte über den Eisspeicher.....	48
Tabelle 14: Werte zu Diagramm 17 .....	49
Tabelle 15: Werte zu Diagramm 18 .....	50
Tabelle 16: Werte zu Diagramm 19 .....	51
Tabelle 17: Werte zu Diagramm 20 .....	52
Tabelle 18: Werte zu Diagramm 21 .....	53
Tabelle 19: Werte zu Diagramm 22 .....	54
Tabelle 20: Werte zu Diagramm 23 .....	55
Tabelle 21: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zwischen zwei Wärmeerzeugersystemen.....	58

## Diagrammverzeichnis

---

Diagramm 1: Sonnenstunden 2012 .....	12
Diagramm 2: Sonnenstunden 2011 .....	13
Diagramm 3: Lufttemperatur 2012 .....	14
Diagramm 4: Lufttemperatur 2011 .....	15
Diagramm 5: Wirkungsgrad Röhrenabsorber .....	23
Diagramm 6: Wirkungsgrad Flachkollektor .....	24
Diagramm 7: Leistung der Globalstrahlung im Vergleich zum Röhrenabsorberertrag .....	25
Diagramm 8: Wirkungsgrad des Röhrenkollektors im Vergleich zur Lufttemperatur .....	26
Diagramm 9: Erdtemperatur in Abhängigkeit der Lufttemperatur .....	27
Diagramm 10: Wärmeverbrauch von 3750 kWh/Jahr und einer Kollektorfläche von 6m <sup>2</sup> .....	29
Diagramm 11: Wärmeverbrauch von 3750 kWh/Jahr und einer Kollektorfläche von 10m <sup>2</sup> .....	29
Diagramm 12: Wärmeverbrauch von 2500 kWh/Jahr und einer Kollektorfläche von 6m <sup>2</sup> .....	30
Diagramm 13: Wärmeverbrauch von 2500 kWh/Jahr und einer Kollektorfläche von 10m <sup>2</sup> .....	30
Diagramm 14: Temperatur von Wasser bei konstanter Wärmezufuhr .....	32
Diagramm 15: Röhrenabsorber Volumenstrom für 1 m <sup>2</sup> installierter Fläche .....	41
Diagramm 16: Röhrenabsorber Volumenstrom für 6 m <sup>2</sup> installierter Fläche .....	42
Diagramm 17: Leistung im Jahr 2007 bei 5m <sup>2</sup> Kollektorfläche und 20,11m <sup>3</sup> Füllvolumen .....	49
Diagramm 18: Leistung im Jahr 2007 bei 5m <sup>2</sup> Kollektorfläche und 7,85m <sup>3</sup> Füllvolumen .....	50
Diagramm 19: Leistung im Jahr 2007 bei 5m <sup>2</sup> Kollektorfläche und 2,15m <sup>3</sup> Füllvolumen .....	51
Diagramm 20: Leistung im Jahr 2007 bei 7,5m <sup>2</sup> Kollektorfläche und 2,15m <sup>3</sup> Füllvolumen .....	52
Diagramm 21: Leistung im Jahr 2010 bei 5m <sup>2</sup> Kollektorfläche und 11,31m <sup>3</sup> Füllvolumen .....	53
Diagramm 22: Leistung im Jahr 2010 bei 7,5m <sup>2</sup> Kollektorfläche und 5,89m <sup>3</sup> Füllvolumen .....	54
Diagramm 23: Leistung im Jahr 2010 bei 7,5m <sup>2</sup> Kollektorfläche und 45,24m <sup>3</sup> Füllvolumen .....	55

## Danksagung

---

Die Bachelorarbeit ist der Abschluss meines Bachelorstudiums an der HAW Hamburg. Im Rahmen dieser Ausarbeitung möchte ich wichtige Menschen erwähnen, die mein Leben geprägt haben.

Ich bedanke mich bei meiner Erstprüferin und Betreuerin Frau Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell, die mich in meinem Studium jederzeit mit Rat und Tat unterstützte. Sie stand mir von der ersten Idee dieser Arbeit zur Seite.

Ich danke ebenfalls meinem Zweitprüfer Herrn Dipl.-Ing. Gerd Prigge. Er hatte während der betrieblichen Phasen des Dualstudiums immer ein offenes Ohr für meine Fragen und Anregungen gehabt. Der Dank gilt ebenfalls meinem Mentor Herr Axel Thiemann. Sie beide und das gesamte Team haben mich immer unterstützt. Ein besonderer Dank gilt den Geschäftsführern der emutec GmbH Dipl.-Ing. Stefan Winter und Dipl.-Ing. Jörg Strömmer, die mir das Dualstudium ermöglicht haben.

Manchmal muss man sich auch beim Zufall bedanken, der mich zu meiner Themenfindung dieser Ausarbeitung gebracht hat. In diesem Zuge danke ich natürlich Herrn Schwarzfeld, meinem Interviewpartner, der unermüdlich meine Fragen beantwortet hat. Das Interview findet sich im Anhang 1 wieder.

Ein besonderer Dank gilt meinen Freunden, die mir immer treu zur Seite stehen, obwohl meine Zeit für sie seit Beginn des Studiums sehr gering war. Ihre Geduld schien dagegen, rastlos zu wachsen.

Abschließend danke ich meiner Familie, auf die ich mich immer verlassen kann und die ich sehr zu schätzen weiß.

## 1. Einführung in die Thematik

---

Die Kernfrage ist, wie kann man die Wärme aus dem Sommer im Winter nutzen, und wie transportiert man die Kälte aus dem Winter in den Sommer?

Der bevorstehende Mangel an fossilen Primärenergieträgern führt unabdingbar zu einer Neuorientierung der Energieversorgung. Um die Abhängigkeit der fossilen Brennstoffe zu überwinden, sind die Entwicklung und der Ausbau der regenerativen Energiequellen anzutreiben.

Eine große technische Herausforderung ist dabei, den Energiebedarf der Verbraucher und die Bereitstellung von Energie in nutzbarer Form in Einklang zu bringen. Energiespeicher ermöglichen es, diese Abhängigkeit abzulegen.

In unseren Breitengraden besteht das grundlegende Problem, dass Solarthermie in den Phasen des größten Wärmebedarfs – also im Winter – am wenigsten Wärme liefert. Um die Kernfrage zu beantworten, muss es gelingen, die im Sommer zur Verfügung stehende Wärme in effektiven, platzsparenden und wirtschaftlichen Speichern im Winter zu nutzen. Eine Umstellung der Energiewirtschaft mit dem Ziel eines abnehmenden Kohlenstoffumsatzes kann mit Hilfe eines Speichers angetrieben und im Heizfall kann auf fossile Brennstoffe verzichtet werden.

Das Eisspeicherkonzept ist eine Möglichkeit unabhängig von fossilen Brennstoffen zu heizen, aber auch das Gebäude mit dem zur Verfügung stehenden Eis des Eisspeichers im Sommer zu kühlen.

Bei einem Eisspeicher handelt es sich um einen Wärmespeicher. Eine Wärmepumpe entzieht über ein Wärmetauschersystem Wärme aus dem Eisspeicher, um ein Gebäude zu beheizen. Wird dem Eisspeicher so viel Wärme entzogen, dass das Wasser gefriert, steht der Wärmepumpe zusätzlich die Wärme aus dem Phasenwechsel – die latente Wärme – zur Verfügung. Die Energiequelle für den Eisspeicher ist eine Solarthermieanlage. Diese sorgt über ein zweites Wärmetauschersystem für die Regeneration des Eises. Zusätzlich gibt das umgebende Erdreich Wärme an den Eisspeicher ab, sodass eine Isolation des Eisspeichers überflüssig ist.

Der Eisspeicher kann auch zur Raumkühlung eingesetzt werden. Dabei regeneriert sich der Eisspeicher nicht nur über die Solarthermieanlage und das Erdreich, sondern über die Wärmepumpe. Hierbei wird der Prozess umgekehrt und dem Gebäude Wärme entzogen und der Eisspeicher erwärmt und somit das Eis geschmolzen.

Im Idealfall ist der Eisspeicher so dimensioniert, dass dem Eisspeicher im Winter die gesamte latente Wärme entzogen wird, sodass er am Ende der Heizperiode vollständig durchgefroren ist. Wärme wird dann idealerweise im Laufe des Sommers dem Gebäude entzogen und steht dem Eisspeicher zur Verfügung, bis im nächsten Winter die im Eisspeicher gespeicherte Wärme wieder entzogen wird.

## 1.1. Entwicklungsgeschichte

---

Seit vielen Jahrhunderten spielt für die Menschheit die Versorgung von Wärme eine zentrale Rolle. Einst war die Entwicklung des Lagerfeuers eine Revolution, heute dominiert zur Wärmeerzeugung die Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Vor allem der Zweite Weltkrieg führte mit der Einführung von Erdöl und Gas als Wärmequelle in den deutschen Haushalten zu einem hohen Wärmestandard in unseren Regionen. Die fossile Wärmequelle sorgte für die Selbstverständlichkeit, dass ein Griff zum Thermostat genügt, um einen Raum zu beheizen. Doch in naher Zukunft führt, muss der Mangel an Ressourcen zu einem Umdenken in der Energieversorgung führen.

Dabei eröffnet sich eine große Chance, gleichzeitig die Umwelt durch alternative Heizsysteme zu entlasten. Wahlmöglichkeiten gibt es hierzu viele: Solarthermie, Wärme aus dem Erdreich, der Umgebungsluft und Wasser. Wärme kommt überall in der Umwelt vor, denn physikalisch ist nur am absoluten Nullpunkt von null Kelvin oder minus 273,15 Grad Celsius keine Wärme verfügbar.

Ein Behaglichkeitsgefühl des Menschen stellt sich bei etwa 20 Grad Celsius ein, wodurch eine Temperatur von selbst 273,15 Kelvin, also null Grad Celsius zur Raumheizung unbrauchbar ist. Interessant wird die Wärmeenergie von 273,15 Kelvin, sobald diese auf ein höheres Energieniveau befördert wird. Hierzu dient der Einsatz einer Wärmepumpe.

Schon vor zweihundert Jahren veröffentlichte der Franzose Nicolas Carnot die ersten Grundsätze zur Wärmepumpe. Nach ihm wurde der Carnot-Prozess benannt. Dreißig Jahre später konnte der Ire William Thomsen, 1. Baron Kelvin, auf Basis der Carnotschen Wärmetheorie nachweisen, dass eine Kältemaschine auch zum Heizen verwendet werden kann. Doch wurde zunächst der Carnot-Prozess zur Kühlung in einem Kühlschranks eingesetzt. Nach dem Ersten Weltkrieg fand sich der Kühlschrank in den USA in vielen Haushalten wieder. Erst 1938 wurde die erste große Wärmepumpenanlage zur Beheizung eines Gebäudes in Zürich in Betrieb genommen.<sup>1</sup>

Eine nahezu unerschöpfliche Wärmequelle für die Wärmepumpe stellt die Sonne dar. Diese erwärmt die Atmosphäre der Erde. Über Solarthermieranlagen lässt sich die Strahlungsenergie in Wärme umwandeln. Bereits 1891 wurde für eine Solarthermieranlage das erste Patent von dem Schweizer Horace-Benedict de Saussure eingereicht.<sup>2</sup>

Eine sinnvolle und effiziente Alternative zur Raumheizung stellt also ein System mit Wärmepumpe und Solarthermieranlage dar. Jedoch muss in den Breitengraden unserer Region das Energiekonzept durch einen saisonalen Wärmespeicher angepasst werden.

In folgender Ausarbeitung wird dabei ein Eisspeicher in das System integriert und das Konzept betrachtet, analysiert und bewertet.

---

<sup>1</sup> Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmepumpe> (Zugriff am 05.02.2014)

<sup>2</sup> Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarthermie> (Zugriff am 05.02.2014)

## 1.2. Ziel und Gang dieser Arbeit

---

Diese Bachelorarbeit verfolgt zwei Ziele.

Das erste Ziel ist die Analyse eines Eisspeichersystems. Dabei werden systematisch die Anlagenkomponenten untersucht sowie die Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen den Komponenten betrachtet und diese ausgewertet. Der Leser dieser Ausarbeitung wird eine theoretische Grundlage für die Auslegung eines Eisspeichersystems erlangen.

Das zweite Ziel der Bachelorarbeit ist eine intensive Praxisrelevanz erkennen zu lassen. Dem Leser wird es möglich sein, die durch die Ausarbeitung gewonnenen Grundlagenkenntnisse anwenden zu können.

Für die Erarbeitung der zwei Ziele wurden Informationen aus verschiedenen Quellen recherchiert, untersucht und verarbeitet. Dabei wurde sich nicht nur den üblichen Quellen, wie dem Internet und den Büchern bedient, sondern ein Experteninterview durchgeführt. Des Weiteren haben mehrere Treffen mit dem Leiter des Regionalbüros Nord von der Firma isocal HeizKühlsysteme GmbH stattgefunden. Die Gespräche wurden zu Zwecken dieser Arbeit durchgeführt. Durch die Kontakte zu der BZR Ökoplan GbR und der Firma isocal HeizKühlsysteme GmbH zeigt sich eine starke praktische Relevanz des Themas. Auf diesem Weg wird dem Leser der Bachelorarbeit der Zugang zu dieser Thematik ermöglicht und erleichtert.

Der Aufbau der Bachelorarbeit ist in sechs Kapitel gegliedert. Nach dieser Einleitung wird im zweiten Kapitel zuerst ein Überblick über die Anlagenfunktion und den Anlagenaufbau gegeben. Das Kapitel erläutert den Zusammenhang der Komponenten anhand von in AutoCAD erstellten Schemen. Außerdem wird für die Bachelorarbeit die Bedeutung von Systemgrenzen erklärt und anschließend festgelegt. Das dritte Kapitel erläutert die Bedeutung und Funktion der einzelnen Komponenten. Hierbei werden die Berechnungen der Anlagenteile erstellt und die Bedeutung von Wetterdaten für das Eisspeichersystem analysiert. Im vierten Kapitel wird auf die Bemessung eines Eisspeichersystems eingegangen. Hier ist es unumgänglich, die Systemgrenzen für die Berechnung einzuhalten. Das fünfte Kapitel umfasst die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Dabei wird das Eisspeichersystem mit einer Holzpellettheizung verglichen. In diesen Kapiteln unterstützen das Experteninterview und die Unterhaltungen mit der Firma isocal HeizKühlsysteme GmbH jeweils die Annahmen im System und die berufsbezogene Relevanz. Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse zusammenfasst und geben einen Ausblick für die Zukunft. Abschließend wird eine Empfehlung für das Eisspeichersystem gegeben.



## 2. Anlagenbeschreibung

Das Eisspeichersystem besteht aus mehreren Kreisläufen von verschiedenen Medien. Die Wärmepumpe und der Trinkwarmwasserspeicher stellen die Schnittstellen zu den Kreisläufen dar. Auf der einen Seite der Wärmepumpe befindet sich jeweils das Wärmeträgermedium (Vorlauf grün, Rücklauf magenta) und auf der anderen Seite der Wärmepumpe strömt ein Wasserkreislauf (Vorlauf rot, Rücklauf blau, siehe Legende). Bei dem Wärmeträgermedium handelt es sich um eine Mischung aus Wasser und Frostschutzmittel, meist Glykol.<sup>3</sup> Das Glykol schützt das Eisspeichersystem vor dem Gefrieren des Mediums. Das Wasser-Glykol-Gemisch nennt man Sole.<sup>4</sup> Auf diese Weise wird die Funktion des Kreislaufs auch im Winter sichergestellt.<sup>5</sup>

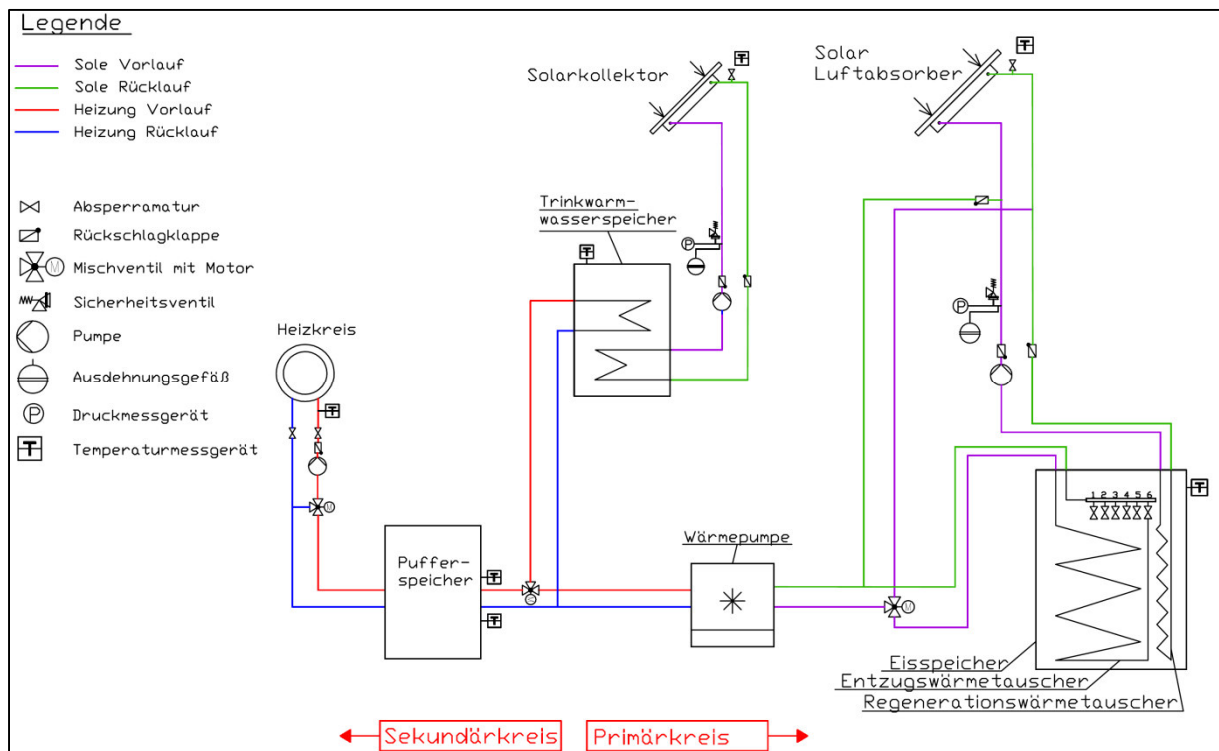


Abbildung 1: Anlagenschema

Auf dem abgebildeten Anlagenschema<sup>6</sup> wird zunächst der Kreislauf rechts der Wärmepumpe betrachtet. Dieser nennt sich Primärkreislauf. Links der Wärmepumpe wird Sekundärkreislauf benannt.

<sup>3</sup> Bei Glykol handelt es sich um ein Frostschutzmittel auf Basis von Alkohol. Die Summenformel lautet  $C_2H_6O_2$

<sup>4</sup> Vgl. Planungshandbuch Solarthermie 2008, S. 32

<sup>5</sup> Vgl. Planungshandbuch Solarthermie 2008, S. 31

<sup>6</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouit 17.11.2013

Auf der Abbildung 2<sup>7</sup> lassen sich der Primärkreislauf und die dazugehörigen Fließrichtungen der Sole erkennen.

Im Primärkreislauf wird über eine Solarthermieanlage Sole erwärmt. In diesem Fall handelt es sich bei der Solarthermieanlage um einen Solarluftkollektor. Die Auswahl dieses Typs und dessen Charaktereigenschaften werden ausführlich im Kapitel 3.2.1 vertieft. Nach dem Durchfließen der Solarthermieanlage strömt ein Teil der erwärmten Sole in den Eisspeicher und erwärmt das Fluid mit

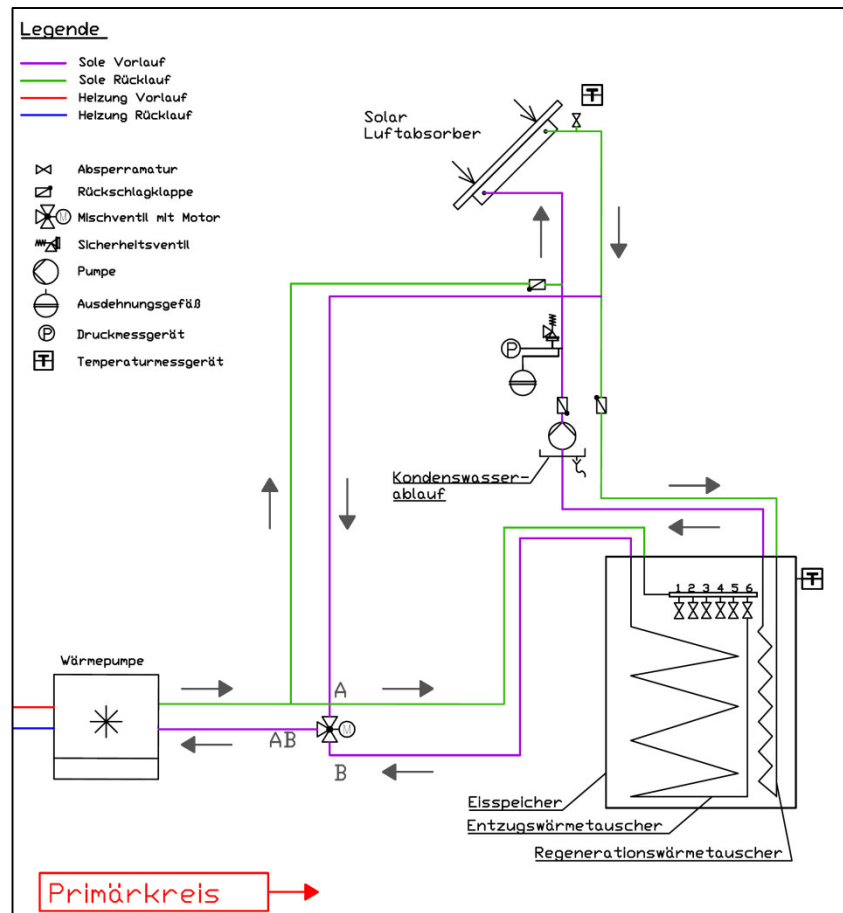


Abbildung 2: Primärkreis Fließrichtungen

Hilfe des Regenerationswärmetauschers. Dieser Wärmetauscher befindet sich an der Außenwand des Eisspeichers. Auch andere Umwelteinflüsse wie Erdwärme oder warmer Regen führen zur Regeneration des Eises. Diese Einflüsse auf den Eisspeicher werden in Kapitel 3.2.2 vertieft. Der Höhenunterschied des Rücklaufs der Sole aus dem Regenerationswärmetauscher zur Solarthermieanlage wird mit Hilfe von einer Pumpe überwunden. Eine Wanne führt anfallendes Kondensationswasser der Pumpe in einen Ablauf. Da sich die Sole durch den Wärmeeinfluss der Solarthermieanlage erwärmt und ausdehnt, sind ein Sicherheitsventil, ein Druckmessgerät und ein Ausdehnungsgefäß notwendig, um den Druck  $p$  im System konstant zu halten. Die Komponenten werden in Kapitel 3.6 beschrieben und es werden genaue Angaben zur Auslegung gemacht.

Die Wärmeenergie des Eisspeichers wird über einen Entzugswärmetauscher entzogen. Über ein Dreiwegeventil fließt die entzogene Wärme in die Wärmepumpe. Um eine konstante Vorlauftemperatur zur Wärmepumpe zu gewährleisten, wird über das Dreiwegeventil der anfangs beschriebene zweite Teil der Sole aus der Solarthermieanlage beigemischt.

Im Rücklauf der Wärmepumpe wird eine Hälfte der Sole der Solarthermieanlage zur Verfügung gestellt, die andere fließt in den Entzugswärmetauscher.

<sup>7</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouit 17.11.2013

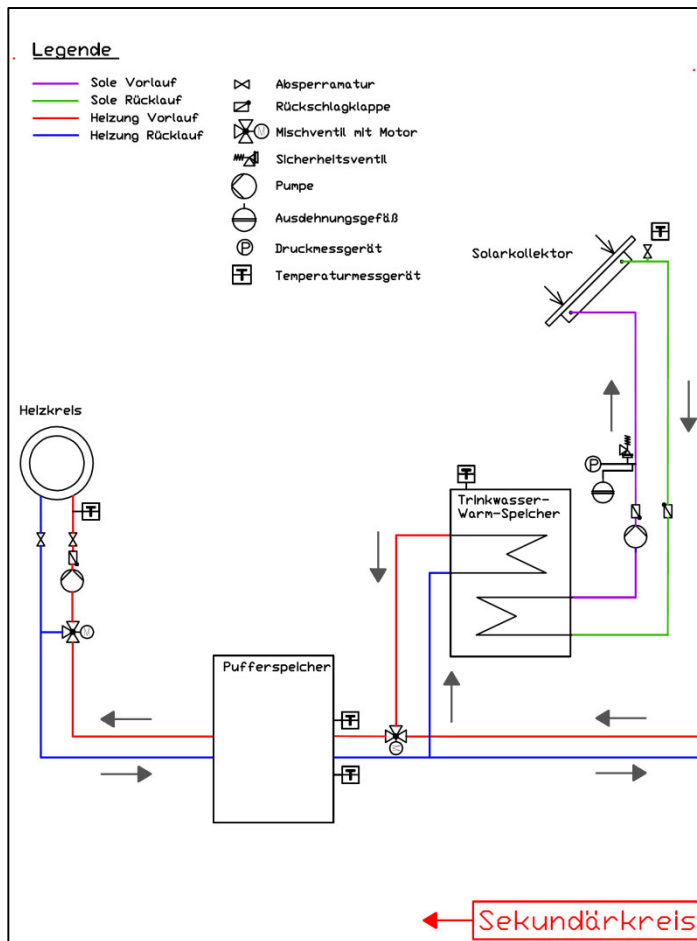


Abbildung 3: Sekundärkreis Fließrichtungen

Betrachtet wird nun der Sekundärkreis in Abbildung 3<sup>8</sup>: Die Wärmepumpe befördert die Wärmeenergie des Eisspeichers und der Solarthermieanlage mit Hilfe von technischer Arbeit in ein höheres Temperaturniveau, um das Gebäude zu beheizen. Da Trinkwasser warm nach dem Deutschen Institut für Normen DIN 1988-200 mindestens 60 Grad Celsius erreichen muss<sup>9</sup>, wird über eine Solarthermieanlage ein Warmwasserspeicher erwärmt. In diesem Fall handelt es sich um einen üblichen Solarkollektor. Auch in diesem Kreislauf wird eine Pumpe benötigt, um die Sole zu fördern. Ebenfalls wird ein Sicherheitsventil und Ausdehnungsgefäß verbaut. Die gewonnene Wärme aus der Solarthermieanlage wird an einen Trinkwarmwasserspeicher abgetragen. Aus diesem wird das Warmwasser für die Raumheizung gewonnen und die Warmwasserversorgung betrieben. Überschüssiges Warmwasser wird an einen Pufferspeicher übergeben.

Bei der Raumheizung handelt es sich um ein raumflächenintegriertes Heiz- und Kühlsystem. Dabei handelt es sich um eine Heiz- oder / und Kühlanlage, die in die Raumumschließungsflächen des Raumes integriert ist. Unter Raumumschließungsflächen werden die Wände und der Fußboden gesehen. Die Rohre für das System sind innerhalb oder unterhalb des Estrichs eingebettet.<sup>10</sup> Bei einer Wandheizung und einer Fußbodenheizung darf die maximale Wand- bzw. Fußbodenoberflächentemperatur maximal 29 Grad Celsius betragen. Bei einer Raumheizung mit Heizkörpern beträgt die Vorlauftemperatur 70 Grad Celsius.<sup>11</sup> Bei Anwendung einer Raumheizung mit raumflächenintegrierten Heizsystem sind die Temperaturdifferenzen zum Eisspeicher geringer als zum Heizungssystem mit Heizkörpern. Durch geringe Temperaturdifferenzen muss der Wärmepumpe weniger Energie zugeführt werden, als bei herkömmlichen Heizungssystemen mit Heizkörpern. Aus diesem Grund wird bei einem Neubau eines Gebäudes mit einem Eisspeichersystem meist eine Fußbodenheizung oder Wandheizung realisiert. Im Bestand müssen Niedrigtemperatur-Heizkörper nachgerüstet werden. Die Thematik wird in Kapitel 3.5 vertieft.

<sup>8</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouit 17.11.2013

<sup>9</sup> Vgl. DIN 1988-200 – Technische Regeln für Trinkwasser-Installation 2012, 9.7.2.2

<sup>10</sup> Vgl. DIN EN 1264-1 – Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme 2011, 3.1

<sup>11</sup> Vgl. DIN EN 1264-2 – Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme 2011, S. 16

## 2.1. Systemgrenzen

Um eine Systemgrenze zu beschreiben, wird festgelegt, was zu dem System gehört. Diese Grenze trennt was zu einem System gehört und was außerhalb des Systems liegt. In der Praxis ist es oft schwierig, diese Grenze zu bezeichnen oder festzulegen. Bei der Systemgrenze handelt es sich um die konstruktive Grenze. Innerhalb dieser betrachtet man einen Mechanismus als ein System. Einem Beobachter des Systems ist bewusst, was beobachtet und erläutert wird und wo ungeprüfte Annahmen genutzt werden.<sup>12</sup>

In dieser Bachelorarbeit wird zunächst diese konstruktive Systemgrenze in das Anlagenschema integriert – als orangefarbene unterbrochene Linie. Dieser Bereich stellt dar, was untersucht wird und welche Bestandteile des Systems als gegeben angenommen werden müssen.

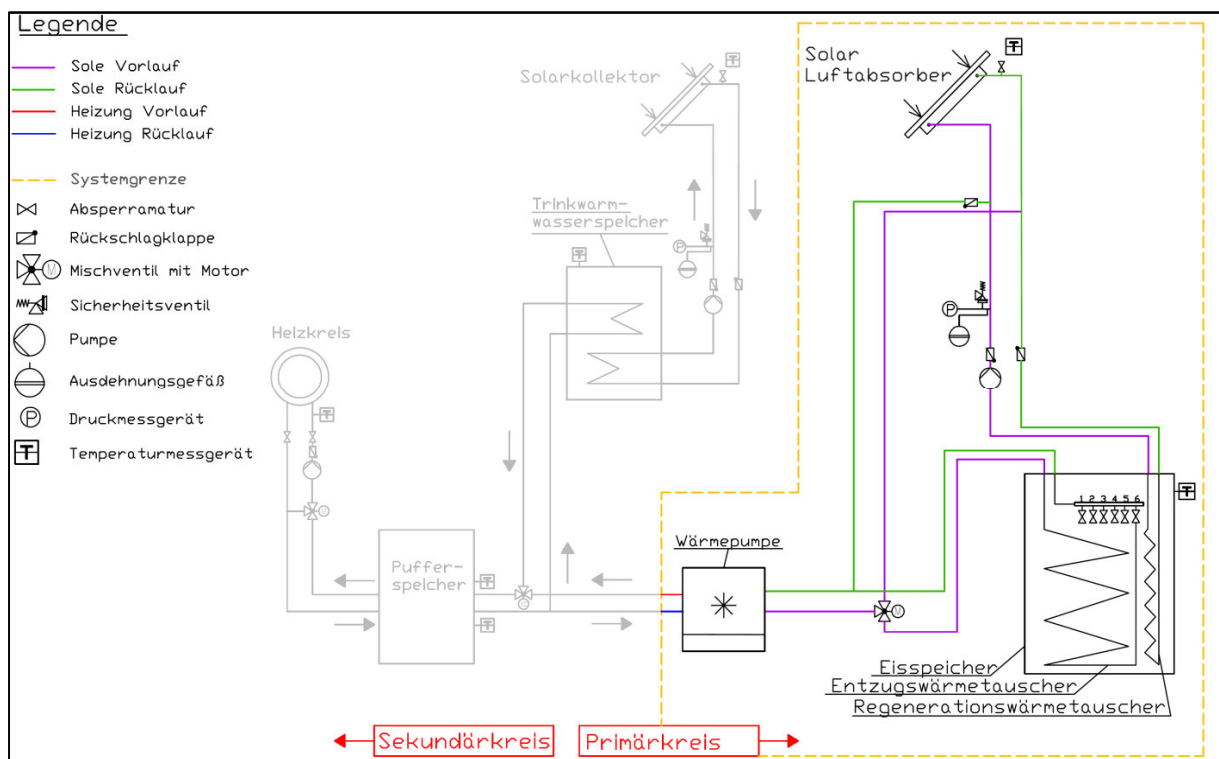


Abbildung 4: Anlagenschema – Systemgrenzen

Aus der Abbildung 4<sup>13</sup> ist zu entnehmen, dass innerhalb der definierten Systemgrenze der Primärkreis sowie die Wärmepumpe liegen. Auch ein Teil des Rohrleitungsverlaufs des Sekundärkreislaufes verläuft innerhalb der Systemgrenze.

Im folgenden Verlauf dieser Ausarbeitung wird auf das System innerhalb der Grenze eingegangen.

<sup>12</sup> Vgl. System-Entwicklung in der Wirtschaftsinformatik 2002, S. 14

<sup>13</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouf 17.11.2013

## 2.2. Technischer Regelvorgang

Nachdem das Anlagenschema beschrieben und die Systemgrenzen definiert wurde, müssen die technischen Regelvorgänge im System definiert werden.

In diesem technischen System werden die physikalischen Zustände als Größenwert von der Regelung aufgenommen. Abweichungen von einem geforderten Zustand werden dabei von der Regelung erfasst. Diese reagiert mit einem zweckmäßigen Verhalten auf die Abweichung und stellt den geforderten Zustand wieder ein.

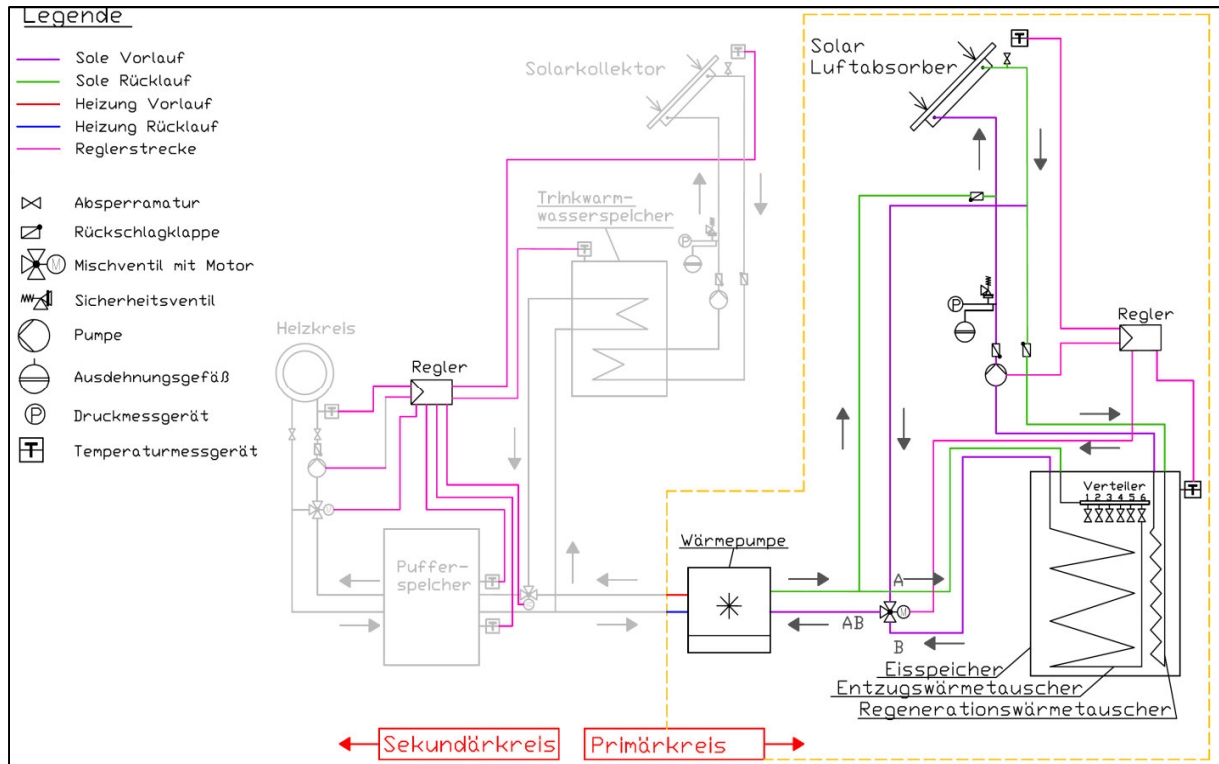


Abbildung 5: Anlagenschema – technischer Regelvorgang

Auf der Abbildung 5<sup>14</sup> ist das Anlagenschema mit dem technischen Regelvorgang veranschaulicht. Ein Regler untersucht nun den Primärkreislauf auf die Temperaturunterschiede zwischen der Umgebung und dem Eisspeicher. Aus dem Ergebnis der Prüfung wird das Dreiwegeventil geregelt. Dies beeinflusst, wie auf der Abbildung 5 zu erkennen ist, zu welchem Anteil Sole A und Sole B zu AB vermengt werden.

Gleichzeitig wird die Drehzahl der Pumpe der geforderten Leistung angepasst.

Der technische Regelvorgang und der Volumenstrom der mit Hilfe der Pumpe durch das System befördert werden muss, werden in Kapitel 3.4.2 berechnet.

<sup>14</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouit 17.11.2013

### 3. Anlagenkomponenten des Eisspeichersystems

---

Aus der Anlagenbeschreibung in Kapitel zwei wird nun eine genaue Darstellung und Erläuterung der Funktionsweisen der Anlagenkomponenten folgen. Hierbei wird nicht mehr die gesamte Anlage betrachtet werden, sondern die Komponenten im Detail. Aus den Ergebnissen der Ausarbeitung dieses Kapitels ist im nachfolgenden Abschnitt eine rechnerunterstützte Berechnung durchgeführt. Die Komponenten innerhalb der Systemgrenze sind zum einen die Wärmequellen und deren Speicher, die Regelung von Pumpe und Dreiwegeventil sowie die Wärmepumpe und das Rohrleitungssystem.

#### 3.1. Wärmequellen

---

Zunächst wird die Bedeutung des Wortes Wärmequelle definiert. Hierfür werden die Worte Wärme und Quelle im Einzelnen betrachtet.

Wärme ist die Energie, die zwischen zwei Systemen, bedingt durch Temperaturunterschiede, übertragen wird. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt dabei, dass die Wärme stets vom Ort höheren Temperaturniveaus zum niederen fließt. Sobald sich ein thermodynamisches Gleichgewicht einstellt, ist kein Austausch von Wärme mehr möglich und es fließt kein Wärmestrom mehr.

Eine Quelle ist der Ausgangspunkt einer Strömung.

Bei einer Wärmequelle handelt es sich also um ein Objekt, welches Wärme als Strömung an die Umgebung abgibt. Die Umgebung befindet sich dabei auf einem niedrigeren Temperaturniveau als die Quelle. Die wichtigste Wärmequelle für das Leben auf der Erde ist die Sonne. Doch auch der Erdkern stellt eine Wärmequelle dar.<sup>15</sup> In dieser Ausarbeitung wird ausschließlich die Sonne als Wärmequelle betrachtet.

Sonnenenergie kann durch eine Solarthermieanlage in nutzbare Energie umgewandelt werden. Die weltweit auftreffende Leistung der Sonnenstrahlung beträgt im Tagesdurchschnitt ca. 165 Watt pro Quadratmeter.<sup>16</sup> Dieser Wert hat jedoch kaum Aussagekraft, da die Werte der Sonnenstrahlung je nach Breitengrad der Erde, Höhenlage und Witterung des Gebiets erheblich schwanken. Für die witterungsbehafteten Werte der Strahlung müssen Messwerte der Wetterstationen als Mittelwert angenommen werden.

---

<sup>15</sup> Vgl. Praxishandbuch Energiewirtschaft 2009, S. 220

<sup>16</sup> Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarthermie> (Zugriff am 17.12.2013)

Um aussagekräftige Annahmen für die spätere Berechnung zu treffen, wird zunächst die Globalstrahlung auf die Bundesrepublik Deutschland analysiert.

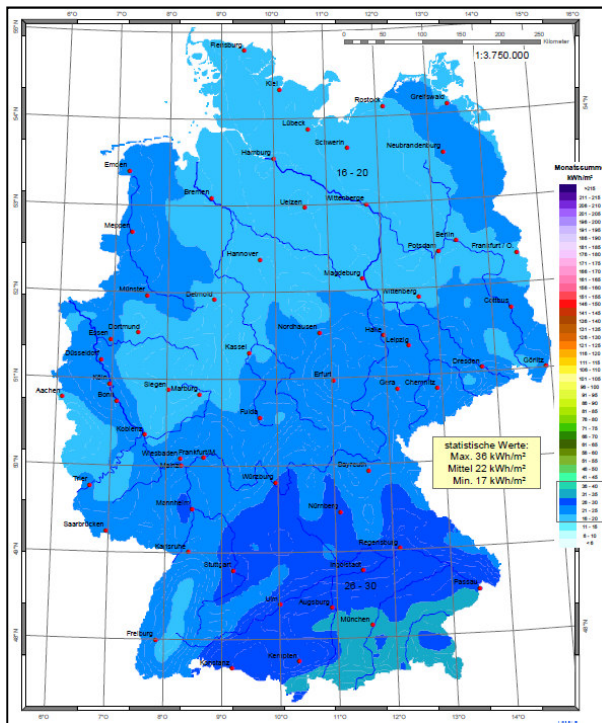


Abbildung 7: Monatssumme Januar der regionalen Einstrahlung in Deutschland

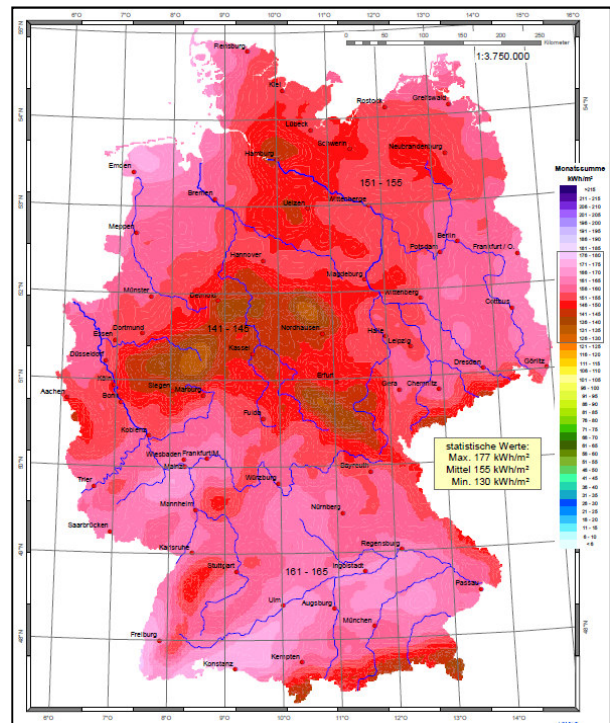


Abbildung 6: Monatssumme Juli der regionalen Einstrahlung in Deutschland

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen die Monatswerte der regionalen Einstrahlung in Deutschland auf eine horizontale Fläche in Kilowattstunden pro Quadratmeter in den Monaten Januar 2012 und Juli 2012.<sup>17</sup> Die Abbildungen sind vergrößert im Anhang 5 und 6 enthalten. Die Monate Januar und Juli im Jahr 2012 wurden beispielhaft gewählt, um die unterschiedlich eintreffende Globalstrahlung auf Deutschland im Winter und im Sommer darzustellen.

In folgender Tabelle 1 sind die Werte der Globalstrahlung in ganz Deutschland, Hamburg und München zusammengefasst.

Tabelle 1: Statistische Werte der Globalstrahlung in Deutschland

Ort	Mittelwert Strahlung Januar	Mittelwert Strahlung Juli
-	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>
Deutschland	22	155
Hamburg	18	138
München	33	158

Schon auf den ersten Blick auf die Abbildung 6 und 7 fällt auf, dass sich die Strahlung auf Deutschland saisonal unterscheidet. Jeweils rechts der Landkarte zeigt eine Legende die Strahlungsintensität. Blaue Flächen stellen die geringste Leistung der Sonnenstrahlung dar, rote Flächen dagegen einen mittleren bis hohen Wert.

<sup>17</sup> Deutscher Wetterdienst DWD 2013

Im Januar 2012 ergibt der statistische Mittelwert 22 Kilowattstunden pro Quadratmeter in Hamburg. Der Wert im Juli 2012 ist erheblich höher und beträgt im statistischen Mittelwert 155 Kilowattstunden pro Quadratmeter.

Die Breitengrade sind nach dem Sonneneinfallswinkel geordnet. Auch der Breitengrad innerhalb von Deutschland hat eine Bedeutung. Der Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass München über höhere Strahlungswerte als Hamburg verfügt.

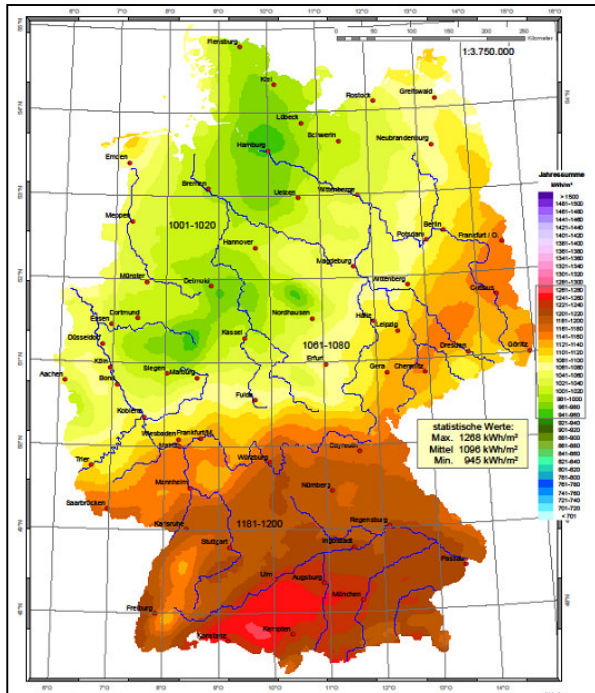


Abbildung 9: Jahressumme 2012 der regionalen Einstrahlung in Deutschland

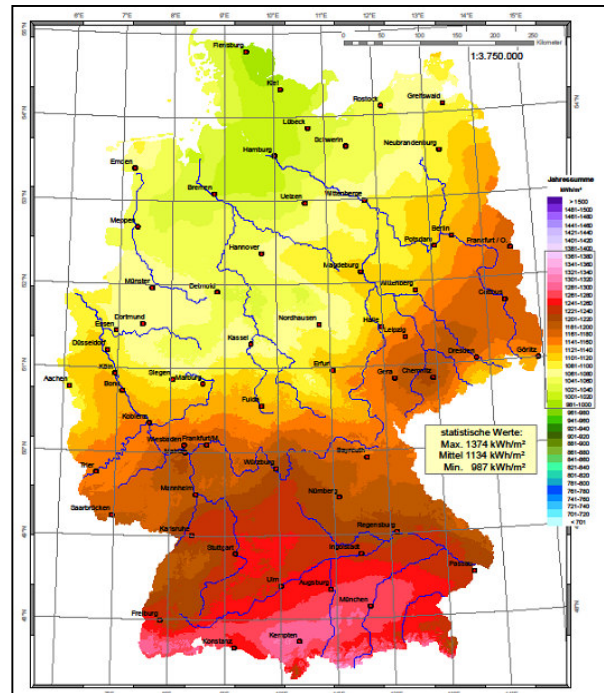


Abbildung 8: Jahressumme 2011 der regionalen Einstrahlung in Deutschland

Die Abbildungen 8 und 9 sind vergrößert im Anhang 7 und 8 enthalten. In den Abbildungen 8 und 9 ist die Legende von blau – wenig Globalstrahlung bis lila – viel Globalstrahlung zu verstehen. Vergleicht man die Jahreswerte von 2012 und 2011<sup>18</sup> der regionalen Einstrahlung in Deutschland auf eine horizontale Fläche in Kilowattstunden im Jahr, so ist festzustellen, dass 2011 eine höhere Globalstrahlung auf Deutschland schien. Die Jahre 2011 und 2012 wurden gewählt, um Werte aus der nahen Vergangenheit auszuwerten. Die Werte des Jahres 2013 sind zum Zeitpunkt der Ausarbeitung noch nicht vollständig und werden somit in dieser Ausarbeitung nicht berücksichtigt.

Im Folgenden wird näher auf die Komponenten der Globalstrahlung eingegangen. Die Werte für die Globalstrahlung setzen sich aus zwei Werten zusammen, der direkten Strahlung und der diffusen Strahlung. Dies wird im folgenden Kapitel erläutert.

Das Ziel ist es, einen optimalen Wirkungsgrad für eine Solarthermieanlage zu erreichen, um die Überschussenergie in einem Speicher zu lagern. Hierfür ist es unumgänglich genauer auf die Strahlungsleistung einzugehen, um den genauen Wert des Überschusses zu bestimmen.

<sup>18</sup> Deutscher Wetterdienst DWD 2013



### 3.1.1. Direkte Sonnenstrahlung

Die direkte Sonnenstrahlung ist der Teil der Sonnenstrahlung, der frei die Atmosphäre der Erde durchdringt.<sup>19</sup> Die Sonnenscheindauer ist entscheidend, um Werte für die direkte Sonnenstrahlung zu bestimmen. Die Werte für die Sonnenscheindauer pro Tag wurden dem Deutschen Wetterdienst DWD entnommen und in folgendem Diagramm veranschaulicht.

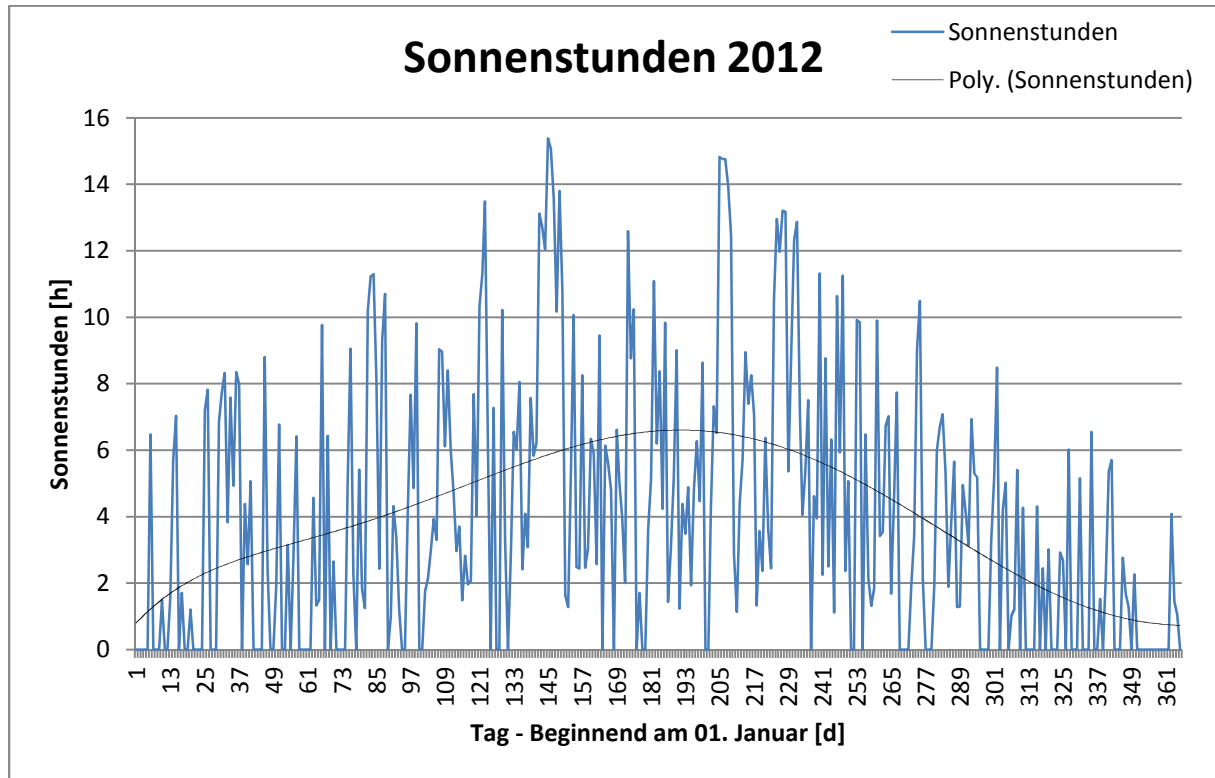


Diagramm 1: Sonnenstunden 2012

Dem Diagramm 1 sind die Sonnenstunden an einem Tag zu entnehmen. Es wurden die 365 Tage im Jahr als blaue Linie abgebildet. Eine Polynomfunktion in schwarz verdeutlicht den Trend der Sonnenstunden. Es wurde sich dabei um eine Approximation sechsten Grades bedient. Die Sonnenstunden im Jahr 2012 betragen in Summe 1473 Stunden.

Verglichen werden im Folgenden die Anzahl der Sonnenstunden aus dem Jahr 2012 und dem Jahr 2011. Die Werte aus dem Jahr 2011 werden in Diagramm 2 veranschaulicht.

<sup>19</sup> Vgl. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2011,2012, CD 30

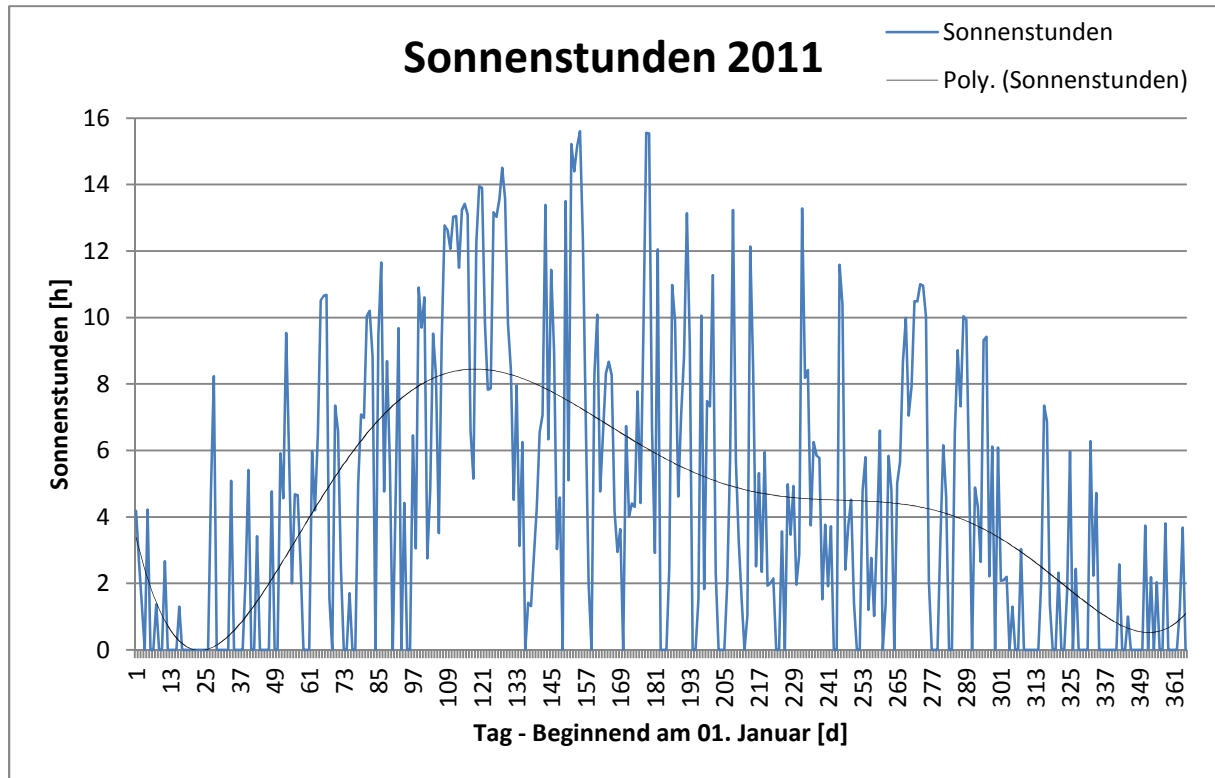


Diagramm 2: Sonnenstunden 2011

Die Werte aus dem Jahr 2012 und 2011 haben den gleichen Verlauf. Im Winter nehmen die Anzahl der Sonnenstunden ab und im Sommer ist die Anzahl der Sonnenstunden am höchsten. Diese Tatsache ist nachvollziehbar, da am 21. Juli auf der Nordhalbkugel die Sonne den Höchststand über dem Horizont hat.

Im Detail unterscheiden sich jedoch die Werte. Im Jahr 2011 wurden Sonnenstunden von 1597 Stunden gemessen. Dieser Wert ist um 124 Stunden und acht Prozent höher als im Jahr 2012.

### 3.1.1.1. Diffuse Sonnenstrahlung

Die Solarthermie ist nicht nur von der direkten Sonnenstrahlung abhängig. Weitere wichtige Faktoren sind die diffuse Strahlung sowie die Bodenreflexion. Die diffuse Strahlung entsteht, wenn direkte Strahlung auf dem Weg zu der Erde durch Schwebstaub und Nebel gestreut wird.<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Vgl. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2011,2012, CD 30

### 3.1.2. Lufttemperatur

Um den Ertrag durch Solarthermie bestimmen zu können, fehlt noch ein bedeutsamer Gesichtspunkt: die Lufttemperatur.

Die Lufttemperatur ist abhängig von der Umwandlung der zuvor beschriebenen Strahlungsenergie in Wärmeenergie in den erdnahen Luftschichten. Es ist zu erwarten, dass die Temperaturen um die Sonnenwende am 21. Juni am höchsten sein müssten.

Verglichen werden im Folgenden die Lufttemperaturen aus den Jahren 2012 und 2011.<sup>21</sup> Die Jahre 2011 und 2012 liegen in der nahen Vergangenheit und sind repräsentativ für ein normales Wettergeschehen. Extremwetterereignisse werden in Kapitel vier betrachtet.

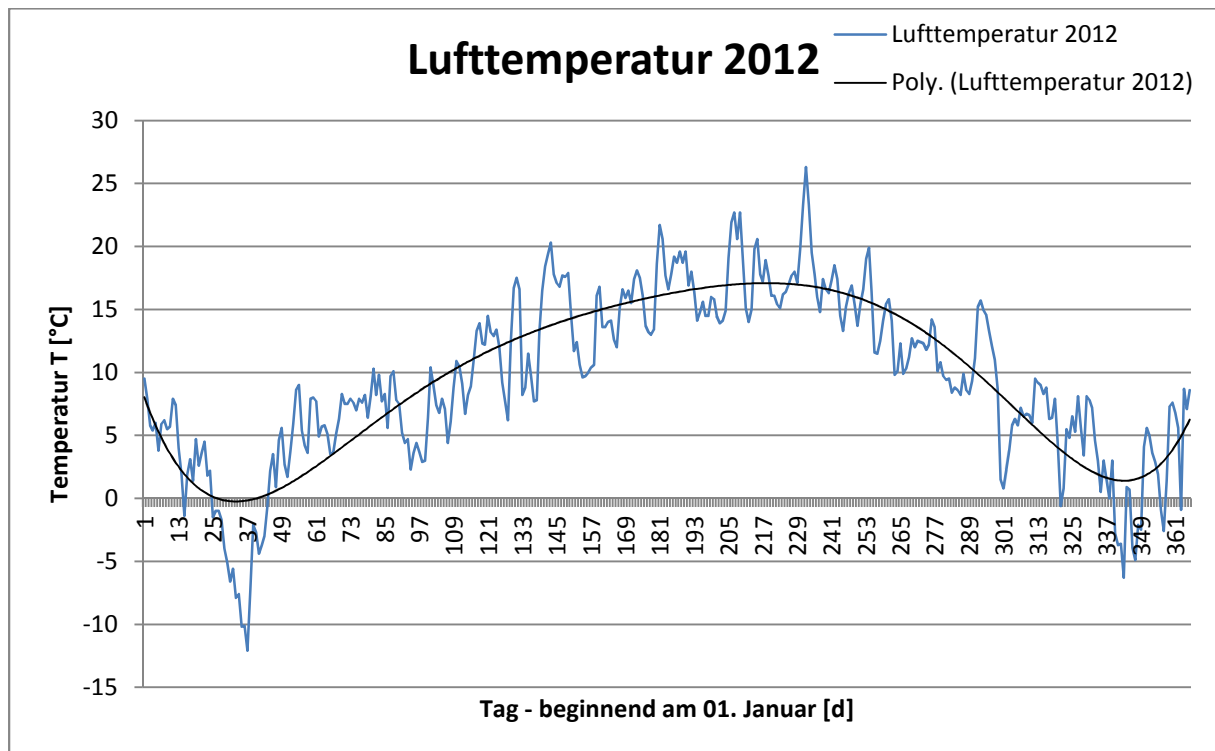


Diagramm 3: Lufttemperatur 2012

Bei den Lufttemperaturen aus dem Jahr 2012 ist, wie erwartet, eine erhöhte Lufttemperatur im Sommer festzustellen. Im Mittelwert wurde eine Temperatur im Jahr 2012 von 9,1 Grad Celsius erreicht.

Wie schon bei den Sonnenstunden werden die Werte mit denen aus dem Jahr 2011 verglichen.

<sup>21</sup> Deutscher Wetterdienst DWD 2013

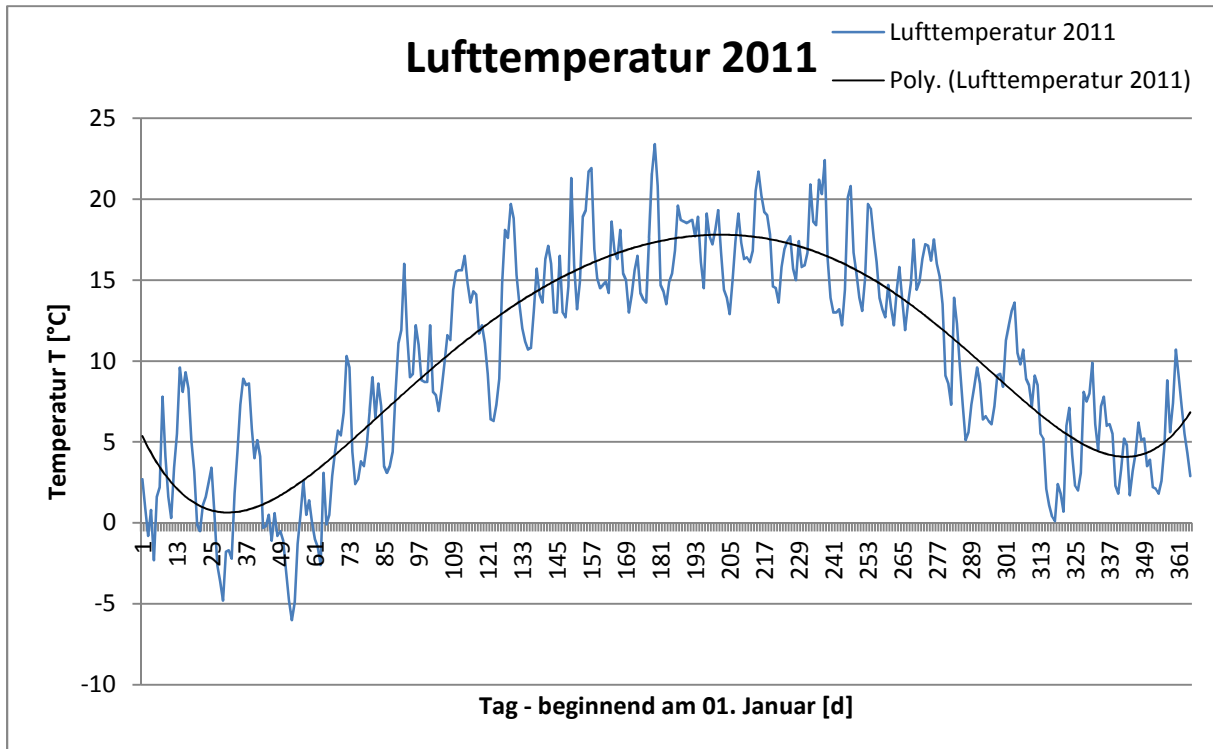


Diagramm 4: Lufttemperatur 2011

Die Kurve der Lufttemperaturen gleicht der aus dem Jahr 2012. Im Jahr 2011 wurde eine Durchschnittstemperatur von 9,4 Grad Celsius erlangt. Prozentual war die Temperatur 2011 um sechs Prozent höher als im Jahr 2012.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass 2011 ein wärmeres Jahr als 2012 war. Diese Entwicklung lässt sich an den Werten der Globalstrahlung und der sich daraus ergebenden Lufttemperatur bemessen.

Die Umgebungstemperatur spielt eine wesentliche Rolle bei der Anlagenregelung. Vertieft wird das Thema in Kapitel 3.4. Des Weiteren werden die Werte der Umgebungstemperatur bei der Berechnung einer Solarkollektoranlage verwendet. Mit den Werten der Umgebungstemperatur wird im folgenden Abschnitt auf den Wirkungsgrad und die Funktionsweise von thermischen Solarkollektoren, der Absorption von Wärme aus der Umgebungsluft und der Erde eingegangen.

## 3.2. Wärmesenke

Als Wärmesenke ist ein Körper oder örtlich begrenztes Gebiet gemeint, welches die ihm zugeführte thermische Energie durch ein benachbartes Medium aufnimmt. Mit diesem Medium können Fluide oder feste Gegenstände gemeint sein.<sup>22</sup> Die Wärmesenke ist das Gegenstück zu der Wärmequelle. Für eine Wärmeströmung werden eine Wärmequelle und eine Wärmesenke benötigt.

### 3.2.1. Solarkollektor

In unseren Breiten von 47 Grad bis 55 Grad Nord machen etwa 50 Prozent der Gesamtstrahlung die diffuse Strahlung aus. Niedertemperatursysteme sind im Gegensatz zu Hochtemperaturanlagen in der Lage, die diffuse Strahlung zu verwenden. Niedertemperatursysteme können Temperaturen bis zu 100 Grad Celsius nutzen. Aus diesem Temperaturbereich ergeben sich die Hauptanwendungen von Niedertemperatursystemen an Warmwasserbereitung sowie Heizungsunterstützung. Hochtemperatursysteme mit Temperaturen über 100 Grad Celsius finden Verwendung in der Stromerzeugung durch solarthermische Kraftwerke oder bei notwendiger Prozesswärme über 100 Grad Celsius.<sup>23</sup>

Folgende Abbildung 10<sup>24</sup> veranschaulicht den Aufbau und die Funktionsweise eines Niedertemperaturkollektors am Beispiel eines Flachkollektors.

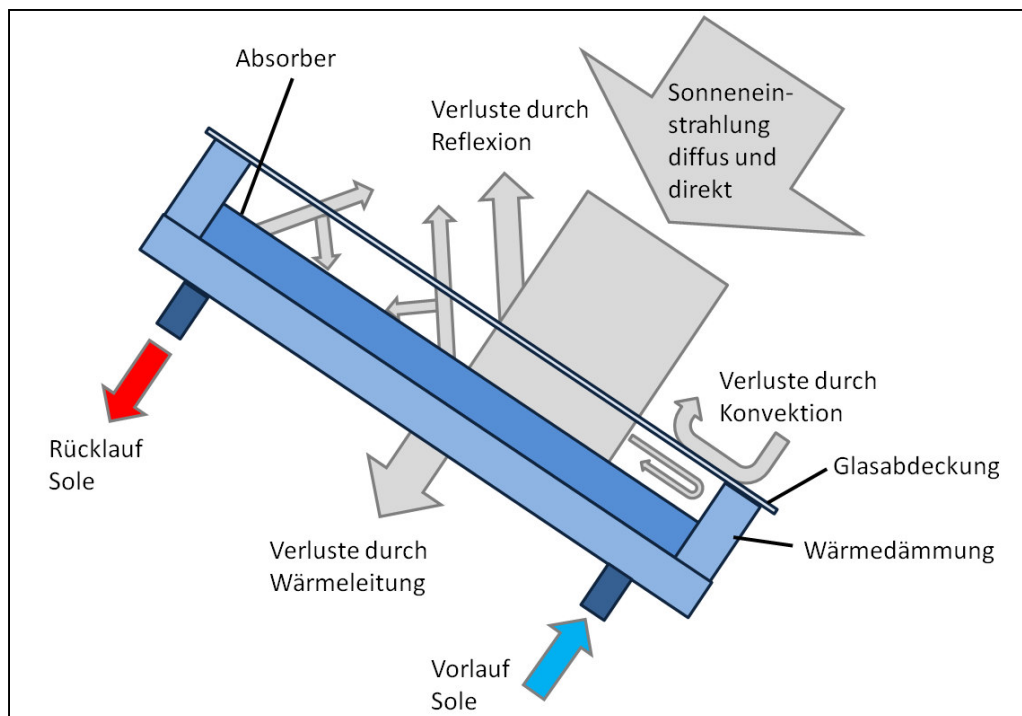


Abbildung 10: Aufbau und Funktion eines Niedertemperaturkollektors (Flachkollektor)

<sup>22</sup> Vgl. Praxishandbuch Energiewirtschaft 2009, S. 220

<sup>23</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 388

<sup>24</sup> In Anlehnung an [http://www.energiesparmobil.de/erneuerbare\\_energien/sonnenenergienutzung.php](http://www.energiesparmobil.de/erneuerbare_energien/sonnenenergienutzung.php) (Zugriff am 18.12.2013)

Die diffuse und die direkte Strahlung treffen durch eine transparente Abdeckung auf einen Absorber. Dieser erhitzt sich durch die einfallende Strahlung. Durch eine transparente Abdeckung, meist eine Glasscheibe, können Verluste durch Konvektion reduziert werden. Wärmedämmung minimiert die Verluste durch Wärmeleitung. Wie auf der Abbildung 10 abgebildet, befinden sich auf der Rückseite des Kollektors Rohrleitungen, die von einem wärmeleitenden Medium durchflossen werden und die Wärme kontrolliert weiterleiten.

Mit den folgenden Gleichungen wird der Wirkungsgrad eines Kollektors bestimmt. Der im System verwendete Kollektortyp spielt eine wichtige Rolle bei der Auslegung eines Eisspeichersystems. Die Differenzierung dieser Typen folgt später. Der Wirkungsgrad  $\eta$  wird mit folgender Gleichung berechnet.<sup>25</sup>

$$\eta = \frac{\dot{q}_N}{G} \quad (1)$$

Die Symbole der Gleichung ( 1 ) haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\eta$	: Wirkungsgrad	-
$\dot{q}_N$	: Nutzwärme pro Flächeneinheit	W/m <sup>2</sup>
$G$	: Globalstrahlung	W/m <sup>2</sup>

Im nächsten Schritt wird die Nutzwärme pro Flächeneinheit  $\dot{q}_N$  berechnet. Dafür wird die Energiebilanz nach Abbildung 10 aufgestellt:<sup>26</sup>

$$\dot{Q}_N = \tau_{Abd} \cdot G \cdot A_{SK} - \dot{Q}_R - \dot{Q}_K - \dot{Q}_{ST} \quad (2)$$

Die Symbole der Gleichung ( 2 ) haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\tau_{Abd}$	: Transmissionsgrad	-
$A_{SK}$	: Fläche des Solarkollektors	m <sup>2</sup>
$\dot{Q}_N$	: Nutzwärme	W
$\dot{Q}_R$	: Wärmeverluste durch Reflexion an der Absorberfläche	W
$\dot{Q}_K$	: Wärmeverluste durch Konvektion und Wärmeleitung	W
$\dot{Q}_{ST}$	: Wärmeverluste durch Strahlung	W

Die Globalstrahlung  $G$  trifft in Abhängigkeit des Transmissionskoeffizienten  $\tau_{Abd}$  auf die Fläche des Absorbers  $A_{SK}$ . Bei dem Transmissionsgrad  $\tau_{Abd}$  handelt es sich um ein Maß für die durchgelassene Intensität an Strahlung. Die in Gleichung ( 2 ) unbekanntenen Größen sind die Wärmeverluste. Die Verluste treten durch Reflexion, Konvektion und Wärmeleitung auf. Die Wärmeverluste werden im folgenden Schritt berechnet.

<sup>25</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 93

<sup>26</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 388

Für die Wärmeverluste durch Reflexion an der Absorberfläche  $\dot{Q}_R$  gilt folgende Gleichung: <sup>27</sup>

$$\dot{Q}_R = \tau_{Abd} \cdot \rho_{SK} \cdot G \cdot A_{SK} \quad (3)$$

Das noch nicht verwendete Symbol der Gleichung ( 3 ) hat folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\rho_{SK}$	: Reflexionsgrad des Solarkollektors	-

Der Reflexionsgrad  $\rho_{SK}$  ist der Wert für die reflektierte Intensität an Strahlung, die aus der Umgebung kommt.

Oft werden die Wärmeverluste durch Konvektion und Wärmeleitung mit denen der Strahlung zusammengefasst. <sup>28</sup>

$$\dot{Q}_V = \dot{Q}_K + \dot{Q}_{ST} \quad (4)$$

Das Symbol der Gleichung ( 4 ), welches zuvor noch nicht verwendet wurde, hat folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\dot{Q}_V$	: Wärmeverluste	W

Die Wärmeverluste durch Strahlung  $\dot{Q}_{ST}$  werden vernachlässigt, da diese oft sehr klein sind. Die Summe der Wärmeverluste wird mit einem definierten Gesamtwärmeübergangskoeffizienten  $k_0$  ausgedrückt. <sup>29</sup> Des Weiteren hängen die Verluste von der Umgebungstemperatur sowie der der Temperatur des Solarkollektors ab. Es gilt also folgendermaßen: <sup>30</sup>

$$\dot{Q}_V = \dot{Q}_K + \overset{0}{\dot{Q}_{ST}} = k_0 \cdot A_{SK} \cdot (T_{SK} - T_U) \quad (5)$$

Die Symbole der Gleichung ( 5 ) haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$k_0$	: Gesamtwärmeübergangskoeffizient	W/m <sup>2</sup> ·K
$T_{SK}$	: Temperatur des Solarkollektors	K
$T_U$	: Temperatur der Umgebung	K

<sup>27</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 388

<sup>28</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 388

<sup>29</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 390

<sup>30</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 388

Die berechneten Wärmeverluste werden in die Gleichung ( 2 ) eingesetzt:

$$\dot{Q}_N = \tau_{Abd} \cdot G \cdot A_{SK} - \overbrace{\tau_{Abd} \cdot G \cdot A_{SK} \cdot \rho_{SK}}^{\text{Reflexionsverluste}} - \overbrace{k_0 \cdot A_{SK} \cdot (T_{SK} - T_U)}^{\text{Wärmeverluste}} \quad (6)$$

Um auf die Nutzwärme pro Flächeneinheit zu gelangen, muss die Gleichung ( 6 ) durch die Flächeneinheit  $A_{SK}$  des Solarkollektors geteilt werden.

$$\dot{q}_N = \frac{\dot{Q}_N}{A_{SK}} \longrightarrow \dot{Q}_N = \dot{q}_N \cdot A_{SK} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_N = \dot{q}_N \cdot A_{SK} = \tau_{Abd} \cdot G \cdot A_{SK} - \tau_{Abd} \cdot G \cdot A_{SK} \cdot \rho_{SK} - k_0 \cdot (T_{SK} - T_U) \cdot A_{SK} \quad (8)$$

$$\dot{q}_N = \tau_{Abd} \cdot G \cdot (1 - \rho_{SK}) - k_0 \cdot (T_A - T_U) \quad (9)$$

Nach dem Strahlungsgesetz gilt:<sup>31</sup>

$$\tau_{SK} + \alpha_{SK} + \rho_{SK} = 1 \quad (10)$$

Das Symbol der Gleichung ( 10 ), welches zuvor noch nicht verwendet wurde, hat folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\alpha_{SK}$	Absorptionsgrad	-

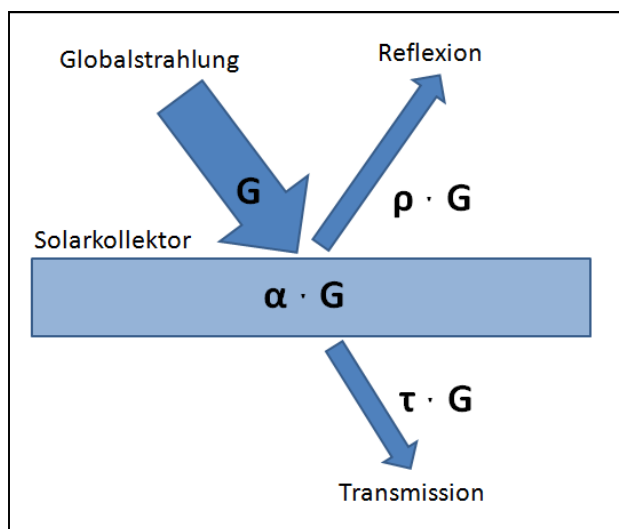


Abbildung 11: Strahlungsgesetz

Auf der Abbildung 11<sup>32</sup> ist das Strahlungsgesetz visualisiert. Die auf den Solarkollektor auftreffende Globalstrahlung wird reflektiert, absorbiert und transmittiert.

Da keine Transmission durch den Solarkollektor stattfinden kann, ist der Term des Transmissionsgrades  $\tau_{Abd}$  null.

<sup>31</sup> Vgl. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2011,2012, S. 1333

<sup>32</sup> In Anlehnung an Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2011,2012, S. 1333



Daher gilt für den Transmissionsgrad folgende Gleichung:

$$\rho_{SK} + \alpha_{SK} = 1 \quad (11)$$

$$\alpha_{SK} = 1 - \rho_{SK} \quad (12)$$

Im Folgenden wird in die Berechnung der Konversionsfaktor  $\eta_0$  eingeführt. Dieser ist ein Maß für die optischen Verluste des Solarkollektors.

$$\eta_0 = \tau_{Abd} \cdot \alpha_{SK} \quad (13)$$

Das Symbol der Gleichung ( 13 ) hat folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\eta_0$	: Konversionsfaktor / Optische Verluste	-

Aus der Zusammenführung der Gleichung ( 9 ) und ( 13 ) lässt sich folgende Gleichung erstellen:

$$\dot{q}_N = \eta_0 \cdot G - k_0 \cdot (T_{SK} - T_U) \quad (14)$$

Mit diesen Erkenntnissen lässt sich der Wirkungsgrad des Solarkollektors aus den optischen und den Wärmeverlusten bestimmen:

$$\eta = \frac{\dot{q}_N}{G} = \frac{\eta_0 \cdot G - k_0 \cdot (T_{SK} - T_U)}{G} = \eta_0 - \frac{k_0 \cdot (T_{SK} - T_U)}{G} \quad (15)$$

Optische Verluste
Wärmeverluste

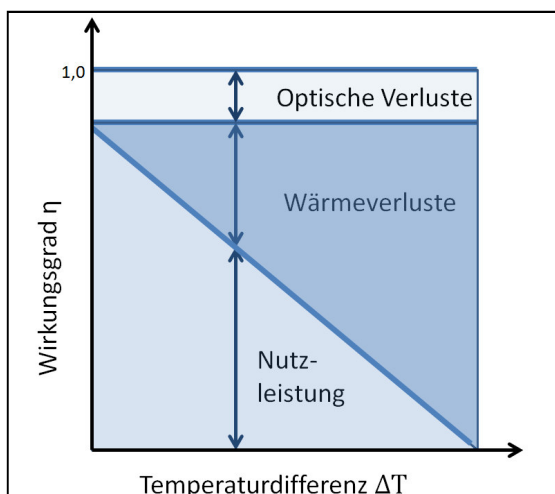


Abbildung 12: Wärme- und optische Verluste bei einem Solarkollektor

Die optischen Verluste und Wärmeverluste werden in nebenstehender Abbildung 12 bei steigender Temperaturdifferenz und Wirkungsgrad schematisch abgebildet. In kommenden Diagrammen 5 und 6 folgen exakte Berechnungen nach dem Schema der Abbildung 12. Um eine Berechnung des Wirkungsgrades zu realisieren, muss eine weitere Komponente betrachtet werden. Dies erfolgt im nachfolgenden Schritt.

Bei experimentellen Messungen des Wirkungsgrades  $\eta$  eines Solarkollektors wurde festgestellt, dass mit ansteigender Differenz von  $T_{SK}$  und  $T_U$  der Wirkungsgrad überproportional kleiner wird. Für den Wärmeübergang durch Strahlung vom Absorber an das Glas erfordert es einer weiteren Komponente, die die überproportional anwachsenden Strahlungsverluste einbezieht. Hierfür wird das Stefan-Boltzmann-Gesetz angewendet. Stefan und Boltzmann formulierten im 19. Jahrhundert den Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers. Ein schwarzer Körper emittiert mehr Strahlung als andere Körper, weshalb Transmission und Reflexion von Strahlung bei einem schwarzen Körper nicht möglich sind ( $\tau_{SK} = \rho_{SK} = 0, \alpha_{SK} = 1$ ). Das Stefan-Boltzmann-Gesetz besagt, dass ein schwarzer Körper mit einer Strahlungsdichte ausstrahlt, die zu der vierten Potenz der Temperatur proportional ist.

Der Austausch zwischen zwei Platten, in diesem Fall der Glasscheibe und dem Absorber wird mit folgender Gleichung beschrieben:<sup>33</sup>

$$\dot{Q} = \sigma \cdot A_{SK} \cdot (T_{SK}^4 - T_U^4) \quad (16)$$

Das Symbol der Gleichung ( 16 ) hat folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\sigma$	: Stefan-Boltzmann-Konstante	$W/m^2 \cdot K^4$

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz wird berücksichtigt, indem die Gleichung ( 15 ) um einen quadratischen Term erweitert wird:<sup>34</sup>

$$\eta = \eta_0 - \frac{k_0 \cdot (T_{SK} - T_U) + k_1 \cdot (T_{SK} - T_U)^2}{G} \quad (17)$$

Das Symbol der Gleichung ( 17 ) hat folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$k_1$	: Wärmeübergangskoeffizient	$W/m^2 \cdot K^2$

Der Wärmeübergangskoeffizient  $k_1$  ist in folgenden Berechnungen erheblich kleiner als der Gesamtwärmeübergangskoeffizient  $k_0$ . Der Wärmeübergangskoeffizient  $k_1$  hat somit erst bei hohen Temperaturdifferenzen zwischen dem Solarkollektor und der Umgebung Einfluss auf den Wirkungsgrad  $\eta$ .

<sup>33</sup> Vgl. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2011,2012, S. 212

<sup>34</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 94

Mit den Erkenntnissen aus den Gleichungen kann nun der optimale Niedertemperaturkollektortyp gefunden werden. Die Hauptkollektoren im Bereich unter 100 Grad Celsius Betriebstemperatur sind im Wesentlichen:

- Röhrenabsorber
- Flachkollektoren
- Vakuumkollektoren

Je höher der Wirkungsgrad eines Kollektors ist, desto höher ist in der Regel der Preis des Kollektors. Ein Röhrenabsorber hat den niedrigsten Wirkungsgrad, ein Vakuumkollektor den größten. Im Folgenden wird geprüft, welcher Typ für ein Eisspeichersystem ausreichend ist und somit Kosten für die Anlagenerstellung gespart werden können.<sup>35</sup>

Bei einem Röhrenabsorber handelt es sich um ein schwarzes flexibles Rohr aus Kunststoff, welches beständig gegen Ultraviolettstrahlung ist.<sup>36</sup>



Abbildung 13: Röhrenabsorber auf einem Flachdach



Abbildung 14: Flachkollektor auf einem Dach mit Neigungswinkel

Wie auf der Abbildung 13<sup>37</sup> zu erkennen ist, sind die Röhren zu Matten zusammengefasst. Diese können auf einem Flachdach oder stehend angebracht werden. Die Ausrichtung spielt für den Wirkungsgrad keine Rolle. Der Aufbau dieser Anlage ist sehr einfach, hat einen geringen Preis, jedoch auch einen geringeren Wirkungsgrad als ein Flachkollektor und Vakuumkollektor. Der geringe Wirkungsgrad ist darauf zurückzuführen, dass keine Vorkehrungen getroffen wurden, um die Wärme zu isolieren. Anhand der Gleichung ( 17 ) wird in einem Diagramm der Wirkungsgrad veranschaulicht.

<sup>35</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 391

<sup>36</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 391

<sup>37</sup> <http://www.kroglowski.de/eisheizung.html> (Zugriff am 19.12.2013)

Hierfür werden bei einem Röhrenabsorber folgende Werte vorgegeben:<sup>38</sup>

Tabelle 2: Werte zum Röhrenabsorber

Bezeichnung	Symbol = Wert	Einheit
Gesamtwärmeübergangskoeffizient	$k_0 = 20,00$	$W/m^2 \cdot K$
Wärmeübergangskoeffizient	$k_1 = 0,10$	$W/m^2 \cdot K$
Konversionsfaktor	$\eta_0 = 0,80$	-

Die Werte aus der Tabelle 2 werden in Diagramm 5 verwendet.

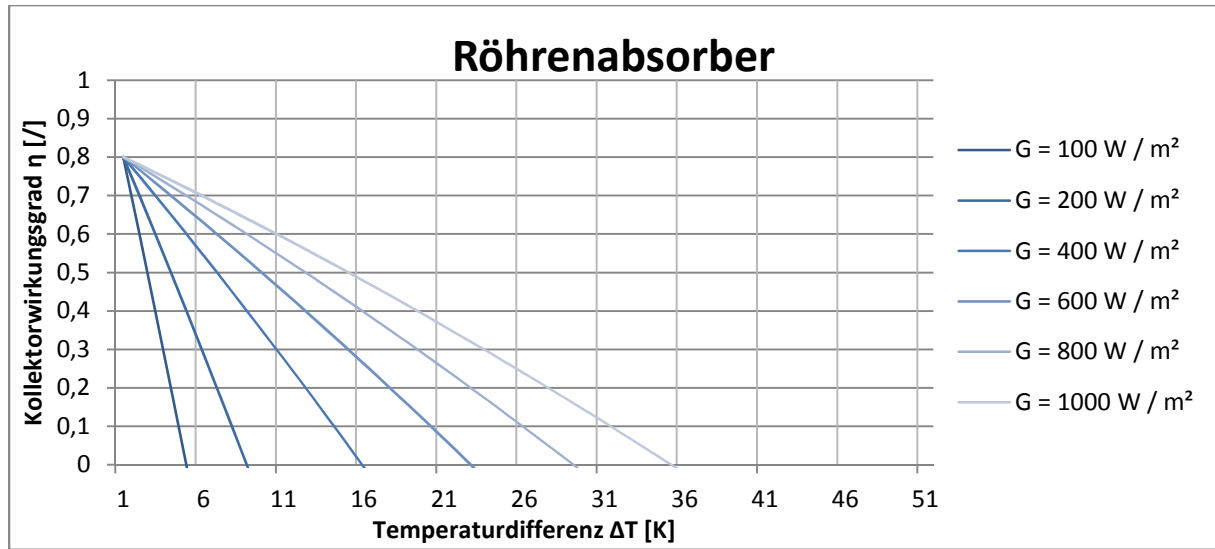


Diagramm 5: Wirkungsgrad Röhrenabsorber

Auf dem Diagramm 5<sup>39</sup> ist der Wirkungsgrad des Röhrenabsorbers im Bezug auf die Temperaturdifferenzen veranschaulicht. Im Diagramm ist zu erkennen, dass die hellsten Graphen die Werte mit hoher Globalstrahlung darstellen. Die dunkelsten Graphen verdeutlichen Werte mit niedriger Globalstrahlung. Genau Werte können der Legende entnommen werden. Je höher die Temperaturdifferenz ist, desto schlechter ist der Wirkungsgrad des Kollektors. Der Wirkungsgrad wird ebenfalls mit abnehmender Globalstrahlung verschlechtert. Das Diagramm 5 kann mit der schematischen Abbildung 12 verglichen werden.

Der auf der Abbildung 14<sup>40</sup> abgebildete Kollektor hat im Gegensatz zum Röhrenabsorber auf Abbildung 13 Vorkehrungen, um die Wärme zu isolieren. Aus diesem Grund ist zu erwarten, dass der Wirkungsgrad eines Flachkollektors besser ist, als bei einem Röhrenabsorber.

Der Aufbau eines Flachkollektors wurde auf Abbildung 10 dargestellt und erklärt.

<sup>38</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 393

<sup>39</sup> In Anlehnung an Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 401

<sup>40</sup> <http://wiki.sonnenertrag.eu/solarbegriffe:f:flachkollektor> (Zugriff am 19.12.2013)

Der Wirkungsgrad dieses Systems ist besser und wird im nachfolgenden Diagramm 6 dargestellt. Hierfür werden nachstehende Werte angenommen: <sup>41</sup>

Tabelle 3: Werte zum Flachkollektor

Bezeichnung	Symbol	= Wert	Einheit
Gesamtwärmeübergangskoeffizient	$k_0$	= 3,00	W/m <sup>2</sup> ·K
Wärmeübergangskoeffizient	$k_1$	= 0,03	W/m <sup>2</sup> ·K
Konversionsfaktor	$\eta_0$	= 0,75	-

Die Werte aus der Tabelle 3 werden in Diagramm 6 verwendet.

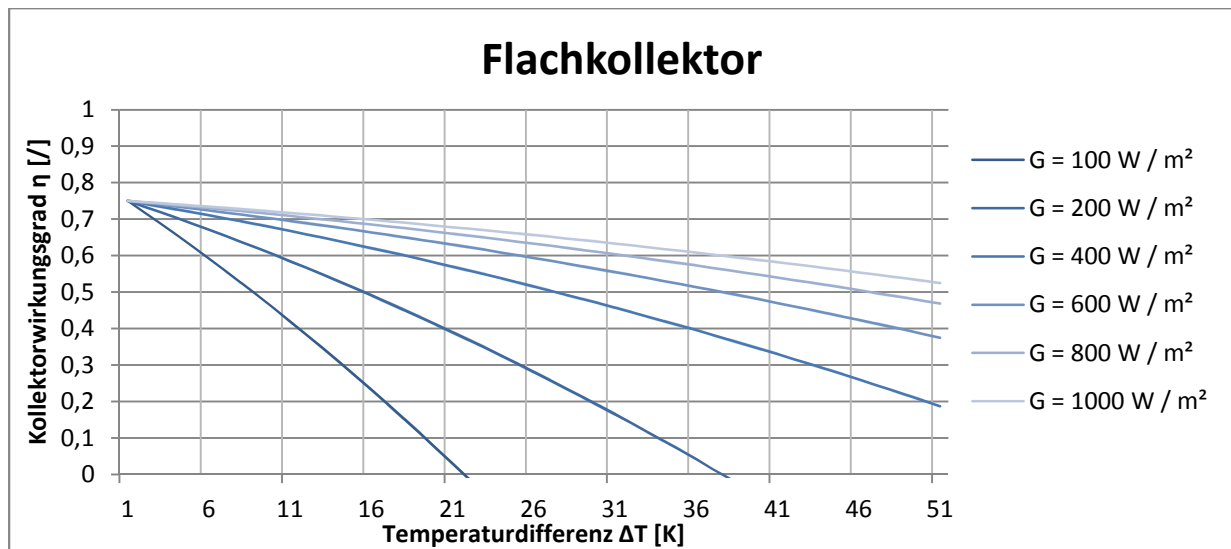


Diagramm 6: Wirkungsgrad Flachkollektor

In Diagramm 6 ist der Wirkungsgrad eines Flachkollektors veranschaulicht. <sup>42</sup> Der Flachkollektor erreicht noch bei Temperaturdifferenzen von 50 Kelvin annehmbare Wirkungsgrade.

Ein Vakuumkollektor erreicht bessere Wirkungsgrade als der Flachkollektor bei größeren Temperaturdifferenzen. Der Eisspeicher hat eine Betriebstemperatur von bis zu 18 Grad Celsius. <sup>43</sup> Die minimalste Umgebungstemperatur in Hamburg 2012 wurde am 06.02.2012 von minus 12,1 Grad Celsius erreicht. 2011 wurde nur eine minimale Temperatur von minus 4,8 Grad Celsius erreicht.

Tabelle 4: maximale Temperaturdifferenz von Lufttemperatur und Eisspeicher

Jahr	Minimale Umgebungstemperatur	Temperaturdifferenz bei maximaler Temperatur Eisspeicher (18°C)
-	°C	°C
2012	-12,1	30,1
2011	-4,8	22,8

<sup>41</sup> Vgl. Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 394

<sup>42</sup> Anlehnung an Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen 2012, S. 401

<sup>43</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Herr Schwarzfeld 01.12.2013

Im Durchschnitt ist in beiden Jahren eine Temperatur von ca. 9,4 Grad Celsius nachzuweisen. Dadurch ergibt sich eine durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen dem Eisspeicher und der Lufttemperatur von 5,4 Grad Celsius.

Tabelle 5: durchschnittliche Temperaturdifferenz von Lufttemperatur und Eisspeicher

Jahr	Durchschnittliche Umgebungstemperatur	Durchschnittliche Temperaturdifferenz zum Eisspeicher (ca. 4°C) <sup>44</sup>
-	°C	°C
2012	9,1	5,1
2011	9,6	5,6

Aus den Ergebnissen der Untersuchung der Temperaturdifferenz ergibt sich, dass im Durchschnitt ein Röhrenabsorber ausreicht, um den Eisspeicher zu regenerieren und ihm Wärme zuzuführen. Flachkollektoren und Vakuumkollektoren haben einen besseren Wirkungsgrad, doch sind sie für das Eisspeichersystem im Bereich des Wirkungsgrades überdimensioniert. In extremen Fällen wie bei maximaler Temperaturdifferenz kann nur ein sehr schlechter Wirkungsgrad erzielt werden. Doch muss berücksichtigt werden, dass diese Werte nur selten erreicht werden und es unwirtschaftlich wäre, aus diesem Grund einen Flachkollektor in das System zu integrieren.

In dieser Ausarbeitung wird folglich nur der Röhrenabsorber als Kollektor betrachtet. Aus den vorherigen Berechnungen und den Werten des Deutschen Wetterdienstes DWD bezüglich der Globalstrahlung des Jahres 2012 lässt sich die Leistung des Röhrenabsorbers berechnen. Diese Werte werden im folgenden Diagramm 7 veranschaulicht:

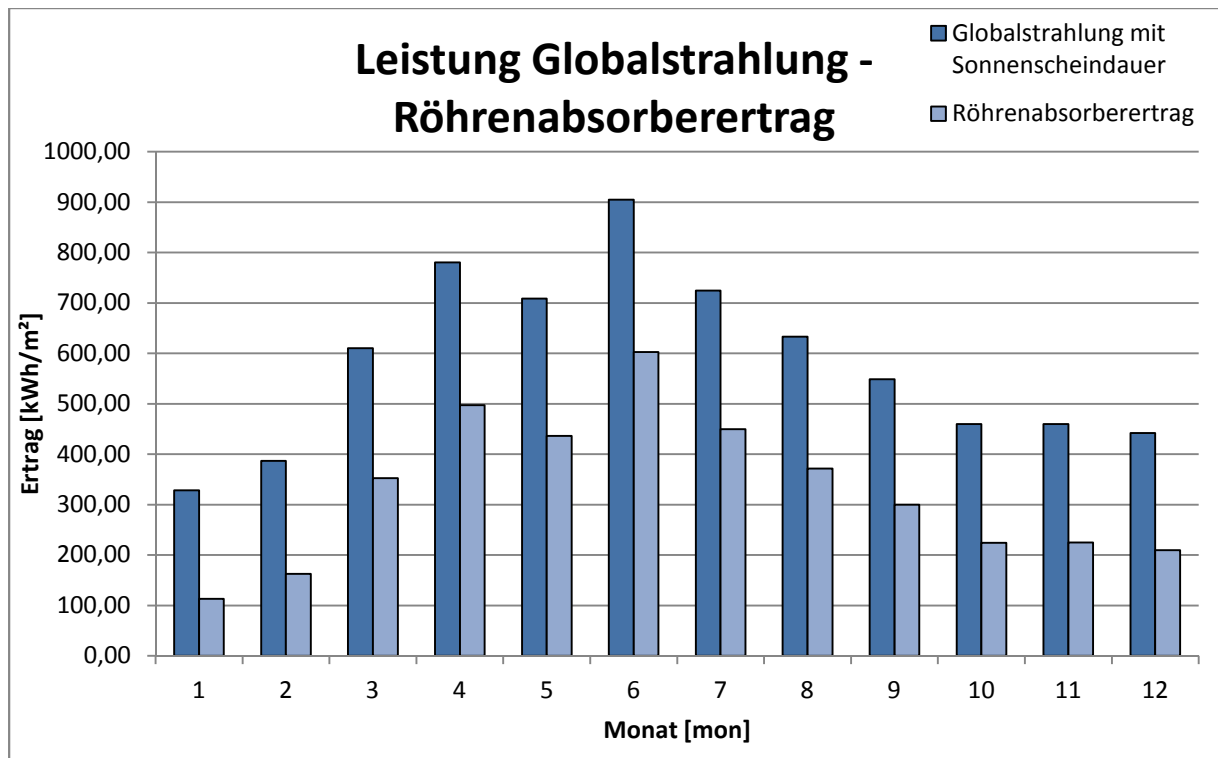


Diagramm 7: Leistung der Globalstrahlung im Vergleich zum Röhrenabsorberertrag

<sup>44</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouit 17.11.2013

Der Wirkungsgrad des Kollektors ist keineswegs konstant, sondern orientiert sich unter anderem an der Lufttemperatur und Globalstrahlung. Im Sommer ist wie zu erwarten eine höhere Globalstrahlung nachweisbar. Die Leistung des Röhrenabsorbers steigt ebenfalls im Sommer. Im folgenden Diagramm 8 wird der Wirkungsgrad des Röhrenabsorbers weiter untersucht.

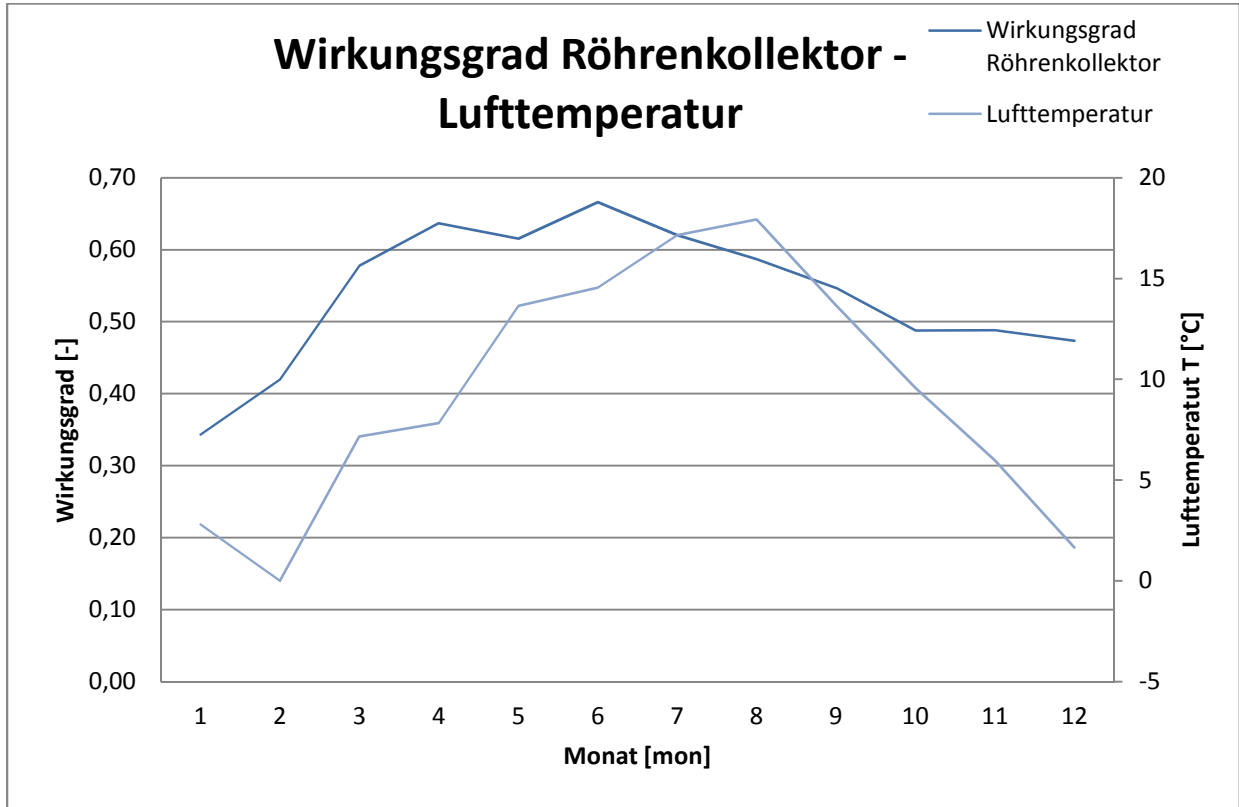


Diagramm 8: Wirkungsgrad des Röhrenkollektors im Vergleich zur Lufttemperatur

An den Werten der Lufttemperatur von 2012 lässt sich abbilden, inwieweit sich der Wirkungsgrad anpasst. Je höher die Umgebungstemperatur ist, desto größer ist der Ertrag des Röhrenkollektors. Im Juni erreicht der Röhrenkollektor einen Wirkungsgrad von im Durchschnitt von 0,68, dies entspricht 68 Prozent Wärmeleitung der Lufttemperatur. Da die Lufttemperatur von der Globalstrahlung abhängig ist, erreicht auch die Lufttemperatur im Sommer den höchsten Wert. Die Lufttemperatur spielt weiterhin eine wichtige Rolle für die Auslegung des Eisspeichersystems.

### 3.2.2. Umgebendes Erdreich

Die Wärmequelle ist die Sonne. Als Wärmesenke werden jedoch nicht nur die Luft und der Solarkollektor betrachtet, sondern auch das Erdreich. Die Sonne erwärmt dabei direkt den oberflächennahen Erdboden sowie die Luft. Die erwärmte Luft gibt über Wärmeleitung Wärme an das Erdreich ab. Die Wärme der Erde kann genutzt werden, um das Eisspeichersystem effektiver zu gestalten. Auf den Eisspeicher als Komponente des Systems wird genauer im nächsten Kapitel eingegangen. Aus der Analyse aus von vorigen Kapiteln ließ sich jedoch feststellen, dass jegliche Form von Wärmezufuhr genutzt wird. Das Erdreich wird für das Eisspeichersystem effektiv genutzt, indem der Eisspeicher in Erdreich vergraben wird. Das Eis im Eisspeicher kann durch die Erdwärme regeneriert werden.

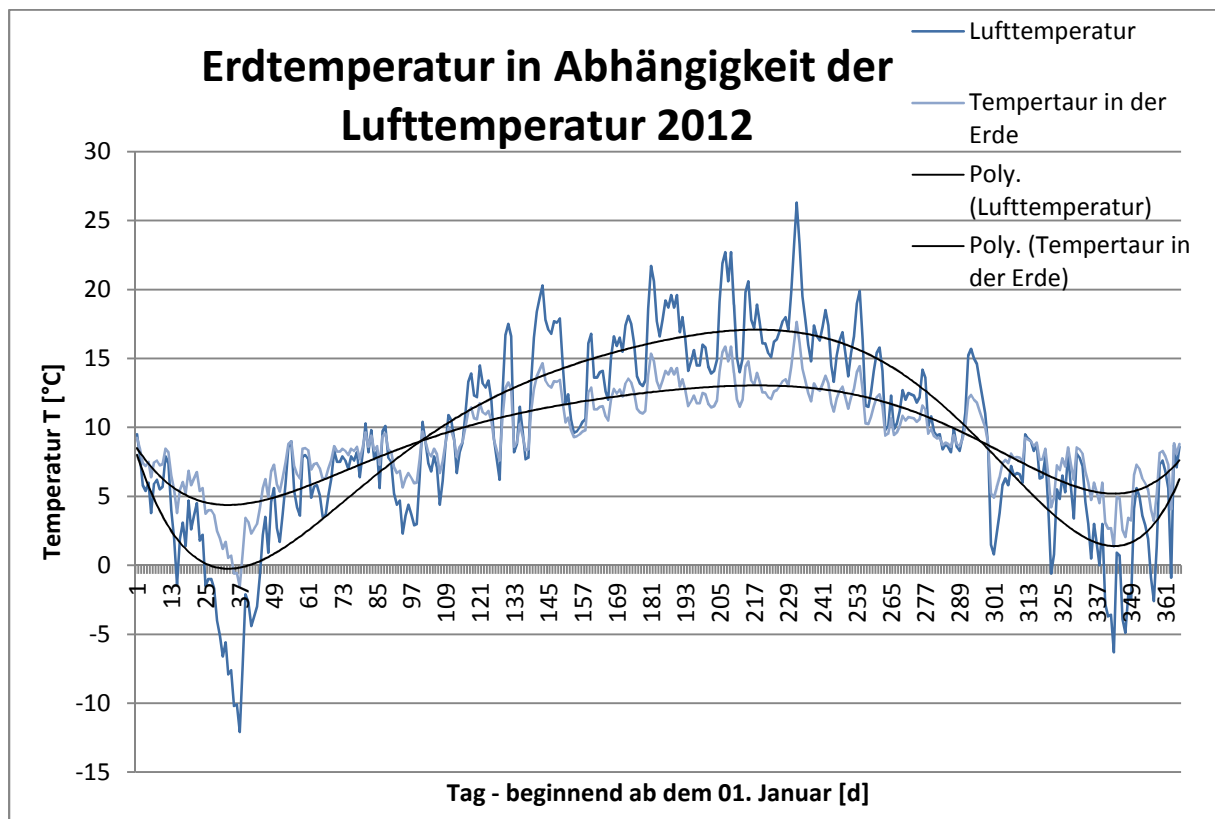


Diagramm 9: Erdtemperatur in Abhängigkeit der Lufttemperatur

Das Diagramm 9<sup>45</sup> veranschaulicht die Temperatur der Erde in der Abhängigkeit der Lufttemperatur. Die den Eisspeicher umgebende Erde hat über das Jahr gesehen eine Temperatur von etwa fünf Grad Celsius bis 12 Grad Celsius. Im Winter sichert das Erdreich den Eisspeicher und die Rohrleitungen vor Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Die Wärme wird nicht an die Umgebung abgegeben, sondern fließt Aufgrund der Temperaturunterschiede in den Eisspeicher. Die Oberkante des Eisspeichers ist in etwa in ein bis zwei Meter Tiefe vergraben. Je tiefer der Eisspeicher im Erdreich eingebracht wird, desto konstanter ist die Temperatur. Jedoch ist zu beachten, dass der Aufwand den Eisspeicher sehr tief zu vergraben oft zu groß ist, als der Nutzen der aus der Erdwärme generiert werden kann. Die Entscheidung, wie tief der Eisspeicher in der Erde eingebracht wird, liegt jedoch auch an der Größe des Eisspeichers und an den Gegebenheiten des Erdreiches.

<sup>45</sup> Deutscher Wetterdienst DWD 2013



### 3.3. Wärmespeicher

Der Wärmespeicher für das Eisspeichersystem ist der Eisspeicher. Dieser speichert Wärme saisonal. Die Wärme aus dem Sommer wird dabei in den Winter transportiert. Um diese Wärme zu nutzen, muss dieser Wert der gespeicherten Wärme genau bestimmt werden. Dieser Wert ist aus den vorherigen Rechnungen hervorgegangen und wird nun veranschaulicht.

Die Diagramme 10 bis 13 zeigen die Auswirkung der Überschussenergie in Bezug auf die Fläche der Solarthermieanlage und den Monatsbedarf der Leistung um ein Gebäude zu beheizen. Für die Auswertung wurde sich den Werten des Jahres 2012 bedient.<sup>46</sup> Dabei wurden entweder die Werte der Kollektorfläche oder des Gesamtverbrauchs variiert. Die Monatsverteilung des Gesamtverbrauchs wurde dabei über die Umgebungstemperatur in Bezug zur behaglichen Raumtemperatur von 20 Grad Celsius berechnet. An Tagen über 20 Grad Celsius wird somit keine Heizleistung aufgewendet. Sinkt die Umgebungstemperatur unter 20 Grad Celsius, muss der Raum beheizt werden. Ansonsten kann mit Hilfe des Eises im Eisspeicher das Gebäude gekühlt werden. Die Kühlung des Gebäudes steht bei dieser Bachelorarbeit im Hintergrund und wird weitestgehend als positives Nebenprodukt des Eisspeichersystems betrachtet. Trotz dessen wurden in der Berechnung in Kapitel vier die Kühlleistung berechnet und in Diagrammen veranschaulicht.

Der Gesamtverbrauch ist in den folgenden Säulendiagrammen in blau dargestellt. Dabei wird zwischen dem Gesamtverbrauch unterschieden, der durch die Solarthermieanlage gedeckt wird und welcher der nicht durch die Solarthermieanlage gedeckt wird. Eine schwarze Linie kennzeichnet den Gesamtverbrauch. Grau stellt die Überschussenergie der Solarthermieanlage dar.

Verglichen werden vier Diagramme.

Tabelle 6: Vergleich Kollektorfläche und Verbrauch in Bezug auf die Überschussenergie

Diagramm		10	11	12	13
Kollektorfläche	m <sup>2</sup>	6	10	6	10
Gesamtverbrauch	kWh/Jahr	3750	3750	2500	2500

Bei den ersten beiden Diagrammen 10 und 11 wird die Kollektorfläche variiert. Im nächsten Schritt wird in Diagramm 12 und 13 der Gesamtverbrauch minimiert. Folgende Tabelle 6 zeigt die Veränderung der Werte.

<sup>46</sup> Deutscher Wetterdienst DWD 2013

Das folgende Diagramm 10 stellt einen Wärmeverbrauch von 3750 Kilowattstunden im Jahr dar. Dabei wurde eine Kollektorfläche von sechs Quadratmetern verwendet.

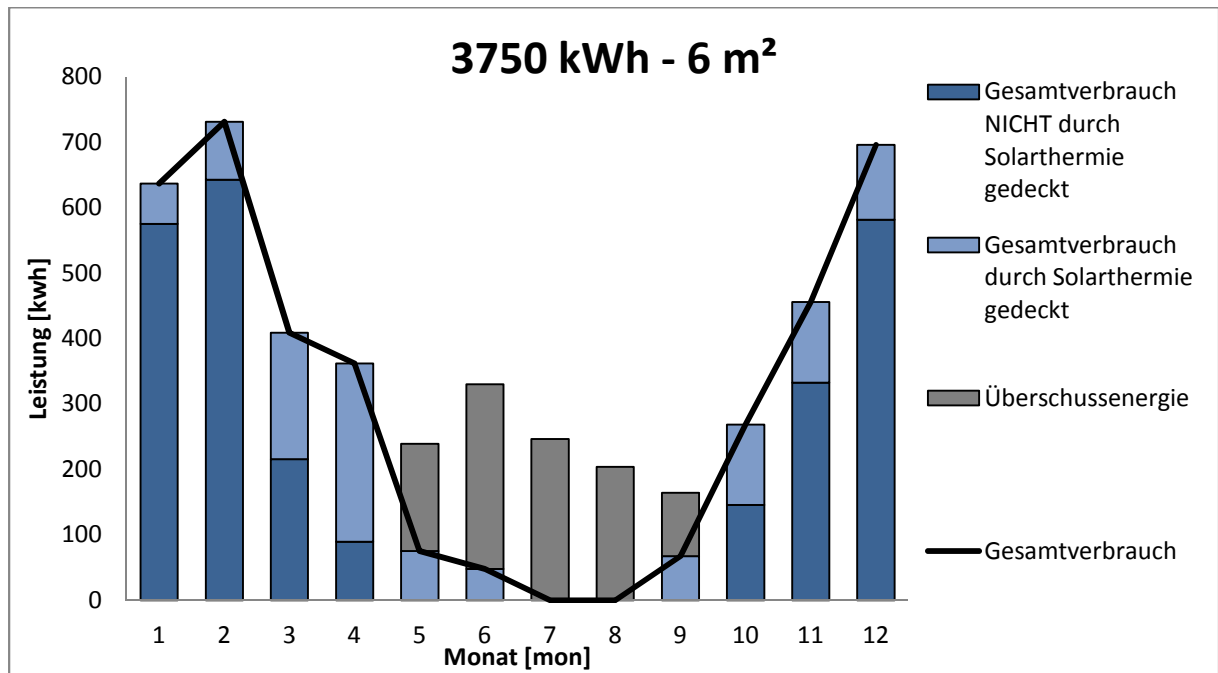


Diagramm 10: Wärmeverbrauch von 3750 kWh/Jahr und einer Kollektorfläche von 6m<sup>2</sup>

Bei folgendem Diagramm 11 wurde die eingesetzte Kollektorfläche auf zehn Quadratmeter erweitert.

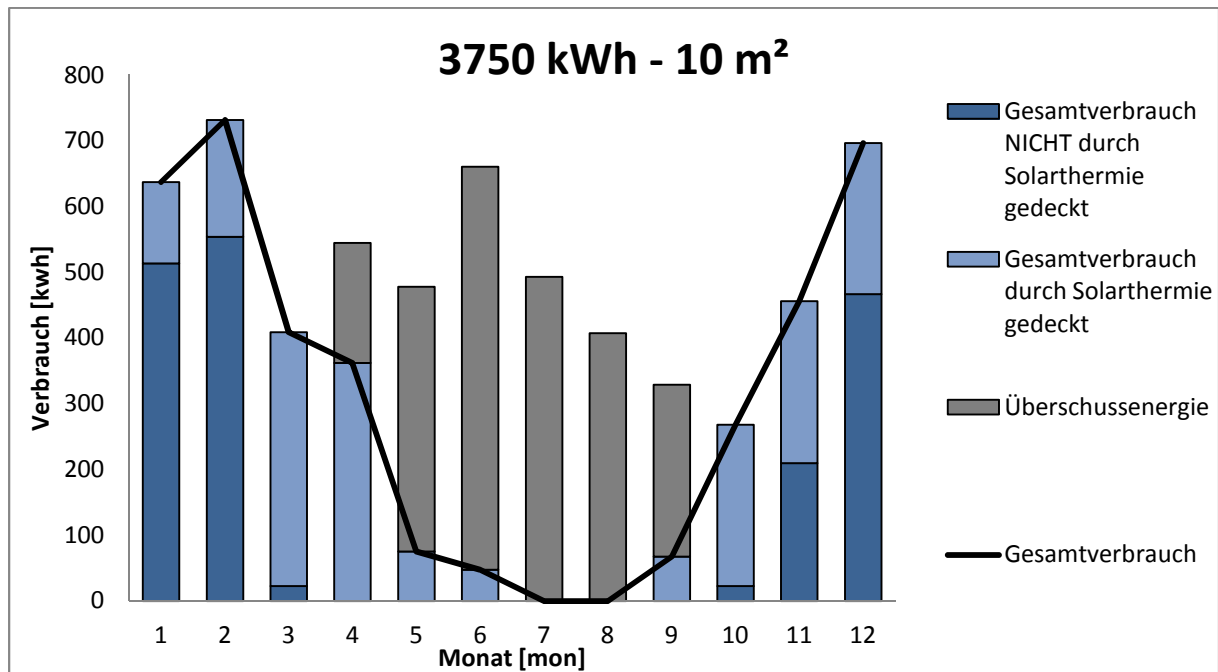


Diagramm 11: Wärmeverbrauch von 3750 kWh/Jahr und einer Kollektorfläche von 10m<sup>2</sup>

Der Gesamtverbrauch ist in beiden Diagrammen 10 und 11 gleich. Die prozentuale Verteilung der Deckung des Gesamtverbrauchs ist leicht verändert. Doch konnte die Überschussenergie in Diagramm 11 durch die größere Fläche des Solarkollektors stark erhöht werden.

Im folgenden Schritt werden die Werte einem niedrigeren Gesamtverbrauch von 2500 Kilowattstunden veranschaulicht. In Diagramm 12 wird dabei die kleinere Kollektorfläche von sechs Quadratmetern dargestellt:

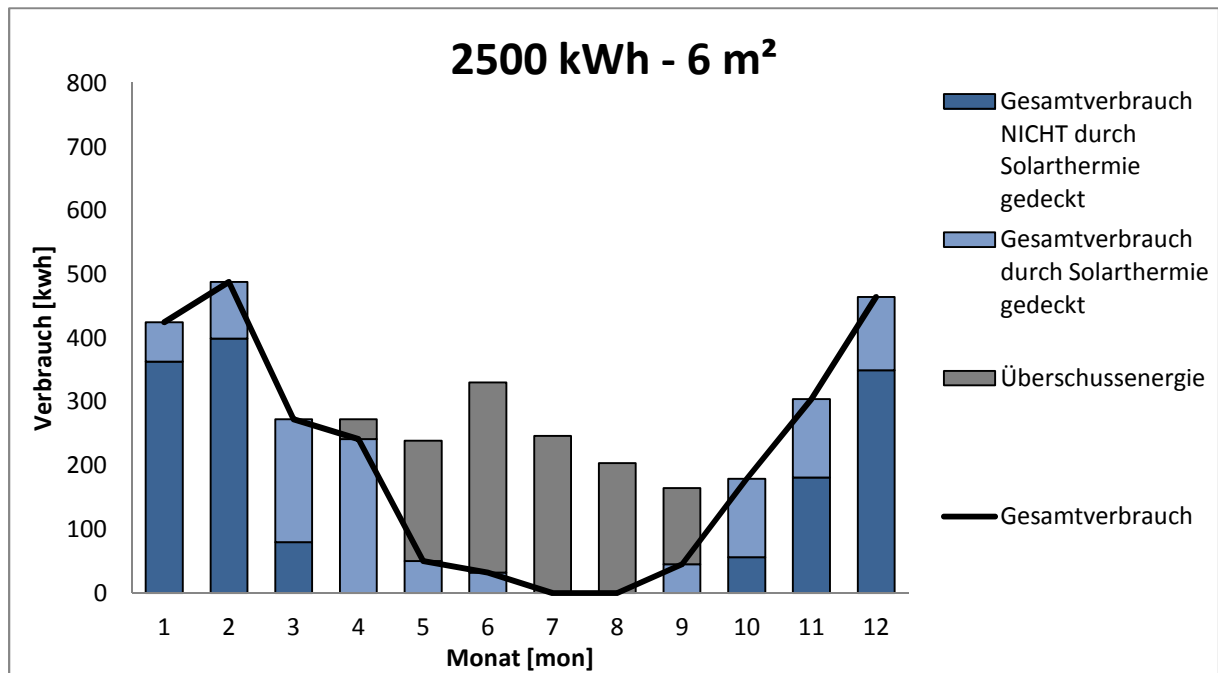


Diagramm 12: Wärmeverbrauch von 2500 kWh/Jahr und einer Kollektorfläche von 6m²

Im Vergleich zu Diagramm 10 ist die Menge der Überschussenergie identisch, jedoch ist in Diagramm 12 der Gesamtverbrauch minimiert. Wird der Wärmeverbrauch minimiert, hebt dies die Menge der Überschussenergie.

Im nächsten Schritt wird dargestellt, welche Auswirkungen ein minimierter Gesamtverbrauch und eine Fläche von zehn Quadratmetern an Kollektoren auf das System haben:

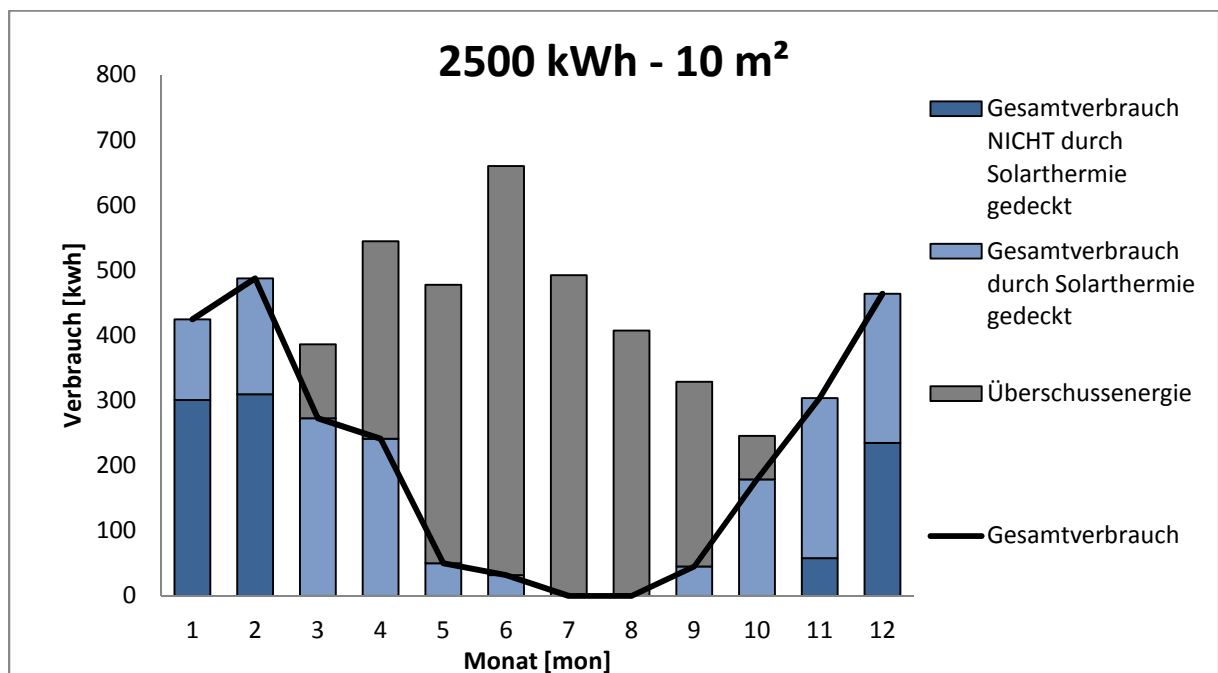


Diagramm 13: Wärmeverbrauch von 2500 kWh/Jahr und einer Kollektorfläche von 10m²

Die Menge der Überschussenergie ist mit der Menge aus dem Diagramm 11 identisch. Der Gesamtverbrauch ist der gleiche wie aus dem Diagramm 12.

Es kann abschließend festgehalten werden, dass die Überschussenergie von der Größe der Solarthermieanlage abhängt. Je größer die Solarthermieanlage ist, desto stärker kann der Gesamtverbrauch von der Solarthermieanlage gedeckt werden.

Das Ziel ist es jedoch, die Überschussenergie in den Winter zu transportieren. Die Flächen des Gesamtverbrauches, welche nicht durch die Solarthermieanlage gedeckt werden (dunkel blau), werden durch den Eisspeicher gedeckt. Hierbei ist es wichtig zu beachten, dass die Dimensionierung der Solarthermieanlage zum Eisspeicher sinnvoll gestaltet wird. Ein Überschuss an Energie wird dabei minimiert. Jedoch muss die Leistung des Eisspeichers in jedem Fall ausreichen, um den Bedarf an Heizleistung zu decken.

Um die Wärmeenergie in den Winter zu transportieren, wird Wasser als Medium eingesetzt. Wasser ist ein ausgezeichneter Wärmeträger, da die Wärmekapazität bei Raumtemperatur von 20 Grad Celsius etwa bei 4,19 Kilojoule pro Kilogramm und Kelvin liegt. Luft hat im Gegensatz zu Wasser bei der gleichen Bedingung von 20 Grad Celsius eine Wärmekapazität von 1,005<sup>47</sup> Kilojoule pro Kilogramm und Kelvin.<sup>48</sup>

---

<sup>47</sup> isobare Zustandsänderung, bei einer isochoren Zustandsänderung liegt der Wert bei 0,718 Kilojoule pro Kilogramm und Kelvin

<sup>48</sup> Tabellenbuch: Sanitär, Heizung, Klima / Lüftung 2011, S. 100

### 3.3.1. Sensible und latente Wärme

Für die Berechnung der Abgabe und Aufnahme von Wärmeenergie im Eisspeicher ist zwischen einem sensiblen Wärmespeicher und einem Latentwärmespeicher zu unterscheiden. Der sensible Wärmespeicher von Wasser arbeitet im Temperaturbereich von null Grad Celsius bis 100 Grad Celsius. Das Wasser ist im flüssigen Zustand und ändert folglich seinen Aggregatzustand nicht. Es wird „fühlbare“ Wärme frei. Dies bedeutet, dass bei Wärmezufuhr einem Temperaturanstieg des Mediums stattfindet. Bei Wärmeabfuhr sinkt im sensiblen Temperaturbereich die Temperatur.

Der Latentwärmespeicher verändert seinen Aggregatzustand. Beim Phasenwechsel findet keine Temperaturänderung statt. Die Temperatur des Mediums bleibt also bei konstanter Wärmezufuhr gleich, da die Energie für den Phasenwechsel verwendet wird.<sup>49</sup>

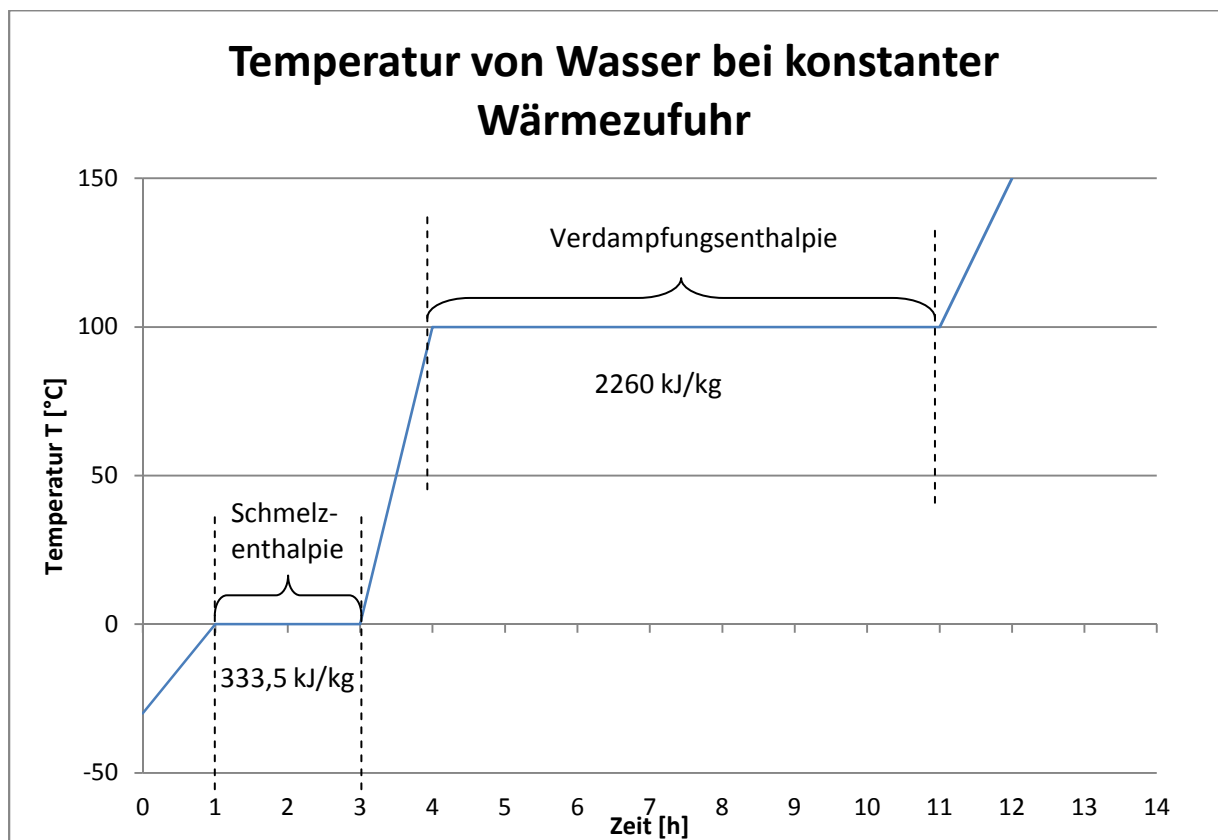


Diagramm 14: Temperatur von Wasser bei konstanter Wärmezufuhr

Das Diagramm 14<sup>50</sup> veranschaulicht den zeitlichen Verlauf von einem Kilogramm Wasser. Zu Beginn ist das Wasser bei minus 30 Grad Celsius und wird mit einer konstanten Wärmezufuhr von 50 Watt erwärmt. Im Bereich von einer Stunde bis drei Stunden bleibt die Temperatur konstant. In diesem Gebiet findet der Phasenwechsel von Eis zu flüssigem Wasser statt. Dabei wird Schmelzenthalpie frei. Die Enthalpie des Wassers erhöht sich bei konstanter Wärmezufuhr im Gegensatz zu der Temperatur stetig.

<sup>49</sup> Vgl. Leitfaden für Lüftungs- und Klimaanlagen 2009, S. 25

<sup>50</sup> In Anlehnung an Planungshandbuch Solarthermie 2008, S. 6

Ab 100 Grad Celsius beginnt das Wasser zu verdampfen. Dabei wird Verdampfungsenthalpie frei. Sobald sich das Fluid vollkommen in Dampf verwandelt hat, beginnt die Temperatur wieder zu steigen. Wird der Dampf abgekühlt, so verläuft der Prozess wieder rückwärts. Beim Eisspeichersystem ist der Bereich um die null Grad Celsius interessant. Dabei wird die frei werdende Energie aus dem Phasenwechsel genutzt werden.

Sobald das Wasser gefriert, wird in diesem Fall nicht Schmelzenthalpie frei, sondern Erstarrungsenthalpie. Dabei handelt es sich um denselben Wert, wobei nur ein umgekehrtes Vorzeichen verwendet werden muss.

$$|\Delta h_{sch}| = |\Delta h_E| \quad (18)$$

$$|\Delta h_V| = |\Delta h_{kon}| \quad (19)$$

Tabelle 7: Umwandlungsenthalpie

Phasenumwandlung	Frei werdende Energie	Symbol	Wert <sup>51</sup>
-	-	-	kJ/kg
Eis - Wasser	Spez. Schmelzenthalpie	$\Delta h_{sch}$	333,5
Wasser - Dampf	Spez. Verdampfungsenthalpie	$\Delta h_V$	2260
Dampf - Wasser	Spez. Kondensationsenthalpie	$\Delta h_{kon}$	- 2260
Wasser - Eis	Spez. Erstarrungsenthalpie	$\Delta h_E$	- 333,5

Die abzugebende und aufzunehmende Wärmemenge des Eisspeichers setzt sich also aus der sensiblen und latenten Wärme zusammen: <sup>52</sup>

$$Q_{ES} = Q_S + Q_L \quad (20)$$

Das Symbol der Gleichung ( 20 ) haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$Q_{ES}$	: Wärme Eisspeicher	J
$Q_S$	: Sensible Wärme	J
$Q_L$	: Latente Wärme	J

Die latente Wärme ist das Produkt aus der Masse des Speichermediums und der Umwandlungsenthalpie. Wird Eis im Phasenwechsel erwärmt, wird bei dem Prozess Schmelzenthalpie frei. Verdampft das Wasser, wird die Verdampfungsenthalpie frei. Da das Eisspeichersystem nur im Temperaturbereich bis etwa 20 Grad Celsius arbeitet, wird in folgender Berechnung die Verdampfungswärme nicht berücksichtigt. Dieser Term wird aus der Gleichung entfernt. <sup>53</sup>

<sup>51</sup> Vgl. Thermodynamik für Maschinenbauer 2005 ,S. 217, Die Angaben verschiedener Autoren differieren bis zu einigen Prozent

<sup>52</sup> Vgl. Thermodynamik rund um das Haus 2013, S.69

<sup>53</sup> Vgl. Thermodynamik rund um das Haus 2013, S.69

Für latente Wärmezufuhr gilt also:

$$Q_{LZU} = m_F \cdot \Delta h_{Sch} + \cancel{m_{FL} \cdot \Delta h_V} = m_F \cdot \Delta h_{Sch} \quad (21)$$

Bei latenter Wärmeabfuhr gilt Gleichung ( 22 ):

$$Q_{LAB} = m_{FL} \cdot \Delta h_E + \cancel{m_D \cdot \Delta h_{Kon}} = m_{FL} \cdot \Delta h_E \quad (22)$$

Die sensible Wärme wird mit den folgenden Gleichungen berechnet.<sup>54</sup>

$$Q_{SF} = m_F \cdot c_{pF} \cdot \Delta T_F \quad (23)$$

$$Q_{SFL} = m_{FL} \cdot c_{pFL} \cdot \Delta T_{FL} \quad (24)$$

$$Q_{SD} = m_D \cdot c_{pD} \cdot \Delta T_D \quad (25)$$

Die Symbole der Gleichungen ( 21 ) bis ( 25 ) haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$m$	: Masse	kg
$c_{pF}$	: Spezifische Wärmekapazität des Eises	J/kg·K
$c_{pFL}$	: Spezifische Wärmekapazität des flüssigen Wassers	J/kg·K
$c_{pD}$	: Spezifische Wärmekapazität des Dampfes	J/kg·K
$\Delta T_F$	: Temperaturdifferenz des Eises	K
$\Delta T_{FL}$	: Temperaturdifferenz des flüssigen Wassers	K
$\Delta T_{FLD}$	: Temperaturdifferenz des Dampfes	K

Da das Eisspeichersystem keinen Phasenwechsel zu Dampf zulässt, kann dieser Term der sensiblen Wärme vernachlässigt werden. Für Wärmezufuhr in den Eisspeicher kann folgende Gleichung ( 26 ) zusammengefasst werden:

$$Q_{ESZU} = m_F \cdot \Delta h_{Sch} + m_F \cdot c_{pF} \cdot \Delta T_F + m_{FL} \cdot c_{pFL} \cdot \Delta T_{FL} \quad (26)$$

Für die Wärmeabfuhr wird folgender Gleichung ( 27 ) eingebunden:

$$Q_{ESAB} = m_{FL} \cdot \Delta h_E + m_F \cdot c_{pF} \cdot \Delta T_F + m_{FL} \cdot c_{pFL} \cdot \Delta T_{FL} \quad (27)$$

Mit diesen Erkenntnissen lässt sich nun die Wärme bestimmen, welche dem Eisspeicher zugeführt und abgeführt werden kann. Im folgenden Schritt wird das Wärmetauschersystem, mit dem die Wärme des Eisspeichers beeinflusst wird, berechnet.

<sup>54</sup> Vgl. Thermodynamik rund um das Haus 2013, S.17

### 3.3.2. Wärmetauschersystem

Das Wärmetauschersystem besteht aus einem Regenerationswärmetauscher und einem Entzugswärmetauscher, welcher über einen Verteiler auf mehrere Rohrschlangen aufgeteilt wird. Der Regenerationswärmetauscher erwärmt über die Solarthermieanlage das Medium im Eisspeicher. So wird ebenfalls verhindert, dass das Eis sich bis zur Zisternenwand ausdehnen und Druck auf diesen ausüben kann. Über den Entzugswärmetauscher wird dem Medium Wärme entzogen, um das Gebäude zu beheizen. Im Sommer wird der Prozess umgekehrt, sodass über den Entzugswärmetauscher Wärme in den Eisspeicher abgegeben wird. Dabei wird das Gebäude gekühlt und das Eis im Eisspeicher regeneriert.<sup>55</sup>

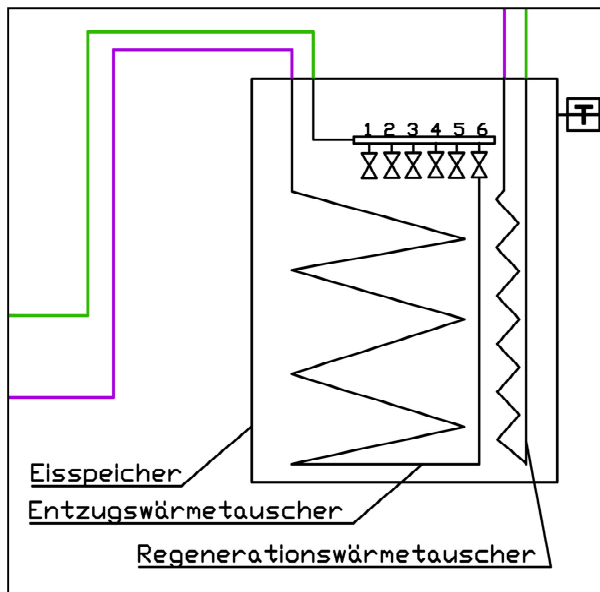


Abbildung 16: Anlagenschema – Wärmetauschersystem

Abbildung 15: Wärmetauschersystem

Die Wärmetauscher bestehen aus einem flexiblen Polyethylen PE Rohr. Diese Wärmetauscherrohre sind in der Abbildung 15 als Schema dargestellt. In Abbildung 16<sup>56</sup> lassen sich das Material und die Anordnung der Wärmetauscherrohre betrachten. Diese Rohre aus PE besitzen auch bei niedrigen Temperaturen eine hohe Biegsamkeit und Elastizität. Des Weiteren sind die PE-Rohre beständig gegen Sole und haben ein geringes Eigengewicht.<sup>57</sup> Auch metallische Werkstoffe für einen Wärmetauscher sind beständig gegen Sole. Doch führt das Eigengewicht zu einer aufwendigen Befestigungsstruktur. Metalle haben einen besseren Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten als Kunststoffe, doch reicht der Wärmeleitkoeffizient des PE-Rohres für die Anforderungen des Wärmetauschers im Eisspeicher aus.<sup>58</sup> Es handelt sich zudem bei einem PE-Rohr um ein preisgünstigstes Material, welches alle Anforderungen für die Funktion des Eisspeichers erfüllt.

<sup>55</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrout 17.11.2013

<sup>56</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrout 17.11.2013

<sup>57</sup> Vgl. Thermische Solarenergie – Grundlagen 2012, S. 393

<sup>58</sup> Vgl. Tabellenbuch: Sanitär, Heizung, Klima / Lüftung 2011, S. 99



Der Regenerationswärmetauscher wird innerhalb des Eisspeichers an der Außenwand ausgelegt. Die Wärmeleitung durch das Rohr  $\dot{Q}_{REG}$  mit dem Innenradius  $R_1$  und dem Außenradius  $R_2$  und der Länge  $L_{REG}$  wird mit folgender Gleichung bestimmt:

$$\dot{Q}_{REG} = \lambda_{PE} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot L_{REG}}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \cdot (T_{SK} - T_{ES}) \quad (28)$$

Die Symbole der Gleichung (28)<sup>59</sup> haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\dot{Q}_{REG}$	: Wärmestrom des Regenerationswärmetauschers	W
$\lambda_{PE}$	: Wärmeleitfähigkeitskoeffizient des PE-Rohres	W/m·K
$L_{REG}$	: Länge des Regenerationswärmetauschers	m
$R_1$	: Innenradius des Rohres	m
$R_2$	: Außenradius des Rohrs	m

Für die Berechnungen wurden folgende Werte festgelegt:

Tabelle 8: Werte für die Berechnung des Wärmetauschersystems

Bezeichnung	Symbol = Wert	Einheit
Wärmeleitfähigkeitskoeffizient	$\lambda_{PE} = 0,400$ <sup>60</sup>	W/m·K
Innenradius	$R_1 = 0,030$	m
Außenradius	$R_2 = 0,035$	m

Die Länge des Regenerationswärmetauschers wird durch die Höhe und den Umfang des Eisspeichers festgelegt. Es wird dabei angenommen, dass die Rohre des Wärmetauschers im Abstand von 0,2 Metern an der Außenwand verlegt werden.<sup>61</sup>

<sup>59</sup> Vgl. Tabellenbuch: Sanitär, Heizung, Klima / Lüftung 2011, S. 34

<sup>60</sup> Vgl. Tabellenbuch: Sanitär, Heizung, Klima / Lüftung 2011, S. 99

<sup>61</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouit 17.11.2013

Für die Berechnung des Wärmeübergangs des Entzugswärmetauschers kommt noch eine weitere Komponente hinzu. Bei Wärmeentzug aus dem Eisspeicher bildet sich eine Eisschicht um den Wärmetauscher, was zur weiteren Isolation des Rohres führt.<sup>62</sup>

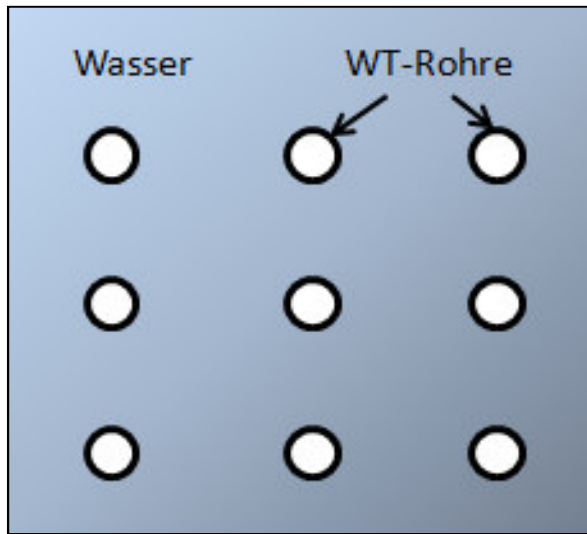


Abbildung 18: Eisspeicher vor dem Erstarrungsvorgang

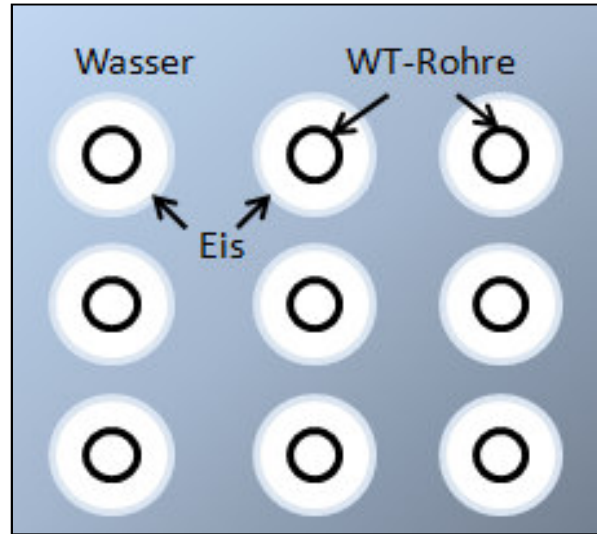


Abbildung 17: Eisspeicher beim Erstarrungsvorgang

Die Wärmeleitung des Entzugswärmetauschers vor dem Erstarrungsvorgang wird auf gleiche Weise wie der Regenerationswärmetauscher berechnet. Jedoch kommt für die Berechnung eine Komponente hinzu: Das PE-Rohr umgebende Eis.

Für den Erstarrungsvorgang wird folgende Gleichung ( 29 ) verwendet:<sup>63</sup>

$$\dot{Q}_{ENT} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L_{ENT}}{\frac{1}{\lambda_{PE}} \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) + \frac{1}{\lambda_F} \cdot \ln\left(\frac{R_F}{R_2}\right)} \cdot (T_{ES} - T_{WP}) \quad ( 29 )$$

Die Symbole der Gleichung ( 29 ) haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\dot{Q}_{ENT}$	: Wärmestrom des Entzugswärmetauschers	W
$\lambda_F$	: Wärmeleitfähigkeitskoeffizient des Eises	W/m·K
$L_{ENT}$	: Länge des Entzugswärmetauschers	m
$R_F$	: Radius des Eises	m
$T_{WP}$	: Temperatur der Wärmepumpe	K

<sup>62</sup> In Anlehnung an [http://www.tzs.uni-stuttgart.de/abteilungen/wktechnik/SolKaelte/publikationen/DKV%202008/Bericht\\_DKV\\_08\\_Koller.pdf](http://www.tzs.uni-stuttgart.de/abteilungen/wktechnik/SolKaelte/publikationen/DKV%202008/Bericht_DKV_08_Koller.pdf) [zugriff am 21.01.2014]

<sup>63</sup> Vgl. Tabellenbuch: Sanitär, Heizung, Klima / Lüftung 2011, S. 34

In folgender Abbildung 19 verdeutlicht, welche Radien und Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten bei der Berechnung verwendet werden.

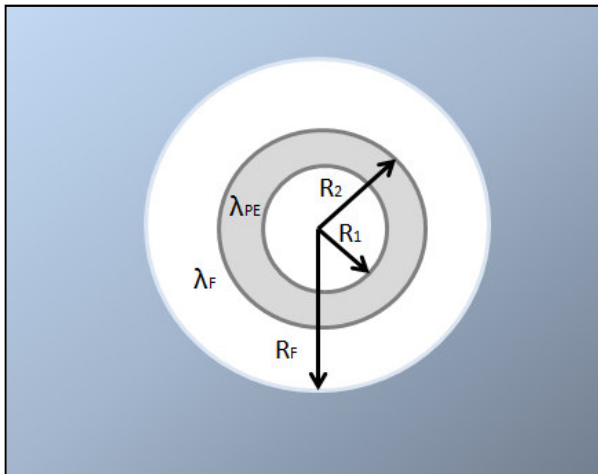


Abbildung 19: Erstarrungsvorgang – Radien und Wärmeleitfähigkeitskoeffizient

Der Innen- und Außenradius des PE-Rohres sind konstante Werte, wodurch die Berechnung des Regenerationswärmetauschers weniger komplex ist, als die Berechnung für den Entzugswärmetauscher. Hierfür muss der Radius des Eises berechnet werden. Der Radius ist jedoch von der Temperatur im Eisspeicher und dem Wärmestrom der Sole innerhalb des Entzugswärmetauschers abhängig. Für die Berechnung wurden Annahmen zum Erstarrungszustand getroffen und auf diese Weise der Radius des Eises bestimmt.<sup>64</sup>

Tabelle 9: Prozent der Masse des Eises im Eisspeicher<sup>65</sup>

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Eis im Eisspeicher [%]	30	50	90	100	90	50	30	5	3	0	3	5

Ende April ist die Heizphase des Gebäudes beendet. Dem Wasser wurde bis zu diesem Zeitpunkt die Wärme entzogen, sodass das Wasser zu Eis gefroren ist. Nach der Heizphase beginnt die Regeneration des Eises. Dem Gebäude kann nun Wärme entzogen werden, um das Eis im Eisspeicher aufzutauen. Wenn das Gebäude keinen Bedarf an Kühlung hat, wird das Eis durch den Regenerationswärmetauscher restlos aufgetaut. Dieser Prozess ist im Oktober beendet, sodass dem Wasser wieder zu Beginn der Heizperiode Wärme entzogen werden kann.

<sup>64</sup> In Anlehnung an [http://www.tzs.uni-stuttgart.de/abteilungen/wktechnik/SolKaelte/publikationen/DKV%202008/Bericht\\_DKV\\_08\\_Koller.pdf](http://www.tzs.uni-stuttgart.de/abteilungen/wktechnik/SolKaelte/publikationen/DKV%202008/Bericht_DKV_08_Koller.pdf) (Zugriff am 21.01.2014)

<sup>65</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouf 17.11.2013

### 3.3.3. Wärmeverluste und Wärmegewinne

Ein wichtiger Aspekt in Auslegung eines Eisspeichers ist die Betrachtung der Wärmeverluste beziehungsweise der Wärmegewinne des Eisspeichers durch das umgebende Erdreich. In Kapitel 3.2.2 wurden die Bodentemperaturen analysiert und grafisch dargestellt. Die Temperaturen des Erdreiches sind dabei nur wenige Tage im Jahr unter dem Gefrierpunkt. Durch diesen Effekt können sogar Wärmegewinne im Eisspeicher erzielt werden. Aus diesem Grund ist der Eisspeicher nicht isoliert. Der Wert des Wärmeaustausches zwischen Erdreich und Eisspeicher wird mit folgender Gleichung berechnet: <sup>66</sup>

$$\dot{Q}_{ERD-ES} = U \cdot A_{ES} \cdot (T_{ES} - T_{ERD}) \quad (30)$$

Die Symbole der Gleichung ( 30 ) haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\dot{Q}_{ERD-ES}$	: Wärmestrom vom Erdreich zum Eisspeicher	W
$U$	: Wärmedurchgangskoeffizient	W/m <sup>2</sup> ·K

Der Wärmedurchgangskoeffizient wird mittels folgender Gleichung berechnet: <sup>67</sup>

$$U = \frac{\lambda}{s} \quad (31)$$

Die Symbole der Gleichung ( 31 ) haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\lambda$	: Wärmeleitfähigkeitskoeffizient	W/m·K
$s$	: Dicke der Wand	m

Um die Wärmeleitfähigkeit der Zisterne festzustellen, muss zunächst bestimmt werden, um welches Material es sich bei der Außenwand des Eisspeichers handelt. Wichtig ist es ein Material zu verwenden, welches wasserundurchlässig ist. Bei der Umsetzung eines Eisspeichers wird Beton mit hohem Wassereindringwiderstand verwendet. <sup>68</sup> Für den Beton wird eine Wärmeleitfähigkeit von 2,1 Watt pro Meter und Kelvin angenommen. <sup>69</sup> Die Eisspeicherwand wird mit 0,2 Meter Dicke festgelegt.

Eine sinnvolle Betriebstemperatur des Eisspeichers ist von 18 Grad Celsius zu Beginn und bis minus fünf Grad Celsius am Ende der Heizperiode. Bei der Wassertemperatur von 18 Grad Celsius kann der Flüssigkeit eine ausreichende Wärmemenge entzogen werden und bei minus fünf Grad Celsius am Ende der Heizperiode steht genug Eis zur Verfügung, um im Sommer das Gebäude zu kühlen. <sup>70</sup>

<sup>66</sup> Vgl. Tabellenbuch: Sanitär, Heizung, Klima / Lüftung 2011, S. 34

<sup>67</sup> Vgl. Tabellenbuch: Sanitär, Heizung, Klima / Lüftung 2011, S. 34

<sup>68</sup> In Anlehnung an das Telefonat, Firma Mall Umweltsysteme, Weber, Volker, 07.01.2014, 09:00Uhr

<sup>69</sup> Vgl. Tabellenbuch: Sanitär, Heizung, Klima / Lüftung 2011, S. 99

<sup>70</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouf 17.11.2013

### 3.4. Anlagenregelung auf der Primärseite

Die Anlagenregelung wird durch die Temperaturen der Umgebung und der im Eisspeicher beeinflusst. Die Temperaturen werden gemessen und miteinander verglichen. Je nach Temperaturzustand regelt der Regler die gewünschte Anlagenfunktion.  
71

Die Abbildung 20<sup>72</sup> zeigt die Zusammenhänge des Eisspeichersystems und der Anlagenregelung. Die Regelung beeinflusst die Drehzahl der Pumpe sowie die Einstellung des Dreiwegeventils. Im folgenden Abschnitt wird genauer auf die Ausführung eingegangen.

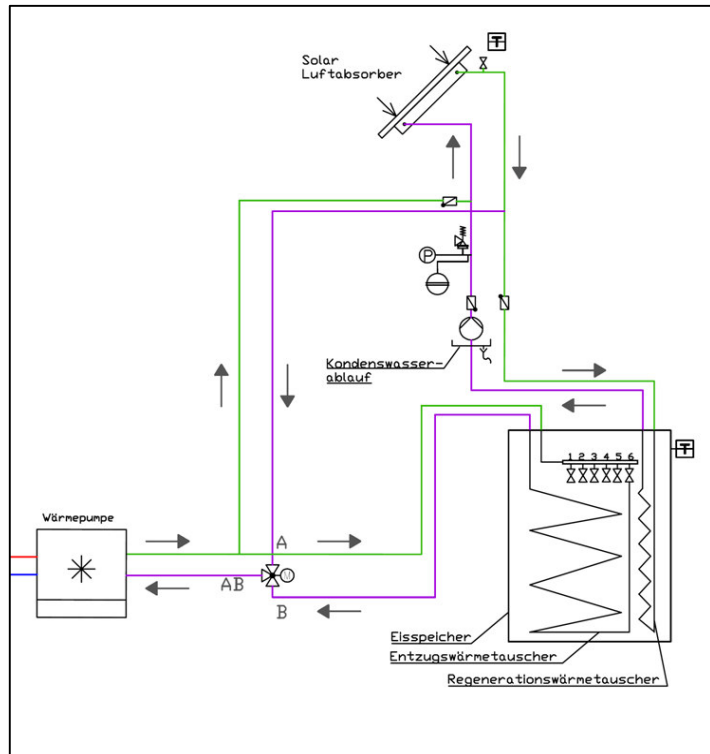


Abbildung 20: Anlagenregelung

#### 3.4.1. Dreiwegeventil

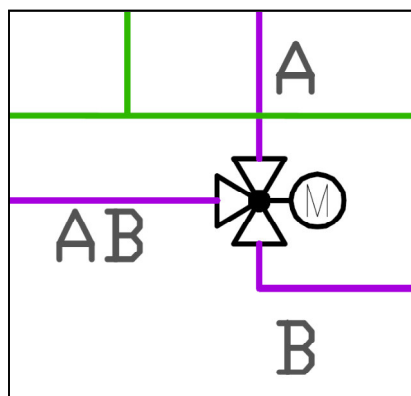


Abbildung 21: Dreiwegeventil

Das Dreiwegeventil mischt den Vorlauf der Sole aus dem Luftabsorber A und dem Eisspeicher B. Zielführend ist dabei eine nahezu konstante Vorlauftemperatur AB zu der Wärmepumpe zu gewährleisten. Dadurch kann die Wärmepumpe im stationären Zustand arbeiten und den Energieverbrauch senken. Um eine Vorlauftemperatur in den Sekundärkreis von 35 Grad Celsius sicherzustellen, beträgt die Eintrittstemperatur in die Wärmepumpe etwa null Grad Celsius.<sup>73</sup>

<sup>71</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrout 17.11.2013

<sup>72</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrout 17.11.2013

<sup>73</sup> Vgl. Planungshandbuch Wärmepumpe 2011, S. 21

### 3.4.2. Solarpumpe im Kollektorkreis

Die Leistung der Pumpe zwischen dem Eisspeicher und der Solarthermieanlage ist abhängig von der Umgebungstemperatur und wird vom Regler geregelt. Die in Kapitel 3.2.1 berechnete Nutzwärme des Röhrenabsorbers  $\dot{Q}_N$  muss von dem Kollektor in den Eisspeicher abtransportiert werden. Über die Drehzahl der Pumpe wird die Größe des Volumenstroms der Sole  $\dot{V}_{Sole}$  geregelt.<sup>74</sup> Ist die Globalstrahlung besonders stark, wird die Umgebungstemperatur erhöht und die Temperatur der Sole im Röhrenabsorber erwärmt. Die gewonnene Wärme der Sole muss mit einem hohen Volumenstrom abtransportiert werden. Ist dagegen die Umgebungstemperatur niedrig, so muss die Sole länger im Kollektor verweilen, um die Zieltemperatur zu erreichen und der Volumenstrom stellt sich klein ein. Der Volumenstrom wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$\dot{Q}_N = c_{pSole} \cdot \dot{m}_{Sole} \cdot \Delta T_{Sole} = c_{pSole} \cdot \dot{V}_{Sole} \cdot \rho_{Sole} \cdot \Delta T_{Sole} \quad (32)$$

$$\dot{V}_{Sole} = \frac{\dot{Q}_N}{c_{pSole} \cdot \rho_{Sole} \cdot \Delta T_{Sole}} \quad (33)$$

Die Symbole der Gleichung (33)<sup>75</sup> haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\dot{m}_{Sole}$	: Massenstrom der Sole	kg/s
$\rho_{Sole}$	: Dichte der Sole	kg/m <sup>3</sup>
$\dot{V}_{Sole}$	: Volumenstrom der Sole	m <sup>3</sup> /s

Das folgende Diagramm 15 veranschaulicht den Volumenstrom der verwendeten Anlage im Jahr 2012 pro Quadratmeter installierter Kollektorfläche:

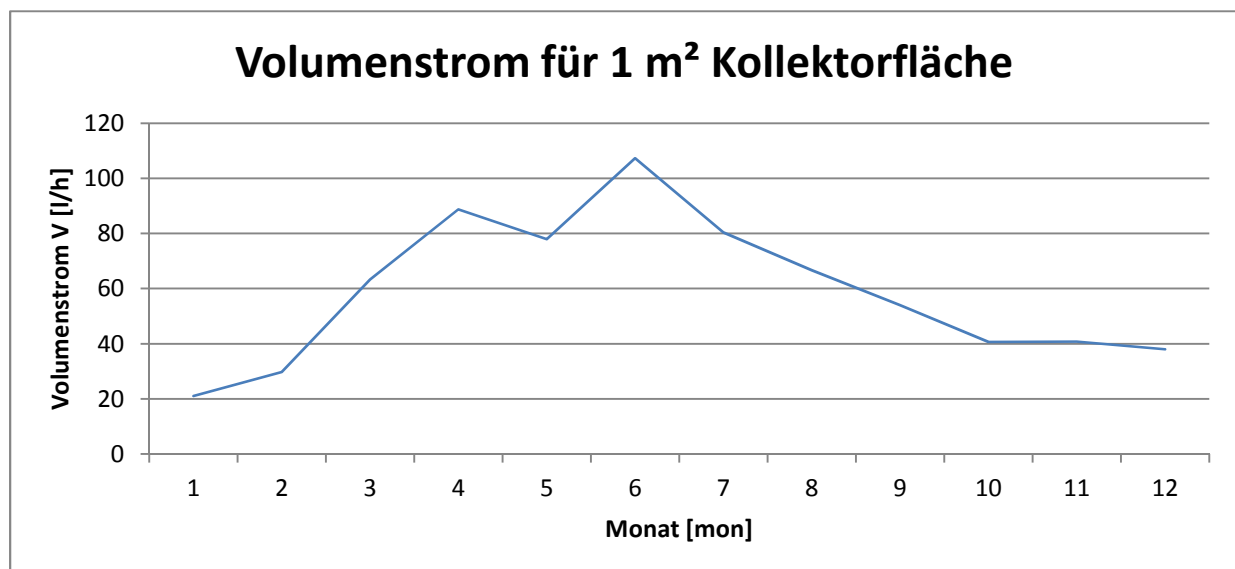


Diagramm 15: Röhrenabsorber Volumenstrom für 1 m<sup>2</sup> installierter Fläche

<sup>74</sup> Vgl. Hydraulik der Wasserheizung 2002, S. 217

<sup>75</sup> Vgl. Hydraulik der Wasserheizung 2002, S. 211

Auf dem Diagramm 15 kann man erkennen, dass der Volumenstrom im Winter geringer ist, als im Sommer. Dies ist, wie zuvor beschrieben, durch die Außentemperaturen zu begründen. Der Volumenstrom schwankt zwischen 20 - 110 Liter die Stunde pro Quadratmeter Röhrenabsorber. Der leichte Einbruch der Kurve auf ca. 75 Liter die Stunde im Mai durch die Nutzwärme  $\dot{Q}_N$  beeinflusst. Diese ist abhängig von der Globalstrahlung, welche im Mai 2012 geringer ist als im Monat davor.<sup>76</sup>

Wird eine größere Kollektorfläche installiert, so ändert sich der Verlauf des Volumenstroms nicht, sondern nur die Menge des Volumenstroms.

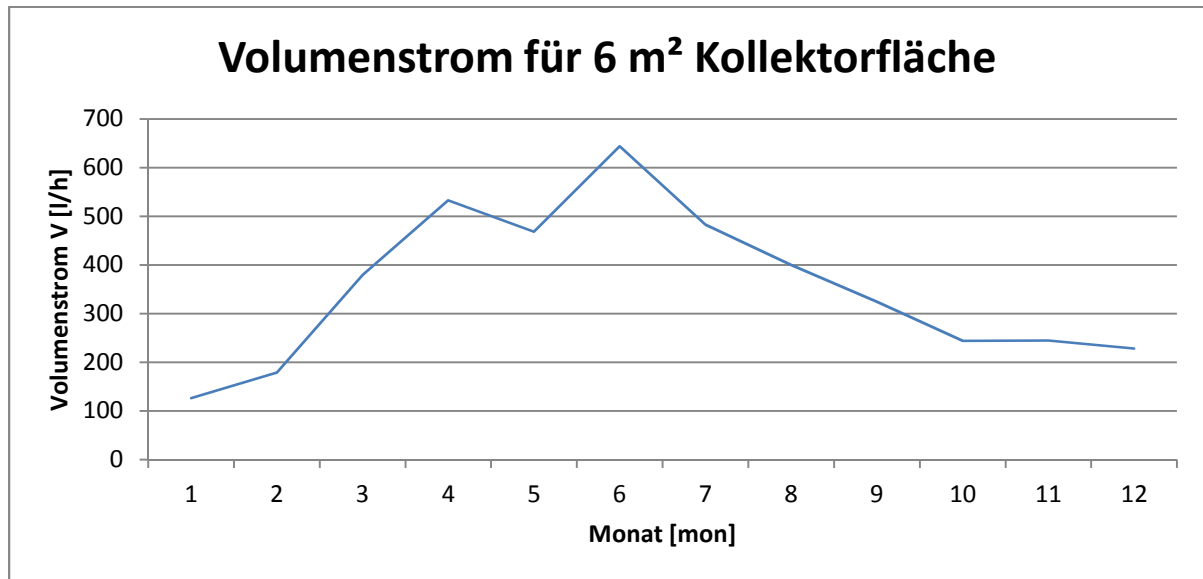


Diagramm 16: Röhrenabsorber Volumenstrom für 6 m² installierter Fläche

Die Ordinatensachse ist von Diagramm 15 zu Diagramm 16 verändert. Dies ist durch die erhöhte Fläche des Solarkollektors zu begründen. Der Verlauf der Kurve ist gleich geblieben.

<sup>76</sup> Deutscher Wetterdienst DWD

### 3.5. Wärmepumpe und Kältemaschine

Physikalisch gesehen enthalten alle Stoffe bis zum absoluten Nullpunkt (null Kelvin) Wärmeenergie. Damit sich der Menschen in einem Raum behaglich fühlt, muss die Raumtemperatur jedoch auf etwa 20 Grad Celsius temperiert werden. Mit einer Wärmepumpe ist es möglich, unter Aufwendung von technischer Arbeit die Energie auf ein behagliches Temperaturniveau anzuheben. Eine Sole / Wasser - Wärmepumpe hat eine Eintrittstemperatur der Sole bei null Grad Celsius und eine Heizwasseraustrittstemperatur von 35 Grad Celsius. 35 Grad Celsius sind eine optimale Vorlauftemperatur, um ein Gebäude mit Fußbodenheizung oder Niedrigtemperatur-Heizkörpern zu beheizen.<sup>77</sup>

Der Grundprozess ist dabei durch Verdampfung eines Kältemittels in der Wärmepumpe Wärme vom niederen Temperaturniveau aufzunehmen. Das dampfförmige Medium ist anschließend zu verdichten. Durch die Kompensation des Kältemittels wird die Temperatur erhöht. Durch Kondensation wird die Wärme auf einem höheren Temperaturniveau wieder abgegeben. Ist das Kältemittel wieder verflüssigt, wird dieses entspannt und der Kreislauf kann erneut beim ersten Schritt beginnen.<sup>78</sup>

Am logarithmischen Druck, Enthalpie log p, h Diagramm lässt sich dieser Kreislauf mit den Zustandsänderungen abbilden. Der Kreisprozess wird in Abbildung 22 an dem Kältemittel R22<sup>79</sup> veranschaulicht.

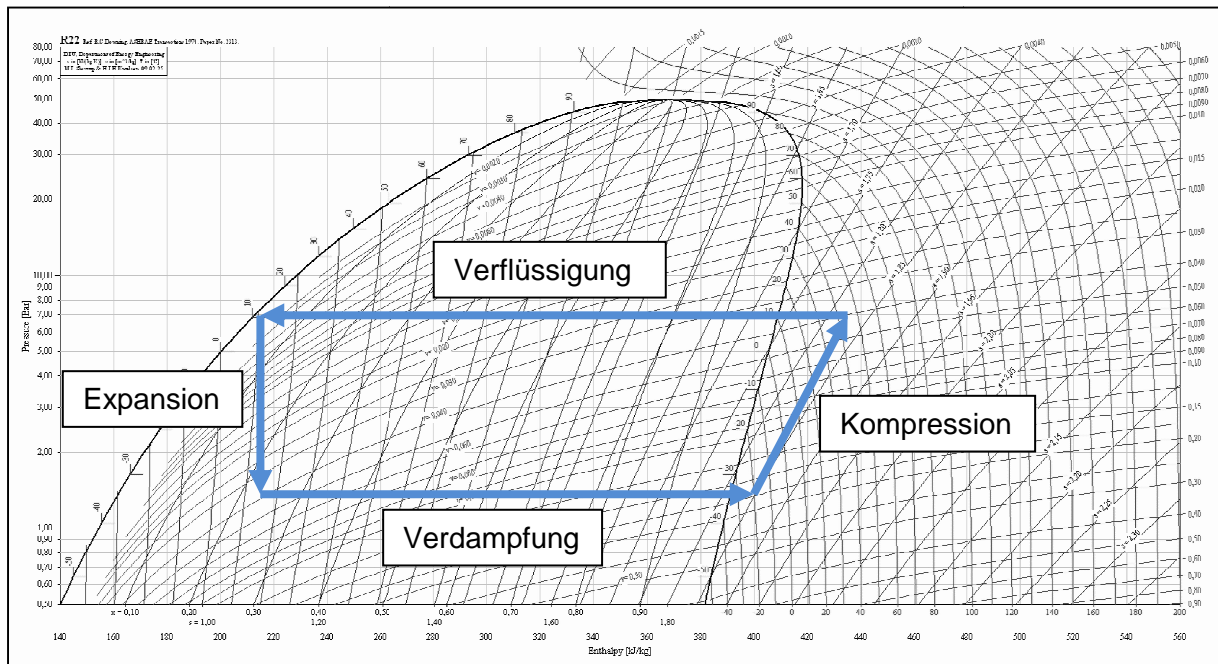


Abbildung 22: log p, h Diagramm am Kältemittel R22

<sup>77</sup> Vgl. Handbuch Wärmepumpen 2012, S. 21

<sup>78</sup> Vgl. Handbuch Wärmepumpen 2012, S. 10

<sup>79</sup> R22 wird ab 2020 Aufgrund des Treibhauspotential verboten



Die Anlagen, die nach dem Verlauf dieses Kreisprozesses <sup>80</sup> nach Abbildung 22 <sup>81</sup> arbeiten, werden noch in zwei Varianten unterschieden. Liegt die Nutzung der Anlage auf der Seite der Verdampfung, handelt es sich um einer Kältemaschine. In dem Fall wird Wärme entzogen. Ist jedoch der Nutzen im Verflüssigen, also bei der Abgabe von Wärme, handelt es sich um eine Wärmepumpe. Es wird folglich mit der Kältemaschine ein Gebäude geheizt und mit der Wärmepumpe gekühlt. Die Leistung der Anlage wird über die Leistungszahl  $\varepsilon$  berechnet.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{Geb}}{P_{el}} \quad (34)$$

Die Symbole der Gleichung ( 34 ) <sup>82</sup> haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	: Bedeutung	Einheit
$\varepsilon$	: Leistungszahl der Wärmepumpe / Kältemaschine	-
$\dot{Q}_{Geb}$	: Heiz-/Kühlleistung des Gebäudes	W
$P_{el}$	: Elektrische Leistung der Wärmepumpe / Kältemaschine	W

Die Leistungszahl  $\varepsilon$  moderner Anlagen besitzen einen Wert zwischen 3,5 und 5,5. <sup>83</sup> Im Folgenden wird eine Leistungszahl von vier festgelegt. Dies bedeutet, dass viermal so viel Wärmeenergie in das Gebäude transportiert werden muss, als in die elektrische Leistung der Wärmepumpe oder Kältemaschine. Dies als Zahlenbeispiel:

$$\dot{Q}_{ES} + P_{el} = \dot{Q}_{Geb} \quad (35)$$

$$3kW + 1 kW = 4 kW \quad (36)$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{Geb}}{P_{el}} = \frac{4 kW}{1 kW} = 4 \quad (37)$$

Bei dem Wärmeträgerfluid handelt es sich beim Eisspeichersystem um Sole. Bei anderen Systemen wird auch Luft oder Wasser als Wärmeträgermedium verwendet. Das Wasser-Glykol-Mischungsverhältnis beträgt 3:2. <sup>84</sup> Dieses Wärmeträgerfluid leitet die Wärme in die Wärmepumpe oder im Kühlfall von der Wärmepumpe in den Eisspeicher. Spezielle Wärmepumpen haben die Kühlfunktion einer Kältemaschine inbegriffen, sodass nur ein Gerät verwendet werden muss.

Um unabhängig von den Erdgas- und Ölpreisen zu heizen, muss die Wärmepumpe den gesamten Wärmebedarf decken. Diese Betriebsweise nennt sich monovalent. Ein bivalenter Betrieb, wobei noch anderen Wärmequellen wie Gas- und Ölheizung hinzugezogen werden, ist in der weiteren Berechnung nicht betrachtet. <sup>85</sup>

<sup>80</sup> Vgl. Heizung, Lüftung, Elektrizität: Energietechnik im Gebäude 2013, S. 41

<sup>81</sup> <http://www.kaelte-treffpunkt.de/kb.php?mode=article&k=30> (Zugriff am 27.01.2014)

<sup>82</sup> Vgl. Planungshandbuch Wärmepumpen 2011, S. 20

<sup>83</sup> Vgl. Planungshandbuch Wärmepumpen 2011, S. 20

<sup>84</sup> Vgl. Thermische Solarenergie 2012, S. 430

<sup>85</sup> Vgl. Handbuch Wärmepumpen 2012, S. 262

### 3.6. Rohrleitungssystem

Die Rohrleitungen dienen der Beförderung der Sole und dem Wasser im Eisspeichersystem. Zu den Rohrleitungen gehören neben den Rohren auch Formteile sowie verschiedene Sicherheitseinrichtungen wie Membranausdehnungsgefäß oder Sicherheitsventil. Bei den Rohrleitungen im Eisspeichersystem handelt es sich um Rohre und Formstücke aus Kunststoff. Diese haben, wie schon in Kapitel 3.3 beschrieben, besondere Vorteile wie der Flexibilität und Beständigkeit des Werkstoffes.

#### 3.6.1. Membranausdehnungsgefäß MAG

Die Dichte eines jeden Fluides ist von der Temperatur abhängig. Die Rohrleitungen des Eisspeichersystems bilden ein geschlossenes System. Die Rohrleitungen sind mit Sole gefüllt und sorgen ohne besondere Vorkehrungen bei Temperaturerhöhungen für einen Druckanstieg im System. Dies wird durch ein Ausdehnungsgefäß verhindert. Bei einem Membranausdehnungsgefäß handelt es sich um einen geschlossenen Metallbehälter, in dessen Mitte eine Membran Sole von Stickstoff trennt. Stickstoff diffundiert nicht so schnell wie Luft durch die Membran und wird aus diesem Grund im Membranausdehnungsgefäß eingesetzt.

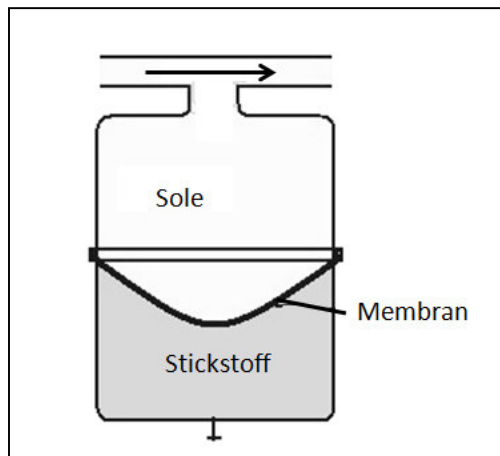


Abbildung 23: Schema eines Membranausdehnungsgefäß

Durch die Rohrleitung im oberen Teil der Abbildung 23<sup>86</sup> fließt Sole. Steigt der Druck durch Temperaturanstieg in den Rohrleitungen, so wird die flexible Membran nach unten gedrückt und verdichtet den Stickstoff. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass der Druck im System konstant bleibt.

Das Volumen des Ausdehnungsgefäßes wird mit einer einfachen Gleichung berechnet und beinhaltet, dass das Volumen des Ausdehnungsgefäßes neunzig Prozent des Gesamtvolumens des Wärmeträgerfluides im Primärkreislauf entspricht:

$$V_{MAG} = 0,9 \cdot V_{Sole} \quad (38)$$

Das Symbole der Gleichung<sup>87</sup> (38) haben folgende Bedeutung und Einheit:

Symbol	Bedeutung	Einheit
$V_{MAG}$	Ausdehnungsvolumen des MAG	m <sup>3</sup>

<sup>86</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Ausdehnungsgef%C3%A4%C3%9F> (Zugriff am 28.01.2014)

<sup>87</sup> Vgl. Thermische Solarenergie 2012, S. 436

### 3.6.2. Sicherheitsventil

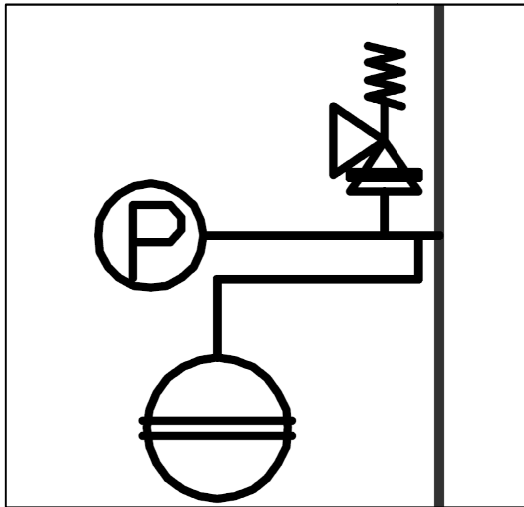


Abbildung 24: Gruppe Druckmessung, MAG, Sicherheitsventil

Ein Sicherheitsventil schützt wie das Ausdehnungsgefäß das System vor Überdruck. Das Sicherheitsventil ist eine Sicherheitsmaßnahme, falls der Druck im System ansteigt, trotz des Einsatzes eines Ausdehnungsgefäßes. Wird ein bestimmter Druck überschritten, tritt Sole über das Sicherheitsventil aus, sodass sich im System der Betriebsdruck wieder einstellt. Im Fall des Überdrucks wird die Sole in einem temperatur- und glykolbeständigen Behälter aufgefangen, welcher ein Fassungsvermögen des Gesamtvolumens der Sole  $V_{Sole}$  fassen kann. Das Ventil kann in Durchgangsform oder Eckform ausgeführt werden. Auf der Abbildung 24 ist ein Sicherheitsventil in Eckform abgebildet.<sup>88</sup>

### 3.6.3. Rückschlagklappe

An einigen Stellen des Rohrleitungssystems muss verhindert werden, dass die Strömung in die entgegengesetzte Richtung fließt. Die Sperrfunktion erfolgt über eine Klappe, die dafür sorgt, dass die Rohrleitung nur in eine Richtung durchflossen werden kann. Auf der Abbildung 25 ist ein Durchfließen der Rückschlagklappe nur von links nach rechts möglich. In entgegengesetzte Richtung sperrt das Ventil.<sup>89</sup>

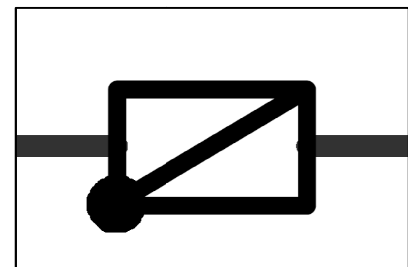


Abbildung 25: Rückschlagklappe

### 3.6.4. Entlüftungsventil

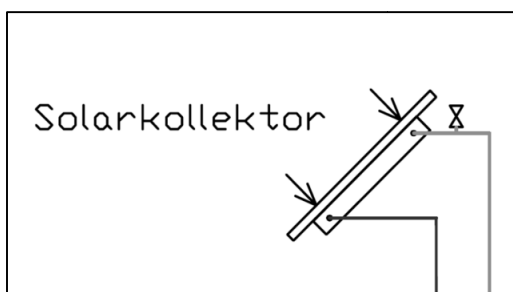


Abbildung 26: Entlüftung der Solaranlage

Luft in den Rohrleitungen führt zu einer verringerten Leistung der Solaranlage. Die Rohrleitungen werden für den besten Wirkungsgrad vollkommen mit Sole befüllt sein. Die optimale Entlüftung der Rohrleitungen der Solaranlage findet an der Stelle statt, an der sich die Luft automatisch sammelt: An dem höchsten Punkt der Anlage.<sup>90</sup>

<sup>88</sup> Vgl. Praxis-Handbuch Industriearmaturen 2003, S. 268

<sup>89</sup> Vgl. Handbuch Rohrleitungsbau 2002, S. 291

<sup>90</sup> Vgl. Thermische Solarenergie 2012, S. 422

## 4. Dimensionierung des Eisspeichers

---

Die Bemessung des Eisspeichersystems kann erfolgen, nachdem in Kapitel drei alle notwendigen Parameter und Berechnungswege der einzelnen Komponenten festgelegt wurden. In diesem Kapitel wird nun eine konkrete Ausführung der Maße des Eisspeichers und der Solarthermieanlage in dem Bezug auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes dargestellt. Dabei werden die Annahmen und konkreten Berechnungen aus dem Kapitel drei zu dem Gesamtsystem zusammengefasst und verarbeitet.

### 4.1. Allgemeine Daten zur Dimensionierung

---

In den Kapiteln zuvor wurden die Werte und Diagramme auf Basis der Wetterdaten der Jahre 2011 und 2012 abgebildet. Diese Jahre lagen in der nahen Vergangenheit und wurden aufgrund dessen ausgewertet. Das Eisspeichersystem muss jedoch auch in Jahren extremer Kälte beziehungsweise Wärme ausreichend dimensioniert sein. Um die Funktion des Eisspeichersystems zu gewährleisten, wurden die Werte aus dem kältesten und wärmsten Jahr der letzten 25 Jahre in folgenden Berechnungen genutzt. Das Jahr 2007 war sogar innerhalb der letzten 100 Jahre das wärmste Jahr mit einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 9,9 Grad Celsius. Das Jahr 2010 stellt mit 7,9 Grad Celsius das kälteste Jahr innerhalb der letzten 25 Jahre dar.<sup>91</sup>

Aus den Werten der Heizgradtage eines Jahres lässt sich feststellen, inwieweit sich der Verbrauchswert erhöht oder vermindert hat. Dabei werden die Differenzen zwischen der Umgebungstemperatur und der Heizgrenztemperatur erfasst und auf einen Jahreswert aufsummiert. Die Heizgrenztemperatur ist für die Berechnung mit 15 Grad Celsius festgelegt. In folgender Tabelle werden die Werte zusammengefasst:<sup>92</sup>

Tabelle 10: Jahresvergleich: Durchschnittstemperatur und Heizgradtage

Jahr	Durchschnittstemperatur	Heizgradtage
-	°C	K·d
2007	9,9	1940
2010	7,9	2796

Der Verbrauchswert des Heizbedarfs ist im Jahr 2007 um 30 Prozent vermindert. Dies wird in folgenden Berechnungen berücksichtigt.

Des Weiteren werden noch weitere Daten festgelegt, um die Dimensionierung vorzunehmen. Die Werte der Temperaturdifferenzen wurden festgelegt und werden in der Tabelle 11 zusammengefasst:

---

<sup>91</sup> Deutscher Wetterdienst DWD 2013

<sup>92</sup> Vgl. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2011, 2012, S. 905

Tabelle 11: Werte über Temperaturdifferenzen

Bezeichnung	Symbol	Wert <sup>93</sup>	Einheit
Temperaturdifferenz Regeneration	$\Delta T_{SK}$	3,00	K
Temperaturdifferenz Entzug	$\Delta T_{WP}$	8,00	K

Die Daten der Wärmeleitfähigkeiten und die Werte über die Dichte der Fluide werden in folgender Tabelle 12 zusammengefasst:

Tabelle 12: Werte über die Dichte und Wärmeleitfähigkeit der Fluide

Bezeichnung	Symbol	Wert <sup>94</sup>	Einheit
Dichte der Sole	$\rho_{Sole}$	1110,00	kg/m <sup>3</sup>
Wärmekapazität der Sole	$cp_{sole}$	2300,00	J/kg·K
Dichte des Wassers	$\rho_L$	4184,00	kg/m <sup>3</sup>
Wärmekapazität des Wassers	$cp_{FL}$	1000,00	J/kg·K
Dichte des Eises	$\rho_F$	2060,00	kg/m <sup>3</sup>
Wärmekapazität des Eises	$cp_F$	916,00	J/kg·K

Für den Eisspeicher werden des Weiteren folgende Daten verwendet:

Tabelle 13: Ergänzende Werte über den Eisspeicher

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Maximale Höhe des Eisspeichers	$h_{ES}$	2,00	m
Skalierung Durchmesser, Höhe des Eisspeichers	-	+/- 0,50	m
Maximales Füllvolumen	$V_{ES}$	80,00	%

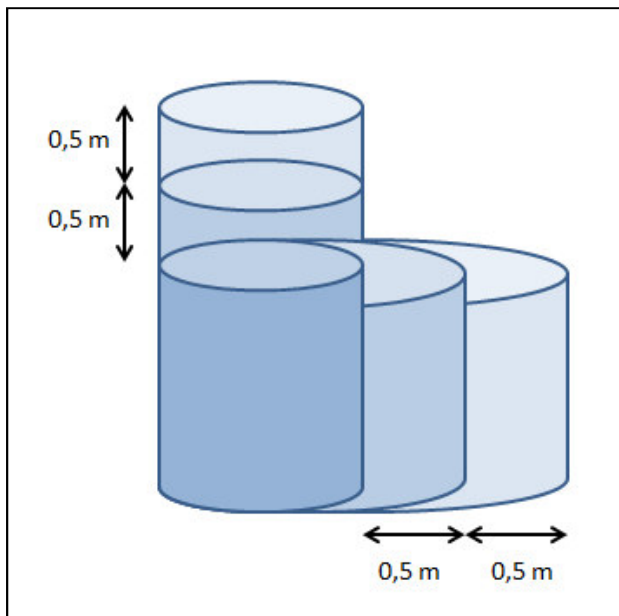


Abbildung 27: Skalierung Eisspeicher

Unter der Skalierung des Eisspeichers versteht sich bei der Berechnung und Auslegung ein Wert, der bei Leistungsüberschuss oder -mangel die Dimensionierung um 0,5 Meter verkleinert oder vergrößert. Ist beispielsweise der Eisspeicher einen Meter hoch und einen Meter breit und es fehlt Leistung des Eisspeichers zur sachgerechten Auslegung, wird dieser in der Höhe oder Durchmesser um 0,5 Meter vergrößert. Mit der Nutzung der Skalierung wird es ermöglicht, dass der Eisspeicher in üblichen Größen dimensioniert wird und Sonderanfertigungen vermieden werden.

<sup>93</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouit 17.11.2013

<sup>94</sup> Tabellenbuch: Sanitär, Heizung, Klima / Lüftung 2011, S. 99, die Angaben verschiedener Autoren differieren bis zu einigen Prozent

## 4.2. Auslegung bei max. Außentemperatur, 5,0 m<sup>2</sup> Kollektorfläche

Im Folgenden wird das Gesamtsystem für das Jahr 2007 ausgelegt. Der Gesamtverbrauch des Heizbedarfs wird auf 3.500 Kilowattstunden festgelegt. Zunächst beträgt die Kollektorfläche fünf Quadratmeter. Um die Auswirkung des Füllvolumens des Eisspeichers zu verdeutlichen, wird vorab ein Vergleich von Eisspeichern in verschiedenen Dimensionen durchgeführt. Für das folgende Diagramm 17 werden folgende Daten festgehalten:

Tabelle 14: Werte zu Diagramm 17

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Kollektorfläche	$A_{SK}$	5,00	m <sup>2</sup>
Gesamtverbrauch Heizleistung im Jahr	$P_{Geb}$	3500,00	kWh
Höhe des Eisspeichers	$h_{ES}$	2,00	m
Durchmesser des Eisspeichers	$d_{ES}$	4,00	m
Füllvolumen des Eisspeichers	$V_{ES}$	20,11	m <sup>3</sup>

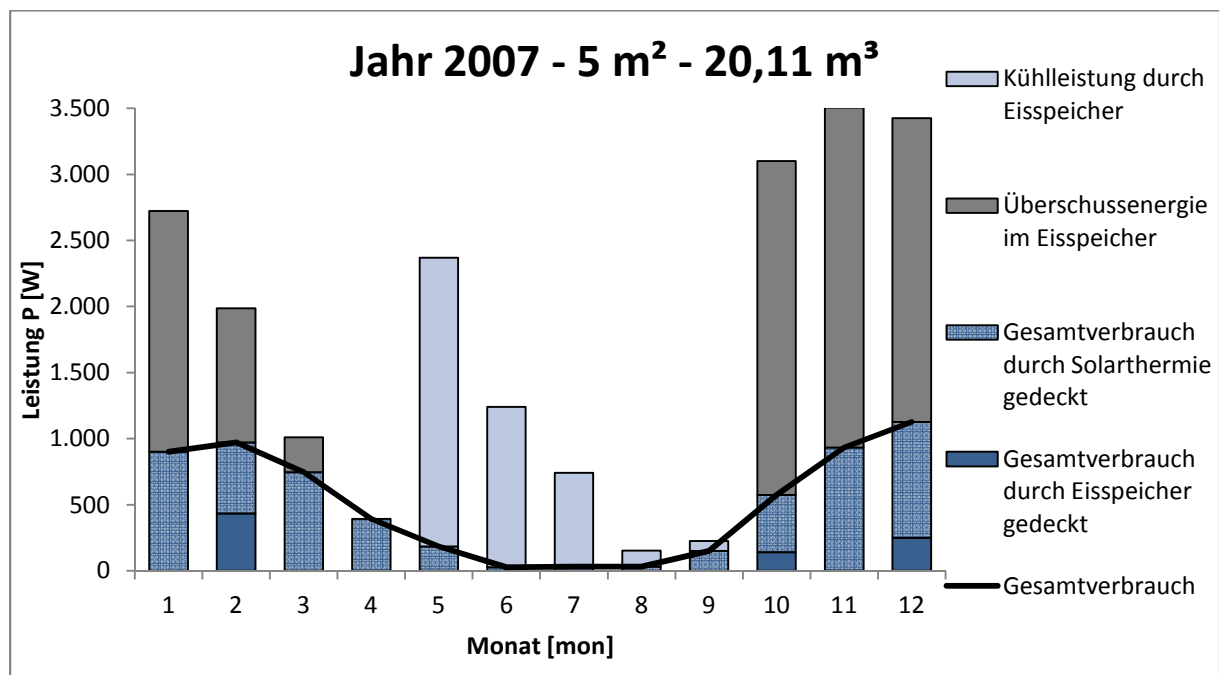


Diagramm 17: Leistung im Jahr 2007 bei 5m<sup>2</sup> Kollektorfläche und 20,11m<sup>3</sup> Füllvolumen

Auf dem Diagramm 17 sind verschiedene Säulen zu erkennen. Die Säulen, die über dem Graphen des Gesamtverbrauchs liegen, beschreiben Überschussenergie im Eisspeicher. Die grauen Balken stellen die Heizleistung dar, die hellblauen die Kühlleistung des Eisspeichers. Der Prozess, wie sich die Leistung aufbaut, wird in diesem Diagramm nicht veranschaulicht. Stattdessen wird dargestellt, dass im Oktober 100 Prozent der Heizleistung erreicht werden und diese über den Winter stetig abnimmt. Die Kühlleistung ist auf die gleiche Weise im Diagramm veranschaulicht. Im Mai sind 100 Prozent der Kühlleistung des Eisspeichers erreicht und baut dann stetig ab. Die Minimierung der Leistungen ist keineswegs konstant, sondern von der Umgebungstemperatur abhängig. Das System ist nach der erforderlichen Heizleistung ausgelegt, wobei die Kühlleistung als positives Nebenprodukt der Systemauslegung resultiert. Unter dem Graphen des Gesamtverbrauches sind die Säulen zu erkennen, die von den Umweltenergien gedeckt sind.

Die Werte für die Überschussenergie der Heizleistung können minimiert werden, indem der Eisspeicher kleiner dimensioniert wird. Im Folgenden werden die Systeme so ausgelegt, dass die Überschussenergie minimiert wird, um Kosten für die Erstellung des Eisspeichers zu verringern. Hierfür werden folgende Werte angenommen. Die Annahmen für die Temperaturen und die Größe des Solarkollektors werden vorerst nicht verändert.

Tabelle 15: Werte zu Diagramm 18

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Kollektorfläche	$A_{SK}$	5,00	m <sup>2</sup>
Gesamtverbrauch Heizleistung im Jahr	$P_{Geb}$	3500,00	kWh
Höhe des Eisspeichers	$h_{ES}$	2,00	m
Durchmesser des Eisspeichers	$d_{ES}$	2,50	m
Füllvolumen des Eisspeichers	$V_{ES}$	7,85	m <sup>3</sup>

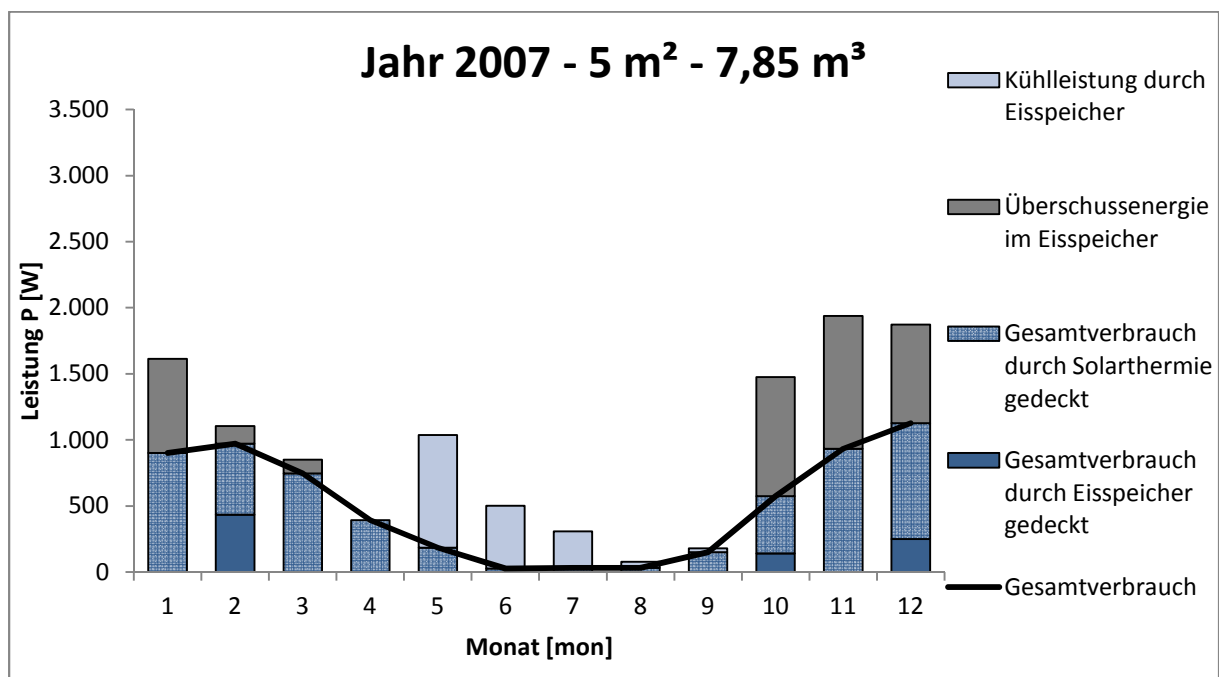
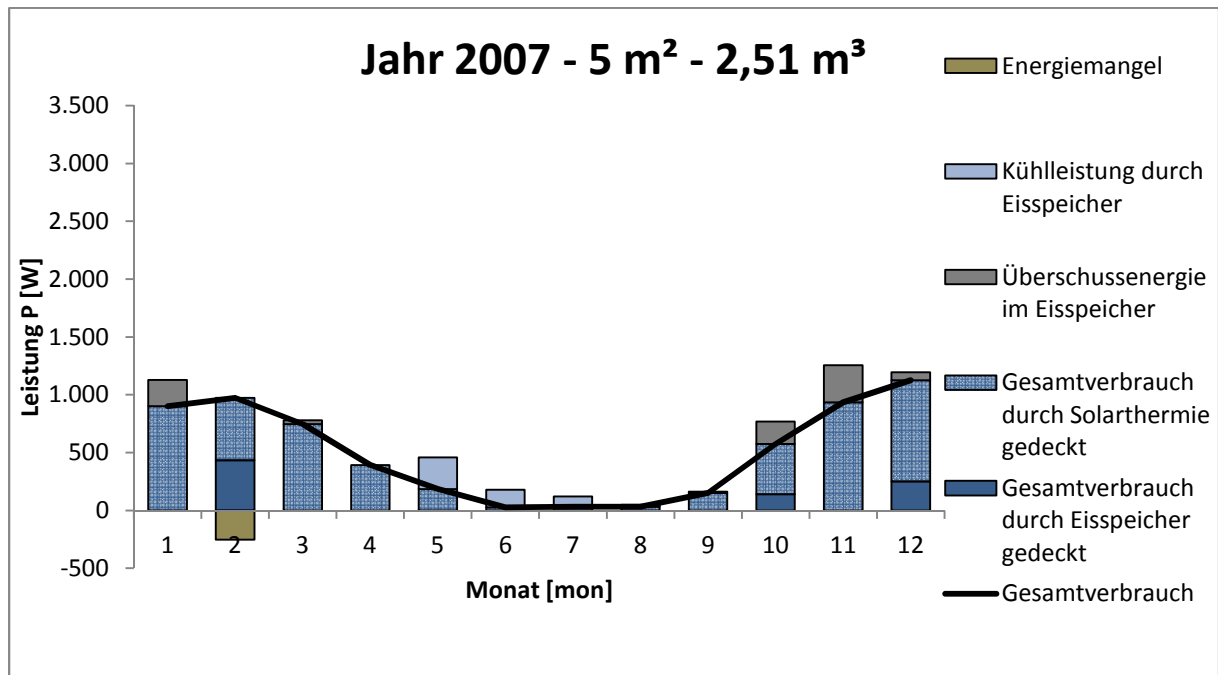


Diagramm 18: Leistung im Jahr 2007 bei 5m<sup>2</sup> Kollektorfläche und 7,85m<sup>3</sup> Füllvolumen

Zwischen dem Diagramm 17 und 18 haben sich die Werte unter dem Graphen des Gesamtverbrauches nicht verändert. In Diagramm 18 wurde ein kleinerer Eisspeicher mit 2,5 Metern Durchmesser ausgelegt. Aus diesem Grund haben sich lediglich die Werte über dem Graphen minimiert und stellen nun die optimale Größe des Eisspeichers bei einer Kollektorfläche von fünf Quadratmetern im Jahr 2007 dar. Würde der Eisspeicher weiter verkleinert werden, reicht die Energie nicht aus, um das Gebäude zu beheizen. Die nächste Berechnung wird diesen Fall demonstrieren. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse ist die Ordinate, welche die Höhe der Leistung angibt, auf 3.500 Watt fixiert.

Tabelle 16: Werte zu Diagramm 19

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Kollektorfläche	$A_{SK}$	5,00	m <sup>2</sup>
Gesamtverbrauch Heizleistung im Jahr	$P_{Geb}$	3500,00	kWh
Höhe des Eisspeichers	$h_{ES}$	1,00	m
Durchmesser des Eisspeichers	$d_{ES}$	2,00	m
Füllvolumen des Eisspeichers	$V_{ES}$	2,51	m <sup>3</sup>


 Diagramm 19: Leistung im Jahr 2007 bei 5m<sup>2</sup> Kollektorfläche und 2,15m<sup>3</sup> Füllvolumen

In Diagramm 19 deutet sich ein Energiemangel im Februar an. Der Eisspeicher hat mit einem Durchmesser von zwei Metern und einer Höhe von einem Meter nur ein Füllvolumen von 2,51 Kubikmetern. Diese Menge an Wasser mit gespeicherter Energiemenge reicht nicht aus, um das Gebäude zu beheizen. Eine Auslegung des Eisspeichers für einen Gesamtverbrauch von 3.500 Kilowattstunden Heizleistung und einer Kollektorfläche von fünf Quadratmetern wird nach Tabelle 15 und Diagramm 18 erfolgen.



### 4.3. Auslegung bei max. Außentemperatur, 7,5 m<sup>2</sup> Kollektorfläche

Im Folgenden wird die optimale Auslegung mit einer größeren Kollektorfläche von 7,5 Quadratmetern für einen Gesamtverbrauch von 3.500 Kilowattstunden im Jahr 2007 simuliert.

Tabelle 17: Werte zu Diagramm 20

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Kollektorfläche	$A_{SK}$	7,50	m <sup>2</sup>
Gesamtverbrauch Heizleistung im Jahr	$P_{Geb}$	3500,00	kWh
Höhe des Eisspeichers	$h_{ES}$	1,00	m
Durchmesser des Eisspeichers	$d_{ES}$	2,00	m
Füllvolumen des Eisspeichers	$V_{ES}$	2,51	m <sup>3</sup>

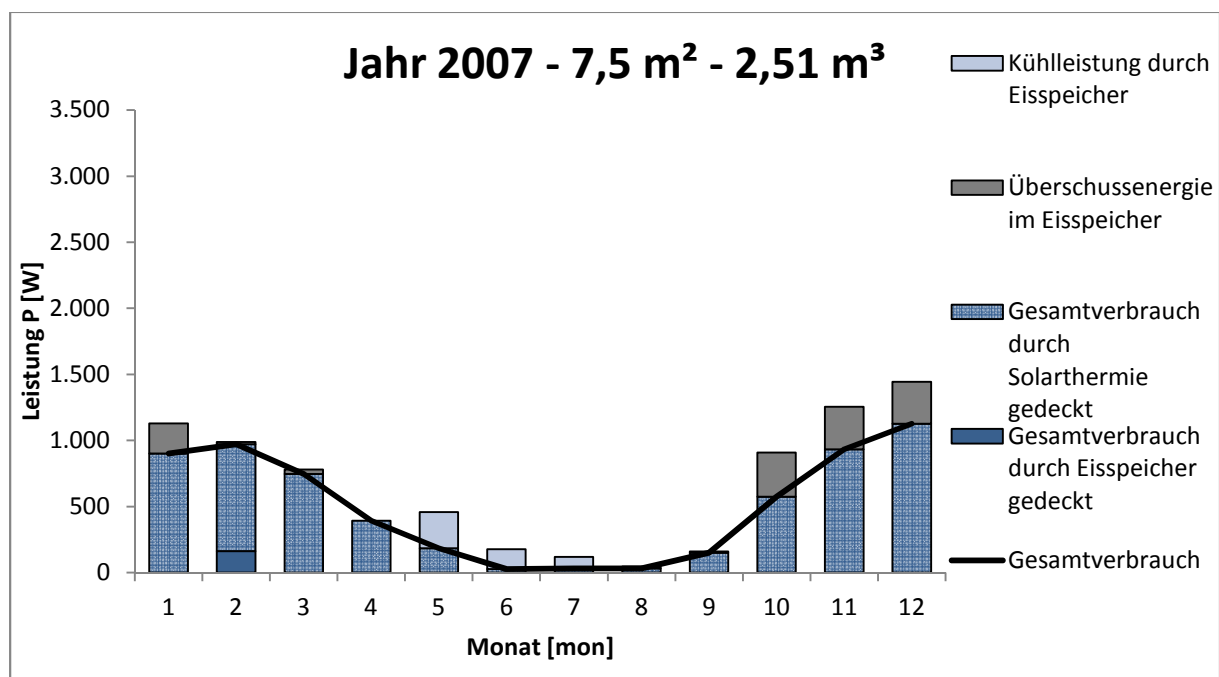


Diagramm 20: Leistung im Jahr 2007 bei 7,5m<sup>2</sup> Kollektorfläche und 2,15m<sup>3</sup> Füllvolumen

In diesem Fall hat der Eisspeicher die gleiche Größe wie im Fall zuvor (Tabelle 16, Diagramm 19). Jedoch wurde die Kollektorfläche um 2,5 Quadratmeter vergrößert und hat jetzt eine Gesamtfläche von 7,5 Quadratmetern. Die Solarthermieanlage hat nun eine größere Leistung und hat auch das Bild in Diagramm 20 unter dem Graphen des Gesamtverbrauches verändert. Der Eisspeicher muss den Heizbedarf nur im Februar decken, wofür ein Füllvolumen von 2,15 Kubikmetern ausreicht. Dass der Heizbedarf nur im Februar anfällt, liegt vor allem daran, dass es sich um das Jahr 2007 mit einer Rekordtemperatur von Durchschnittlich 9,9 Grad Celsius handelt. Im Folgenden werden die Werte mit minimaler Außentemperatur aus der nahen Vergangenheit verglichen.

#### 4.4. Auslegung bei min. Außentemperatur, 5 m<sup>2</sup> Kollektorfläche

Im Folgenden wird das Gesamtsystem für das Jahr 2010 ausgelegt. Der Gesamtverbrauch des Heizbedarfs wird auf 5.000 Kilowattstunden festgelegt, da das Jahr 2010 kälter war als das Jahr 2007. Dies entspricht einer Steigerung des Heizbedarfs um 30 Prozent. Die Zunahme der Heizleistung um 30 Prozent wurde in Kapitel 4.1 berechnet. Zunächst beträgt die Kollektorfläche erneut fünf Quadratmeter und wird daraufhin um 2,5 Quadratmeter vergrößert. Für die Anwendung einer Kollektorfläche von fünf Quadratmeter wurde folgende Größe des Eisspeichers berechnet:

Tabelle 18: Werte zu Diagramm 21

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Kollektorfläche	$A_{SK}$	5,00	m <sup>2</sup>
Gesamtverbrauch Heizleistung im Jahr	$P_{Geb}$	5000,00	kWh
Höhe des Eisspeichers	$h_{ES}$	2,00	m
Durchmesser des Eisspeichers	$d_{ES}$	3,00	m
Füllvolumen des Eisspeichers	$V_{ES}$	11,31	m <sup>3</sup>

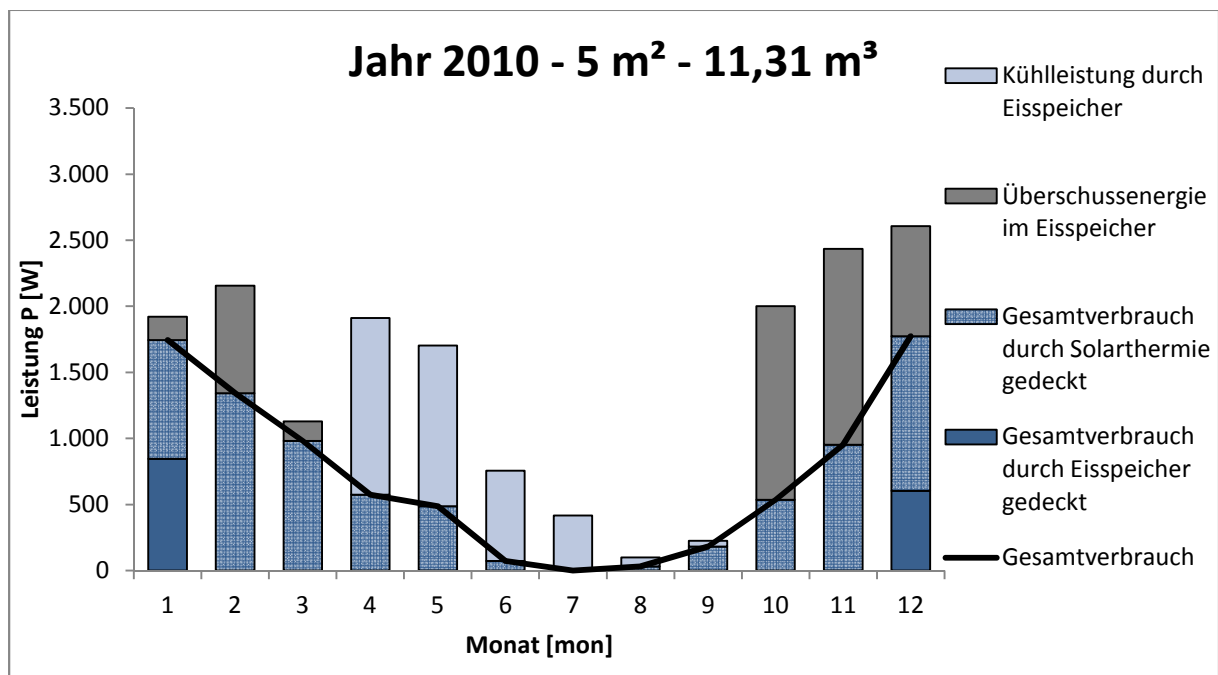


Diagramm 21: Leistung im Jahr 2010 bei 5m<sup>2</sup> Kollektorfläche und 11,31m<sup>3</sup> Füllvolumen

Das Jahr 2010 war das kälteste Jahr der letzten 25 Jahre. Der Heizleistungsverbrauch ist im Vergleich zu dem Jahr 2007 gestiegen und hat Auswirkungen auf die Leistung und Dimensionierung des Eisspeichers. Im Jahr 2007 hat ein Füllvolumen des Eisspeichers von 7,85 Kubikmetern genügt, um die Leistung des Gesamtverbrauchs zu decken. Im Jahr 2010 muss der Eisspeicher mit einem Füllvolumen von 11,31 Kubikmetern ausgelegt werden.

### 4.5. Auslegung bei min. Außentemperatur, 7,5 m<sup>2</sup> Kollektorfläche

Auch im Jahr minimaler Umgebungstemperaturen ist die Größe des Eisspeichers von der Fläche des Solarkollektors abhängig. Dies wird mit folgendem Diagramm 22 verdeutlicht.

Tabelle 19: Werte zu Diagramm 22

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Kollektorfläche	$A_{SK}$	7,50	m <sup>2</sup>
Gesamtverbrauch Heizleistung im Jahr	$P_{Geb}$	5000,00	kWh
Höhe des Eisspeichers	$h_{ES}$	1,50	m
Durchmesser des Eisspeichers	$d_{ES}$	2,50	m
Füllvolumen des Eisspeichers	$V_{ES}$	5,89	m <sup>3</sup>

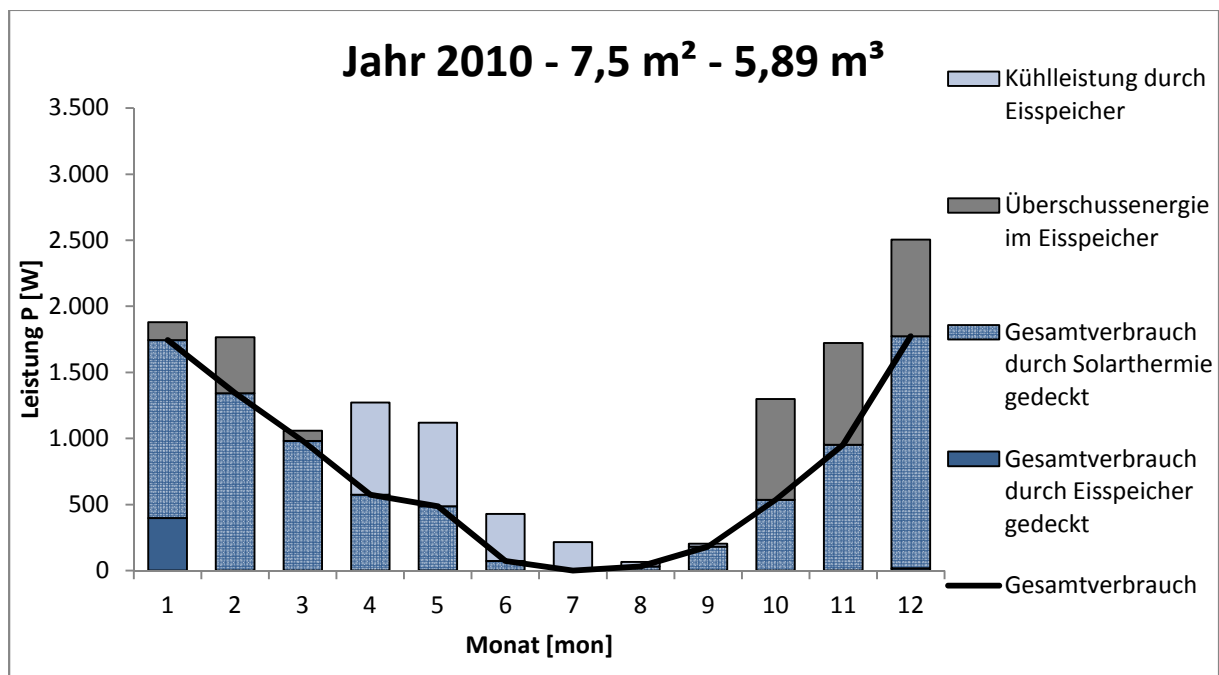


Diagramm 22: Leistung im Jahr 2010 bei 7,5m<sup>2</sup> Kollektorfläche und 5,89m<sup>3</sup> Füllvolumen

Ist die Kollektorfläche auf 7,5 Quadratmeter vergrößert, wird ein Eisspeicher mit nur 5,89 Kubikmetern Füllvolumen benötigt. Zusammenfassend für das Jahr 2010 wird noch auf Auffälligkeit im Februar hingewiesen. Im Februar ist die Überschussenergie höher als im Januar. Dies ist zurückzuführen auf die besonders hohe Globalstrahlung im Februar. Es wurde in diesem Monat mehr Wärme durch die Solarthermieanlage und der Wärme im Erdreich eingespeist, als dass die Wärmepumpe diese Wärme wieder entziehen konnte. Ansonsten ist der Verlauf der Säulen entsprechen den Erwartungen.

## 4.6. Auslegung bei min. Außentemperatur und hohem Verbrauch

Als letzter Vergleich bei Dimensionierung des Eisspeichers wird ein Beispiel von einem besonders hohen Heizleistungsverbrauch angeführt werden. Hierfür werden weiterhin die Wetterdaten aus dem Jahr 2010 genutzt, um die Auslegung bei minimaler Außentemperatur zu veranschaulichen. Im folgenden Diagramm 23 wird ein Gesamtverbrauch von 15.000 Kilowattstunden simuliert. Eine Kollektorfläche von 7,5 Quadratmetern bleibt wie in vorheriger Berechnung erhalten.

Tabelle 20: Werte zu Diagramm 23

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Kollektorfläche	$A_{SK}$	7,50	m <sup>2</sup>
Gesamtverbrauch Heizleistung im Jahr	$P_{Geb}$	15.000,00	kWh
Höhe des Eisspeichers	$h_{ES}$	2,00	m
Durchmesser des Eisspeichers	$d_{ES}$	6,00	m
Füllvolumen des Eisspeichers	$V_{ES}$	45,24	m <sup>3</sup>

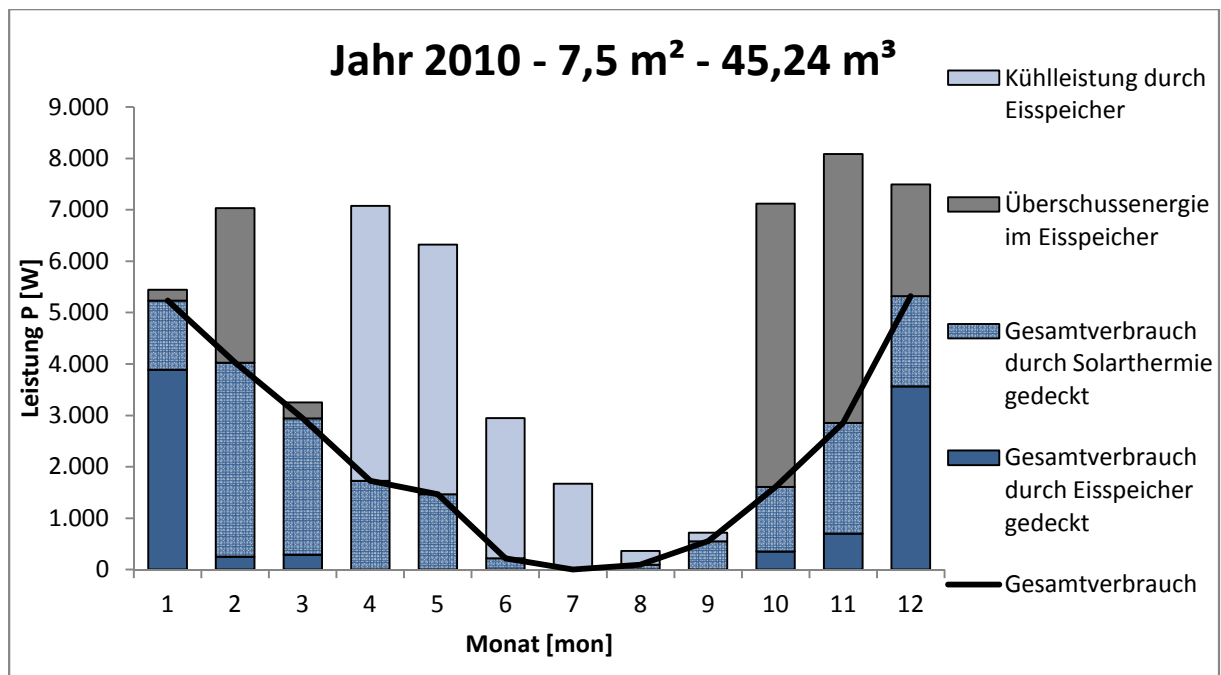


Diagramm 23: Leistung im Jahr 2010 bei 7,5m<sup>2</sup> Kollektorfläche und 45,24m<sup>3</sup> Füllvolumen

Im Vergleich zum Diagramm 22 ist zu erkennen, dass der Gesamtverbrauch, der durch die Solarthermieanlage gedeckt werden kann, prozentual geringer ist, als im Beispiel des Diagramms 23. Der Gesamtverbrauch, der durch den Eisspeicher gedeckt werden muss, ist somit gestiegen. Dies ist ebenfalls im Vergleich der dunkel blauen Säulen von Diagramm 22 und 23 erkennbar.

## 4.7. Wertung der Ergebnisse aus der Dimensionierung

---

In Kapitel vier werden die einzelnen Parameter aus Kapitel drei zusammengefasst und der Eisspeicher auf die Größe des Eisspeichers und der Solarthermieanlage in Bezug auf den Gesamtwärmeverbrauch dimensioniert. Die Ergebnisse aus der Berechnung werden nun interpretiert.

Es gibt einen klaren Zusammenhang zwischen dem Gesamtverbrauch an Heizleistung, der Größe der Solarthermieanlage und den Abmaßen des Eisspeichers. Zunächst wurde ein gleichbleibender Gesamtverbrauch betrachtet. Zum einen wurde deutlich, dass mit Zunahme der Fläche der Solarthermieanlage eine höhere Deckung des Gesamtverbrauchs möglich wurde. Der Eisspeicher spielt eine größere Rolle bei der Auslegung des Gesamtsystems, je kleiner die Solarthermieanlage ist. Steigt jedoch der Gesamtverbrauch bei gleichbleibender Fläche der Solarthermieanlage, muss der Eisspeicher größer dimensioniert werden.

Die Kühlung des Gebäudes steht im Hintergrund und wird in der Bachelorarbeit weitestgehend als positives Nebenprodukt des Eisspeichersystems betrachtet. Trotz dessen wurden in den Berechnungen die Kühlleistungen berechnet und in Diagrammen veranschaulicht.

Für eine Auslegung eines Eisspeichersystems ist immer eine Sicherheit bei der Dimensionierung des Eisspeichers einzuplanen. Trotz der Tatsache, dass 2010 das kälteste Jahr der letzten 25 war, ist nicht auszuschließen, dass in Zukunft ein weitaus kälteres Jahr folgen kann. Eine Auslegung des Gesamtverbrauchs nach einer genauen Heizlastberechnung nach der DIN EN 12831 Heizungsanlagen in Gebäuden ist unabdingbar.

Des Weiteren muss die Auslegung des Eisspeichers und / oder der Solaranlage überdimensioniert sein, denn es ist nicht auszuschließen, dass ein kälterer Winter als 2010 noch folgen wird. Die Berechnung deckt zwar die einzelnen Komponenten ab, doch sind verschiedene Werte festgelegt wurden und nicht variiert wurden. Eine Abwandlung aller Parameter im Rahmen einer Bachelorarbeit ist nicht möglich, weshalb auf verschiedene Annahmen zurückgegriffen wurde. Unter anderem ist die prozentuale Auslegung des Eises im Eisspeicher festgelegt worden. Eine genaue Berechnung für die zeitlich abhängige Eisdicke um den Entzugswärmetauscher ist exakter als jede Hypothese. Des Weiteren wurde die Wanddicke des Eisspeichers nicht verändert. Anzunehmen ist jedoch, dass die Wanddicke von der Größe des Eisspeichers abhängt. Zudem wurde das Füllvolumen nach einem zylinderförmigen Körper berechnet. Eine Auslegung eines quadratischen Eisspeichers ist jedoch ebenfalls denkbar. Ein weiterer, wenn auch wahrscheinlich kleiner, Parameter wurde nicht in der Auslegung berücksichtigt. Wird Regen von den Außentemperaturen erwärmt und erreicht diese Temperatur ein höheres Niveau als die im Eisspeicher, hat auch der warme Regen neben der Bodentemperatur einen Einfluss auf die Regeneration des Eises im Eisspeicher.

Trotz dessen beruhen die Annahmen auf allgemeinen Erfahrungswerten, sodass eine Dimensionierung des Eisspeichers und der Solarthermieanlage nach den Berechnungen aus Kapitel drei und vier durchgeführt werden kann.

## 5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

---

Die Preise für Öl und Gas steigen stets weiter, sodass der Wunsch besteht, Gebäude ganzjährig mit Hilfe von Umweltenergie zu beheizen. Bei den untersuchten zwei Varianten im Vergleich wird es sich um Systeme mit erneuerbarer Energiequelle handeln. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt im Folgenden zwischen einer Holzpellettheizung und einem Eisspeichersystem. Hierfür werden die Vor- und Nachteile beider Systeme untersucht, Investitionskosten definiert und die Betriebskosten berechnet. Weitere Aspekte in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stellen die Wartungskosten und die Lebensdauer dar. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst. Dabei wird das Eisspeichersystem in der Betrachtung ohne Kühlung angenommen.

Zunächst wird die Funktion der Pellettheizung erläutert. Es handelt sich dabei um einen Verbrennungskessel, welcher mit Holzpellets befeuert wird. Bei den Holzpellets handelt es sich um Presslinge aus Holzspan und Sägemehl. Bei dem Verbrennungsprozess wird Wärme frei, die zur Raumheizung genutzt werden kann. Diese Feuerungsart hat einige Vorteile. Unter anderem handelt es sich bei dem Brennstoff um einen heimischen Werkstoff. Die Preise für die Pellets sind somit unabhängig vom Öl- und Erdgasmarkt. Zudem werden im Vergleich bei der Verbrennung von Öl und Gas und der Pelletverbrennung nur 62 Gramm pro Kilowattstunde Treibhausgase frei. Dies entspricht einem Viertel der Gase, die bei der Verbrennung von Öl und Gas frei werden. Doch birgt das System auch Nachteile. Für die Brennstofflagerung fällt ein hoher Platzbedarf an, welcher stetig trocken gehalten werden muss. Des Weiteren ist ein Umweltsystem aus der Verbrennung von Holz nicht grenzenlos nutzbar. Steigt der Bedarf an Systemen mit Pellets, so werden sich die Holzvorräte verringern und infolgedessen der Preis steigen. Schon in der Vergangenheit kam es zu Lieferschwierigkeiten, wodurch Transportwege verlängert und mehr Treibhausgase freigesetzt wurden. Des Weiteren fallen bei einer Pellettheizung Wartungskosten durch einen Schornsteinfeger an.<sup>95</sup>

Diese Anlage wird im Folgenden mit dem Eisspeichersystem verglichen. Auch hier werden zunächst die Vor- und Nachteile zusammengefasst. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass beim Eisspeicher nur ein minimaler Eingriff in die Natur bleibt. Dadurch kann bisher auf ein Genehmigungsverfahren verzichtet werden. Da für Genehmigungen und Bohrungen wie bei Erdsonden Vorlaufzeiten benötigt werden, kann eine Inbetriebnahme eines Eisspeichersystems ohne große zeitliche Verzögerungen eingeleitet werden. Durch das Entfallen von Genehmigungsverfahren erübrigt sich das Risiko der Nichterteilung. Des Weiteren werden keine Treibhausgase direkt erzeugt und ein Umweltrisiko entfällt, da der Eisspeicher mit üblichem Leitungs- oder Regenwasser befüllt ist. Wie die Pellettheizung ist das Eisspeichersystem unabhängig von den Preisen für Öl und Gas. Doch muss für das System eine Wärmepumpe betrieben werden, welche von den Stromkosten abhängig ist. Ein großer Vorteil ist die Nutzung des erzeugten Eis. Eine Raumkühlung kann aus einem Nebenprodukt des Heizbetriebs genutzt werden.

In folgender Tabelle 21 werden die Vor- und Nachteile zusammengefasst und Investitionskosten sowie Betriebskosten der Systeme aufgezeigt. Aus dieser Zusammenfassung lässt sich die Wirtschaftlichkeit für die Investition in eines der Systeme beurteilen. Als Heizleistungsverbrauch werden 15.000 Kilowattstunden festgelegt.

---

<sup>95</sup> Vgl. Erneuerbare Energien und Klimaschutz 2013, S. 301

Tabelle 21: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zwischen zwei Wärmeerzeugersystemen

<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Wärmeerzeugung</b>			
<b>Holzpellettheizung<sup>96</sup></b>		<b>Eisspeichersystem</b>	
<b>Funktion:</b> Mittels Förderschnecke werden Pellets, die aus Holzabfällen in Sägewerken gepresst werden, zum Verbrennungskessel befördert.		<b>Funktion:</b> Ein Wärmetauschersystem entzieht dem Wasser im Eisspeicher mit einer Wärmepumpe Wärme zum Beheizen des Gebäudes. Das Wasser kühlt durch diesen Vorgang aus, bis es gegebenenfalls gefriert.	
<b>Vorteile:</b> - heimischer Rohstoff, damit unabhängig vom Öl- und Gasmarkt - umweltfreundlich, weil in der Bilanz kaum Treibhausgase frei werden (ca. 62 g/kWh = 1/4 von Gas- oder Ölverbrennung). - niedrige Betriebskosten		<b>Vorteile:</b> - Nutzung Umweltenergie, damit unabhängig vom Öl- und Gasmarkt - umweltfreundlich, keine Treibhausgase - Keine Genehmigungsverfahren (kurzfristiger Betrieb) - Kühlfunktion	
<b>Nachteile:</b> - Brennstoffe müssen vorfinanziert werden - hoher Platzbedarf (Brennstofflagerung) - hohe Investitionskosten - hohe Wartungskosten (Verschmutzungseffekt durch Feinstaub und Ruß) - in der Vergangenheit kam es örtlich zu Lieferschwierigkeiten		<b>Nachteile:</b> - hohe Investitionskosten - Wirtschaftlichkeit stark abhängig von der Temperatur im Heizsystem - Wirtschaftlichkeit stark abhängig vom Angebot regionaler Stromtarife und von Zuschüssen - An kalten Tagen werden Spitzenlasten im Stromnetz erzeugt	
<b>Investitionskosten</b>			
Kessel + Brenner + Regelung + Abgasrohr + Pellettank + Verteiler + Rohrleitungen + Zubehör	40.000,00 €	Wärmepumpe + Regelung + Erdarbeiten + Anschluss + Rohrleitungen	14.200,00 €
		Eisspeicher + Wärmetauschersystem + Erdarbeiten	12.800,00 €
		Röhrenabsorber (7,5 m <sup>2</sup> )	3.000,00 €
<b>Gesamtkosten der Heizanlage</b>	<b>40.000,00 €</b>	<b>Gesamtkosten der Heizanlage</b>	<b>30.000,00 €<sup>97</sup></b>
<b>Betriebskosten bei einer Heizlast von 15.000 kWh/Jahr bei 2.000 Vollbenutzungsstunden/Jahr</b>			
Heizwert: 4,9 kWh/kg, Jahreswirkungsgrad: 75%		Jahresarbeitszahl: 4	
Brennstoff pro Jahr in Kilogramm	4.081,63 kg	Strombedarf pro Jahr in kWh	3.750,00 €
Energiekosten pro Einheit	0,26 €	Energiekosten pro Einheit	0,21 €
Energiekosten pro Jahr	1.061,22 €	Energiekosten pro Jahr	787,50 €
Wartungskosten (Abgasuntersuchung, Schornsteinfeger)	256,00 €		
<b>Jahresbetriebskosten</b>	<b>5.399,12 €</b>	<b>Jahresbetriebskosten</b>	<b>4.537,71 €</b>
<b>Kosten pro kWh</b>	<b>0,36 €</b>	<b>Kosten pro kWh</b>	<b>0,30 €</b>
<b>Betriebskosten auf 10 Jahre</b>	<b>53.991,17 €</b>	<b>Betriebskosten auf 10 Jahre</b>	<b>45.377,10 €</b>

<sup>96</sup> emutec GmbH, Projektordner

<sup>97</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouit 17.11.2013

In der Tabelle 21 sind die Investitionskosten und die Betriebskosten auf 10 Jahre aufgeführt. Dabei wurden zwei Varianten verglichen: Holzpellettheizung und Eisspeichersystem. Um ein wirtschaftliches und nachhaltiges Analgensystem zu gewährleisten, ist die Analyse nach Tabelle 21 anzufertigen.

Die Investitionssumme für die Heizpellettheizung ergeben die 40.000 Euro. Bei dem Eisspeichersystem ergeben die Gesamtkosten der Investition 30.000 Euro. Bei dem Investitionskostenvergleich kann beim Eisspeichersystem ein Viertel der Kosten eingespart werden.

Für die Betriebskosten wurde von einem Bedarf der Anlage von 15.000 Kilowattstunden Heizenergie pro Jahr ausgegangen. Bei den Energiekosten werden für Strom 0,21 Euro pro Kilowattstunde festgelegt. Für die Energiekosten von einem Kilogramm der Pellets werden 0,26 Euro zugrunde gelegt. Mit den Wartungskosten ergeben sich für die Betriebskosten der Pellettheizung 5.399,12 Euro im Jahr. Beim Eisspeichersystem können 16 Prozent an Betriebskosten im Jahr eingespart werden.

Das Eisspeichersystem ist in diesem Vergleich das günstigere Wärmeerzeugersystem. Dies trifft sowohl auf die Investitionskosten sowie die Betriebskosten zu. Die Ergebnisse ergeben jedoch eine erste Abschätzung der Wirtschaftlichkeit und keine exakte Wirtschaftlichkeitsberechnung. Für eine genaue Analyse der Kosten müssen die Gegebenheiten des Gebäudes und der Möglichkeiten an Stromversorgung untersucht und verglichen werden. Die Förderzuschüsse können des Weiteren die Wirtschaftlichkeit beeinflussen.



## 6. Schlussbemerkung und Ausblick

---

Ein Gebäude in Deutschland muss im Winter beheizt werden. Für die Umsetzung eines umweltfreundlichen Heizsystems gibt es viele Möglichkeiten, denn einen Mangel an Energie gibt es nicht. Mit Hilfe von Solarenergie und einer Wärmepumpe kann kostengünstig Wärme für die Heizung zur Verfügung gestellt werden. Unabhängig, welche Wärmequelle für die Wärmepumpe genutzt wird – mit einem Eisspeicher, Erdsonde, dem Wasser oder dem Erdreich – es wird eine Chance genutzt, unabhängig von fossilen Brennstoffen zu heizen. Die Bereitstellung der Wärmeenergie aus dem Sommer in den Winter kann mit Hilfe eines Eisspeichers realisiert werden.

Eine Aussage, welches System sich in der Wärmegewinnung und -speicherung durchsetzt, erweist sich als kompliziert. In der Abhängigkeit von dem Standort, den jeweiligen Gegebenheiten des Gebäudes und der Umgebung müssen verschiedene Varianten von Heizungssystemen wirtschaftlich betrachtet werden. Eine angehende Investition eines Eisspeichersystems ist ebenfalls von künftigen gesetzlichen Entwicklungen und der Preisentwicklung von Öl, Gas und Strom sowie anderen Systemen abhängig. Nach aktuellen Analysen ist eine Investition in ein Eisspeichersystem mit anderen Systemen vergleichbar. Weiterhin ist der Aufbau und Ausbau des Stromnetzes für die flächenbreite Durchsetzung von Systemen mit Wärmepumpe von Bedeutung. Eine Wärmepumpe kann jedoch auch durch Photovoltaikanlagen betrieben werden und auf diese Weise das öffentliche Stromnetz entlasten.

Ein Eisspeicher an sich kann die Bereitstellung von Energie und dem Energiebedarf in Einklang bringen. Die Kernaussage, die Wärmeenergie in den Winter zu verlagern und Kühlleistung im Sommer bereitzustellen, wird ebenfalls durch einen Eisspeicher realisiert. Dabei wird als Medium umweltfreundliches Wasser genutzt. Wird der Eisspeicher beschädigt, so hat dies keine umwelttechnische Auswirkung auf die Natur. Ein Eisspeicher lässt sich in einer ländlichen Gegend leicht in den Garten einbringen. In der Stadt gibt es die Möglichkeit schon bestehende Keller zum Eisspeicher umzufunktionieren. Der Eisspeicher kann Teil vom Wohnungs- aber auch Gewerbebau sein. Dabei kann ein Einfamilienhaus oder ganze Wohnsiedlungen beheizt und gekühlt werden. Der größte Eisspeicher in Deutschland ist für einen Gewerbekomplex in Betrieb. Dieser Eisspeicher hat ein Fassungsvermögen von 1,6 Millionen Liter.<sup>98</sup>

Das System ist nachvollziehbar gestaltet, ist kostengünstig und gleichzeitig wird bei dem Verfahren als Nebenprodukt Eis hergestellt, welches zur Raumkühlung eingesetzt werden kann. Der Eisspeicher ist dabei so dimensioniert, dass im Winter die latente Wärme durch den Phasenwechsel von Wasser zu Eis entzogen wird, sodass die Kühlleistung in den Sommermonaten gedeckt werden kann. Dieser entscheidende Nutzen des Eisspeichersystems kann im Gegensatz zu anderen Systemen zu einer Durchsetzung am Markt führen.

---

<sup>98</sup> In Anlehnung an ein persönliches Gespräch mit Boujamaa Boulahrouit 17.11.2013

## Literaturverzeichnis

---

### Literatur

- Böhm, R., & Fuchs, E. (2002). *System-Entwicklung in der Wirtschaftsinformatik*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG.
- Bonin, J. (2012). *Handbuch Wärmepumpen*. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH.
- Dr. Mehling, H., Dr. Schossig, P., & Kalz, D. (2009). *Latentwärmespeicher in Gebäuden - Wärme und Kälte kompakt und bedarfsgerecht speichern*. Karlsruhe: FIZ Karlsruhe GmbH.
- Ihle, C., Bader, R., & Golla, M. (2011). *Tabellenbuch: Sanitär, Heizung, Klima / Lüftung*. Köln: Bildungsverlag EINS GmbH.
- Kasten, F. (2013). *Thermodynamik rund um das Haus*. Hamburg: disserta Verlag.
- Keller, L. (2009). *Leitfaden für Lüftungs- und Klimaanlage*. München: oldenbourg Industrieverlag GmbH.
- Klaer, R.-H., & Mönning, W. (2003). *Praxis-Handbuch Industriearmaturen*. Essen: Vulkan-Verlag gmbH.
- Panos, K. (2009). *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Prof. Dr. Geller, W. (2005). *Thermodynamik für Maschinenbauer*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Prof. Dr. Schramek, E.-R. (2011, 2012). *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH.
- Quaschnig, V. (2013). *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. München: Carl Hanser Verlag.
- Roos, H. (2002). *Hydraulik der Wasserheizung*. München: Oldenbourg Verlag.
- Schmid, C., Baumgartner, T., & Nipkow, J. (2013). *Heizung, Lüftung, Elektrizität: Energietechnik im Gebäude*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG.
- Stieglitz, R., & Heinzl, V. (2012). *Thermische Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Viessmann Deutschland GmbH. (2008). *Planungshandbuch Solarthermie*. Allendorf (Eder): Viessmann Deutschland GmbH.
- Viessmann Deutschland GmbH. (2011). *Planungshandbuch Wärmepumpen*. Allendorf (Eder): Viessmann Deutschland GmbH.
- Wossog, G. (2002). *Handbuch Rohrleitungsbau*. Essen: Vulkan-Verlag GmbH.

## Interview

Boulahrouf, B. (17. 11 2013). Persönliches Gespräch, Leiter Regionalbüro Nord isocal HeizKühlsysteme GmbH. (N. Mergenthal, Interviewer)

Schwarzfeld, B. (01. 12 2013). Experteninterview, Geschäftsführer BZE Ökoplan GbR. (N. Mergenthal, Interviewer)

Weber, V. (07. 01 2013). Telefonat, Mall Umweltsysteme. (N. Mergenthal, Interviewer)

## Internet

*Aktive Sonnennutzung – das Energiesparmobil Niedersachsen.* (2013). Abgerufen am 18. 12 2013 von [http://www.energiesparmobil.de/erneuerbare\\_energien/sonnenenergienutzung.php](http://www.energiesparmobil.de/erneuerbare_energien/sonnenenergienutzung.php)

*BZE Ökoplan.* (2013). Abgerufen am 26. 11 2013 von <http://www.bze-oekoplan.de/startseite.html>

Dipl. -Ing. Koller, T., Dipl. -Ing Zetzsche, M., & Prof. Dr. Dr. Müller-Steinhagen, H. (11 2008). *Simulation und Betrieb eines Eisspeichersystems.* Abgerufen am 03. 01 2014 von [http://www.tzs.uni-stuttgart.de/abteilungen/wktechnik/SolKaelte/publikationen/DKV%202008/Bericht\\_DKV\\_08\\_Koller.pdf](http://www.tzs.uni-stuttgart.de/abteilungen/wktechnik/SolKaelte/publikationen/DKV%202008/Bericht_DKV_08_Koller.pdf)

*Heizungs- u. Sanitär GmbH.* (2013). Abgerufen am 19. 12 2013 von <http://www.kroglowski.de/eisheizung.html>

*Kälte-Treffpunkt.* (2014). Abgerufen am 27. 01 2014 von <http://www.kaelte-treffpunkt.de/kb.php?mode=article&k=30>

*Solarthermie - Wikipedia.* (2013). Abgerufen am 17. 12 2013 von <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarthermie>

*Sonnenertrag.* (2014). Abgerufen am 02. 06 2014 von <http://wiki.sonnenertrag.eu/solarbegriffe:f:flachkollektor>

*Wärmepumpe - Wikipedia.* (2014). Abgerufen am 05. 02 2014 von <http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmepumpe>

## Sonstiges

*Deutscher Wetterdienst DWD - Wetter und Klima aus einer Hand, Wetterdaten.* (2013).

Deutsches Institut für Normen e. V. (August 2012). *DIN 1988-200 - Technische Regeln für Trinkwasser-Installation.*

Deutsches Institut für Normen e. V. (September 2011). *DIN EN 1264 – Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme*

*emutec GmbH, Oststraße 11, 22844 Norderstedt, Tel. 040 309 866 0, Projektordner.*

## Anhangsverzeichnis

---

Anhangsverzeichnis.....	A
Anhang 1: Interview Bernd Schwarzfeld.....	B
Anhang 2: Technische Zeichnung – Anlagenschema.....	C
Anhang 3: Technische Zeichnung – Anlagenschema – Systemgrenzen.....	D
Anhang 4: Technische Zeichnung – Anlagenschema – technischer Regelvorgang.....	E
Anhang 5: Globalstrahlung in Deutschland (Monatssumme – Januar 2012).....	F
Anhang 6: Globalstrahlung in Deutschland (Monatssumme – Juli 2012).....	G
Anhang 7: Globalstrahlung in Deutschland 2012.....	H
Anhang 8: Globalstrahlung in Deutschland 2011.....	I
Anhang 9: Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit.....	J

## Anhang 1: Interview Bernd Schwarzfeld

---

Anhang 1: Interview Bernd Schwarzfeld



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

Interviewpartner: Bernd Schwarzfeld, Geschäftsführer der BZE Ökoplan GbR –

Interview: Nicole Mergenthal, Hochschule für angewandte Wissenschaften

01. Dezember 2013

10.00 – 11.00Uhr

Persönliches Interview

- *Auf der Startseite der Internet-Seite der BZE Ökoplan GbR steht ein Zitat: „Wir haben kein Energieproblem, sondern ein Energienutzungsproblem“<sup>99</sup> – Was meinen sie mit diesem Leitsatz?*

Die gesamte Diskussion über das gesamte Thema geht von einer völlig falschen Analyse aus und kommt deswegen auch zu völlig falschen Schlüssen.

Es gibt eine technische Erklärung, warum unter anderem Wärmedämmung nicht das Energieproblem lösen kann. Seit dreißig Jahren werden Gebäude gedämmt und das zum Beitrag des Klimaschutzes, an der Stelle kommen wir jedoch keinen Meter voran.

Man kann Energie nicht einsparen, weil man sie nicht erzeugen kann. Energie ist einfach da. Energie ist eine physikalische Größe und Energie ist die Fähigkeit eines Systems Arbeit zu verrichten. Ich kann eine Fähigkeit nutzen, aber nicht einsparen. Wenn das so ist, dann muss ich den Begriff Energie, im wahrsten Sinne des Wortes physikalisch ernst nehmen und dann kommt es auch zu ganz anderen Lösungsansätzen.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt, und das lernt jeder in der Physik, Energie wird nicht erzeugt, sondern umgewandelt. Das heißt, wenn ich in dem Bereich der Energie was machen will, muss ich an die Umwandlungsprozesse ran.

Dann geht es bei der Energie vor allen Dingen um Exergie. Und das ist der entscheidende Ansatz. Die gesamten Systeme basieren darauf: Energie = Exergie + Anergie und alle Systeme sollten auf minimale Temperaturdifferenz basieren. 20 Grad Celsius Raumtemperatur wollen wir erzeugen und die Verbrennung von Erdgas verläuft bei 1200 Grad Celsius. Das heißt: 1200 Grad Celsius und 20 Grad Celsius!

Energie hat nichts mit hohen Temperaturen, sondern hat immer nur was mit Temperaturdifferenzen zu tun. Das ist allen klar, aber keiner berücksichtigt dies. Das ist der entscheidende Punkt, und wir können auf niedriger Temperatur genauso viel Energie nutzen wie auf hoher Temperatur. Hat sogar viele Vorteile, weil auch noch der zweite Hauptsatz der Thermodynamik jetzt eine Rolle spielt. Die Energie strömt vom hohen zu niederen Niveau.

Aber wir lassen im Sommer die Jalousien runter, damit die Sonne nicht in die Gebäude kommt, dann fährt die Klimaanlage hoch und zieht Primärenergiestrom aus der Kernenergie. Und dann wundern wir uns, dass wir ein energetisches Problem haben.

Zugleich werden Gebäude zugehämmert, Deutschland ein Land der Dichter und Dämmer. Daraufhin werden die Gebäude im Sommer noch wärmer. Das liegt daran, dass das Gebäude ein Kollektor ist. Das muss man einfach akzeptieren. Es wird aber nicht akzeptiert. Es wird immer dagegen an technisiert.

Und deswegen haben wir kein Energieproblem, sondern ein Energienutzungsproblem.

Energie ist einfach da. Wenn man ein Problem mit dem hat, was einfach da ist, dann hat man ein Problem mit der Energie.

Ich kann ja auch die Sonne in das Gebäude scheinen lassen und kann ein System nutzen, wie eine Flächentemperierung, eine Kernaktivierung und kann die Energie aus dem Gebäude abführen und kann diese weiter transformieren. Innerhalb des Gebäudes.

---

<sup>99</sup> <http://www.bze-oekoplan.de/startseite.html>

Das ist die Aussage zu dieser Kerneingangsaussage. Also eine völlig andere Betrachtung des Problems und der Lösung.

Ich denke, dass wir ohne jede Form von Gebäudewärmedämmung das Problem des Klimaschutzes lösen.

Dekarbonisieren ist das Entscheidende. Das heißt, wir müssen weg von den fossilen Energieträgern. Und noch was: Energie kostet auch nix. Wenn ich hier auf den Tisch haue, muss ich dafür nichts bezahlen. Obwohl ganz viel Energie im Spiel ist. Wenn ich Stück Brot esse, dann muss ich das Brot bezahlen, aber nicht die Energie die da drin steckt. Das heißt, wir zahlen nur für die fossilen Energieträger.

Und die regenerativen Energieträger sind eben regenerativ, und deswegen kosten sie nichts. Und das ist der entscheidende Punkt. Und wir sind auf der Suche nach Exergie, nutzbarer Energie, die kostenlos zur Verfügung steht. Und das hat was mit Systemgrenzen, mit Umgebungstemperatur und mit Systemtemperaturen zu tun.

Und dafür ist der Eisspeicher sehr interessant.

Das steckt alles in der ersten Kernaussage.

- *Wie sind Sie auf die Idee gestoßen, Wärme aus dem Phasenwechsel von Wasser zu Eis, folglich das Eisspeichersystem zu nutzen?*

Den Ansatz, den ich gerade geschildert habe, verfolge ich im Grunde seit zwanzig Jahren.

Ökoplan gibt es seit 1992 und es heißt eben von Anfang an „Büro für zeitgemäße Energieanwendung“ und der Name ist nie geändert worden.

Dass es um Energieanwendung geht und nicht um Energieeffizienz oder die Höhe der Energieeinsparung, das ist schon ganz bewusst gewählt. Der Ansatz ist bei mir immer da gewesen. Ich komme aus einer Zeit, die energetisch erheblich geprägt ist. Ende der siebziger Jahre bin ich politisch denkend geworden, da ich mit einem politischen Widerstand gegen den ersten Bau von Atomkraftwerken aufgewachsen bin. Ich komme aus dem Bereich Harz, da ist das AKW Grohnde an der Weser gebaut worden und das hat mich geprägt im Sinne des energetischen Bereiches. Und ich bin da rein gewachsen. Ich bin Jahrgang `58 und da habe ich als ich 16 bis 17 Jahre alt war mich entsprechend zur Wehr gesetzt. Und dann kommt es auch dazu, dass ich immer auf der Suche nach technischen Möglichkeiten bin und ich habe mein gesamtes berufliches Leben nach technischen Möglichkeiten gesucht, um eine Sinnhaftigkeit in den Prozessen zu finden und in Lösungen abzubilden.

Mit dem Eisspeichersystem ist es so gewesen. Das eine Konzeption die im Kern die energetischen grundsätzlichen Zusammenhänge, wie die Hauptsätze in einer Form umsetzbar machen, wie es vorher nicht getätigt wurde. Wir haben durch den Eisspeicher die Möglichkeit, ein hohes Maß an Exergie zu generieren, weil wir diesen nutzbaren Temperaturbereich von Energie in eine andere Denkweise schieben.

So sind wir in einem anderen Bereich von Temperaturdifferenzen. Früher hatten wir nur die Möglichkeit Niedertemperaturverteilsysteme zu entwickeln. Nicht mit Fernwärme mit 130

Grad Celsius zu transportieren, sondern vielleicht mit 80 Grad Celsius, vielleicht sogar mit 60 Grad Celsius. Das große Problem ist dabei immer die zentrale Warmwasserbereitung gewesen. Die ist immer der größte Störenfried in diesem Prozess, weil hier immer die Temperaturen hoch gehalten wurden. Und das ist immer kontraproduktiv. Das macht überhaupt keinen Sinn, wenn ich im Sommer 70 Grad Celsius generieren muss, da hat keine solarthermische Anlage eine Chance. Das heißt, alle Temperaturen unter 70 Grad Celsius fahren den Kessel hoch. Das heißt, es geht nur darum, diese Temperaturen runter zu bekommen.

Da ich mich schon sehr früh mit Warmwassersystemen beschäftigt habe, bin ich zu dem Entschluss gekommen, dass nur dezentrale Frischwassersysteme infrage kommen. Das hat den großen Vorteil, dass wir von dieser operativen Zieltemperatur 70 Grad Celsius weg sind und wir können dann auch 50 Grad Celsius maximale Vorlauftemperatur fahren. Wir können Warmwassertemperaturen von 42 Grad Celsius erzeugen.

Wir haben Kindergärten entwickelt, die heizen mit der kompletten Rückwärme aus der Kühlzelle. Jede Küche hat eine Kühlzelle und im Kindergarten ist eine große Kühlzelle mit einer Last von vier Kilowatt bei 8000 Stunden, ergeben das 32000 Kilowattstunden nutzbare Wärmeenergie, die im Temperaturniveau von 45 Grad Celsius anfällt. Damit kann normalerweise keiner was mit anfangen, weil er 60 Grad Celsius braucht. Wir brauchen aber nur 45 Grad Celsius, weil wir im Kindergarten nur 39 Grad Celsius Wasser aus der Zapfarmatur laufen dürfen, aus verbrühungsschutztechnischen Gründen. Da werden normalerweise 70 Grad Celsius erzeugt und auf 39 Grad Celsius runter gekühlt und das macht keinen Sinn. Dadurch vermeiden wir ganz viel Investition, da wir keine Warmwasserverteilsysteme haben. Wir haben 30% weniger Energiebedarf für die Warmwasserbereitung, können regenerative Energie nutzen, Rückwärme aus der Kühlzelle ist 100 Prozent regenerativ und kostet keinen Cent.

Und das jetzt zu Ende gedacht mit dem Eisspeicher.

Da hat sich der Alexander von Rohr Gedanken gemacht und hat ein PE-Rohr in einen Zink Eimer gehängt, eine Wärmepumpe angeschlossen hat und hat dann geguckt, wie sich Eis bildet. Und das waren die ersten zärtlichen Versuche, um so ein System zu entwickeln. Was sich da für Chancen draus gebildet hat, das ist ja auch ein bisschen dem Zufall überlassen gewesen.

Der Eisspeicher ist mehr als nur Heizen mit Eis, sondern es ist ein saisonales Wärmemanagementsystem. Und das Ganze wird verlustfrei organisiert, weil der Eisspeicher in seinem Energiemanagement in einem Temperaturbereich arbeitet, welches immer unterhalb der Umgebungstemperatur liegt. Das heißt, der zweite Hauptsatz tritt in Kraft: Energie fließt vom hohem zum niederen Niveau. Die Energie strömt bei diesem System immer in den ungedämmten Speicher. Und so können wir die Energie nutzen.

Aus den oberflächennahen Schichten können wir Solarthermie nutzen, ohne dass wir Kollektoren bauen müssen. Wir nutzen die Erdoberfläche als symbolischen Kollektor. Wir können die Gebäude nutzen, indem wir die Lüftungsanlagen einbinden und die latente Wärme aus der Luft mit 20 bis 28 Grad Celsius in den Eisspeicher leiten.

Wir können die solarthermischen Anlagen Tag und Nacht laufen lassen, weil wir im Sommer nachts höhere Außentemperaturen haben als im Eisspeicher. Das heißt, mit dem gleichen Investment kann wesentlich mehr Input generiert werden.



Der Eisspeicher ist die Wärmequelle für die Wärmepumpe, folglich muss er am Anfang der Heizperiode warm und am Ende kalt sein. Warm heißt maximal 18 Grad Celsius. Kalt definiert null Grad Celsius.

Den entscheidenden Anteil der Energie holen wir aus dem Phasenwechsel. Das Ausschlaggebende ist, dass sich die Wärmekapazität um den Faktor 80 erhöht. Beim Phasenübergang von null Grad Celsius flüssig zu null Grad Celsius fest holen wir genauso viel Energie, wie als wenn wir 80 Grad Celsius Wasser auf null Grad Celsius abkühlen. Aber bei 80 Grad Celsius haben wir Temperaturdifferenz von 60 Kelvin.

Was die Faszination ausmacht, ist eben, dass der Eisspeicher im Sommer Eis darstellt. Das heißt, wir haben den Ansatz 100 Prozent regenerativ zu kühlen. Und das ist eigentlich das Interessante. Dass man damit heizen kann, das ist gar nicht so interessant, weil das Heizproblem immer weiter in den Hintergrund tritt.

Deshalb passt der Eisspeicher Ideal in meine Grundphilosophie und deswegen haben wir die Eisspeichersysteme aufgegriffen und integriert.

- *Man hat also nachher das Eis kostenlos zur Verfügung, um damit das Gebäude zu kühlen?*

Genau, und daraufhin haben wir schon Projekte entwickelt, die im Sommer 100 Prozent regenerativ kühlen. Mit der Kälte, die wir im Winter produzieren. Und dies ist eine sichere Kälte.

Z. B. ein Laborgebäude. Der Sinn und Zweck eines Laborgebäudes ist ja nicht Energie zu sparen, sondern Geld zu verdienen mit Labortätigkeiten. Die ist aber im Sommer empfindlich gestört, wenn die Kühlung nicht funktioniert. Das heißt, für Kunden ist es ungeheuer wichtig, keine elektrisch betriebenen Schraubenverdichter zu haben, sondern dass die Kühlung nicht ausfällt. Das ist ein riesen Markt.

- *Seit wann gibt es den Markt mit dem Eisspeicher?*

Erst seit drei / vier Jahren.

- *Und welche Vorteile sehen Sie ansonsten gegenüber anderen technischen Lösungen?*

Wir haben nur drei regenerative Energiequellen. Das ist die Sonne, das ist der Mond und das Magma in der Erde.

Magma in der Erde zu nutzen, macht keinen Sinn, da 30 bis 40 Kilometer tief zu buddeln. Tiefengeothermie ist für mich einfach Schwachsinn. Weil es auch ein One-Way ist, denn Geothermie kann kein Gebäude kühlen. Und wenn ich da Energie rein schiebe, ist sie weg.

Erdwärme ist keine Konkurrenz. Der Eisspeicher ist angewandte Erdwärme. Mir ist nur alles zuwider, was man einfacher gestalten kann. Wenn ich die Möglichkeit habe, genauso viel Energie zu generieren, dann macht es für mich volkswirtschaftlich keinen Sinn, den aufwendigeren Weg zu gehen.

Den Mond kann man mit Gezeitenkraftwerken nutzen.

Und die Sonne scheint immer.

Das tut sie, ob wir sie nutzen oder nicht. Ich kann mich nur entscheiden, ob ich für oder gegen das System bin.

Und dann der Unsinn mit den großen solarthermischen Anlagen, ich bin kein Gegner der solartechnischen Anlagen, doch ich bin ein Freund von funktionierenden Systemen. Es gibt ja viel Placebo, mit den Plus Energie Quatsch, mit schön bilanzierten Gebäuden. Das ist nicht unser Denken, sondern wir bauen Gebäude, die wirklich funktionieren. Wir arbeiten mit einfacher Technik, mit nachvollziehbarer Technik, mit kostengünstigen Systemen. Und wenn diese Systeme einfach und nachvollziehbar sind, haben wir auch die Chance den Planeten zu retten.

Nicht mit Hightech, gigantischen Kosten, sondern mit einfachen technischen Lösungen, die umsetzbar sind.

Dabei hilft der Eisspeicher ganz massiv, als Energiemanager. Das ist das Entscheidende. Nicht heizen mit Eis, das ist eine unzulässige Verkürzung. Das ist wie schmeißen mit Äpfeln, mit Äpfeln kann man ganz viel machen, man kann aber auch schmeißen. Und eventuell auch die Richtigen damit treffen, aber das ist eine verkürzte Anwendung.

➤ *Ein Vorteil ist sicher auch, dass man unabhängig von fossilen Brennstoffen ist?*

Genau, und wir können damit Großwärmepumpen einsetzen, das ist der große Vorteil. Großwärmepumpen haben einen besseren Wirkungsgrad, als viele kleine Wärmepumpen. Und wir können Wärmepumpen als Absorptionskältemaschinen einsetzen, wir kommen weg von synthetischen Kältemitteln. Das ist ein entscheidender Punkt. Diese sind auch in der Regel mehrere Potenzen klimaschädlicher als CO<sub>2</sub>. Das ist ein Thema über das spricht kein Mensch. Hundert Millionen Tonnen FCKW sind in Wärmepumpen im Umlauf, die alle den Planeten retten wollen. Die synthetischen Kältemittel haben so viel klimaschädliches Potenzial und sind x-fach problematischer als CO<sub>2</sub>.

Weil diese erst in 30 bis 40 Jahren in die Atmosphäre treten, wenn wir hier unten schon meinen, wir haben den Planeten gerettet, dann geht's da oben erst los in der Troposphäre. Und das unter dem Vorwand der Nachhaltigkeit.

Und auch nicht nur Wärmepumpe und heizen mit Eis, sondern eben auch verdrängen von synthetischen Kältemitteln und verdrängen von elektrischer Spitze. Also ich bin überhaupt kein Freund von Elektrowärmepumpen. Weil wir eine riesige Stromspitze im Winter aufbauen. Wenn alle Gebäude Wärmepumpen haben, dann haben wir ein Stromproblem. Dann kommt alles aus Rumänien – Planet gerettet?

Bei uns geht es nicht nur um Gebäudetechnik, sondern auch Klimaschutz. Klimaschutz muss zum Flächenbrand werden.

- *Klimaschutz ist ein wichtiger Aspekt. Und vielleicht lässt sich dieser mit dem Eisspeicher gewährleisten. Wie gehen Sie bei der Planung eines Eisspeichers vor?*

Zunächst einmal mit dem normalen Menschenverstand. Und ein Werkzeug ist nur so gut, wie der, der ihn in der Hand hat.

- *Das ist wie mit den Äpfeln werfen, richtig?*

Genau, also wenn ich jetzt sage: der Eisspeicher ist der Problemlöser, dann ist das falsch. Eisspeicher können ein riesiges Problem sein. Wenn ein Eisspeicher nur heizen mit Eis ist, dann ist das Unsinn. Wenn ich alles zuglaster mit idiotischen kleinen Wärmepumpen, mit synthetischen Kältemitteln, mit hohen Temperaturen, mit Elektroheizstäben.

Diese ganze Standardtechnik, die lösen nicht das Problem.

Der Eisspeicher wird erst dann gut, wenn er in die richtigen Hände kommt. Und wenn daraus ein anständiges Energiemanagementsystem generiert werden kann. Wenn das Gebäude zum Kollektor gemacht wird.

Also, wie planen wir den Eisspeicher: Am Anfang stehen die Idee und ein konkretes Projekt. Dann geht es an das Analysieren und über die Analyse kommen wir zu Lösung. Und da kann uns der Eisspeicher helfen, ein Problem, das uns konkret vorliegt, zu lösen. Jedoch kann man in jedes System einen Eisspeicher mit implementieren, denn es ist ein Energiemanagementsystem. Und es geht immer darum, Energie zu managen. Und was aber wie funktioniert, das lösen wir grundsätzlich über Gebäudesimulation. Gebäudesimulation ist für uns das ganz entscheidende Werkzeug bei der Hilfe, unsere Konzeption aufzulösen. Dort können wir die Prozesse synchronisieren. Raumwärmeversorgung, Raumkühlung, Warmwasserbereitung und diese aufgelöst über Nutzungsprofile und interne Lasten. Und da spielen auch zeitliche Verläufe eine Rolle.

Und in der Analyse liegt die Kraft.

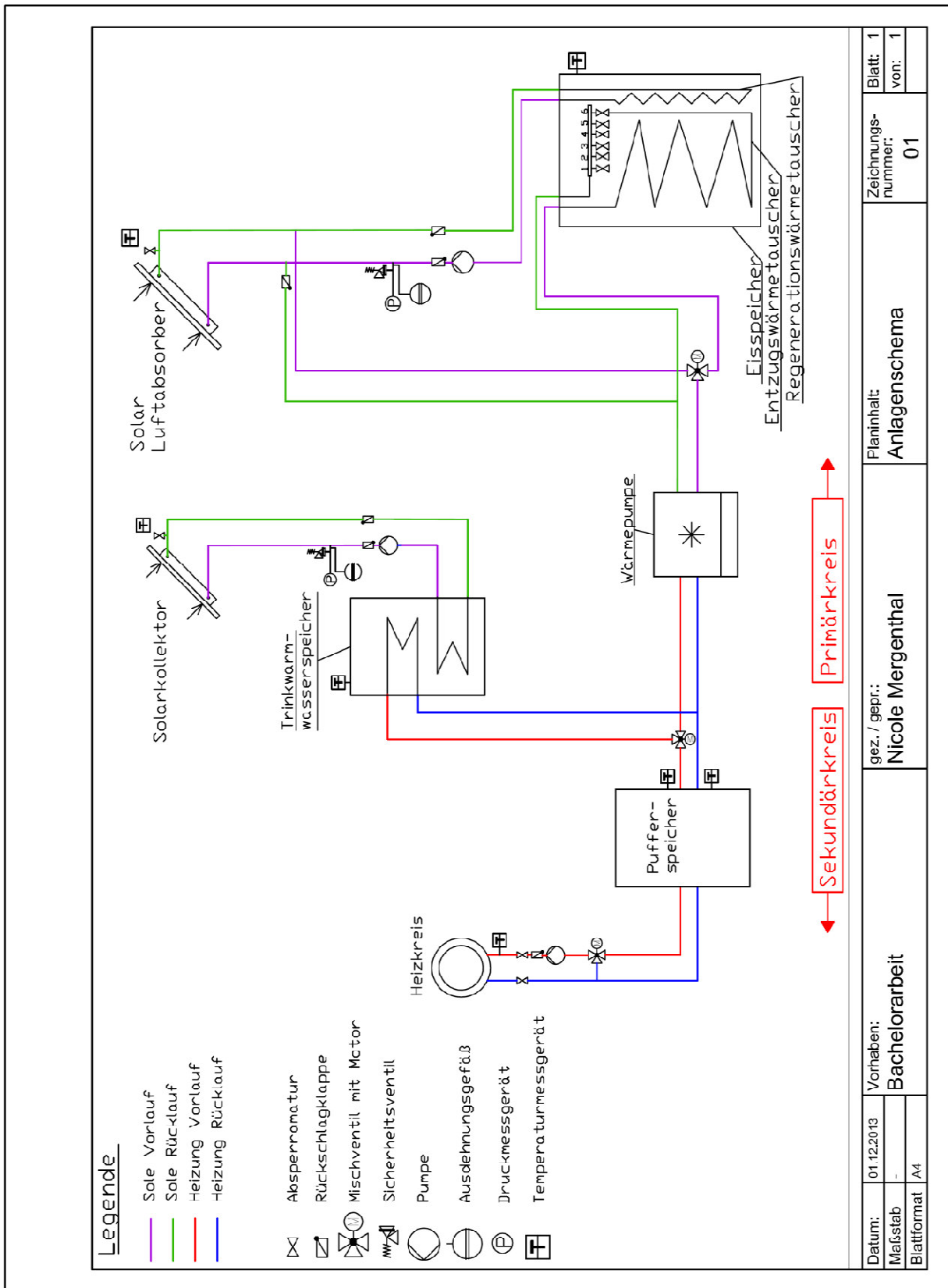
- *Das heißt, dass das System eines ist für jedermann?*

Auf jeden Fall. Das ist genau der Ansatz diese Systeme für jedermann zu generieren. Darum geht's und das ist unser Ziel.

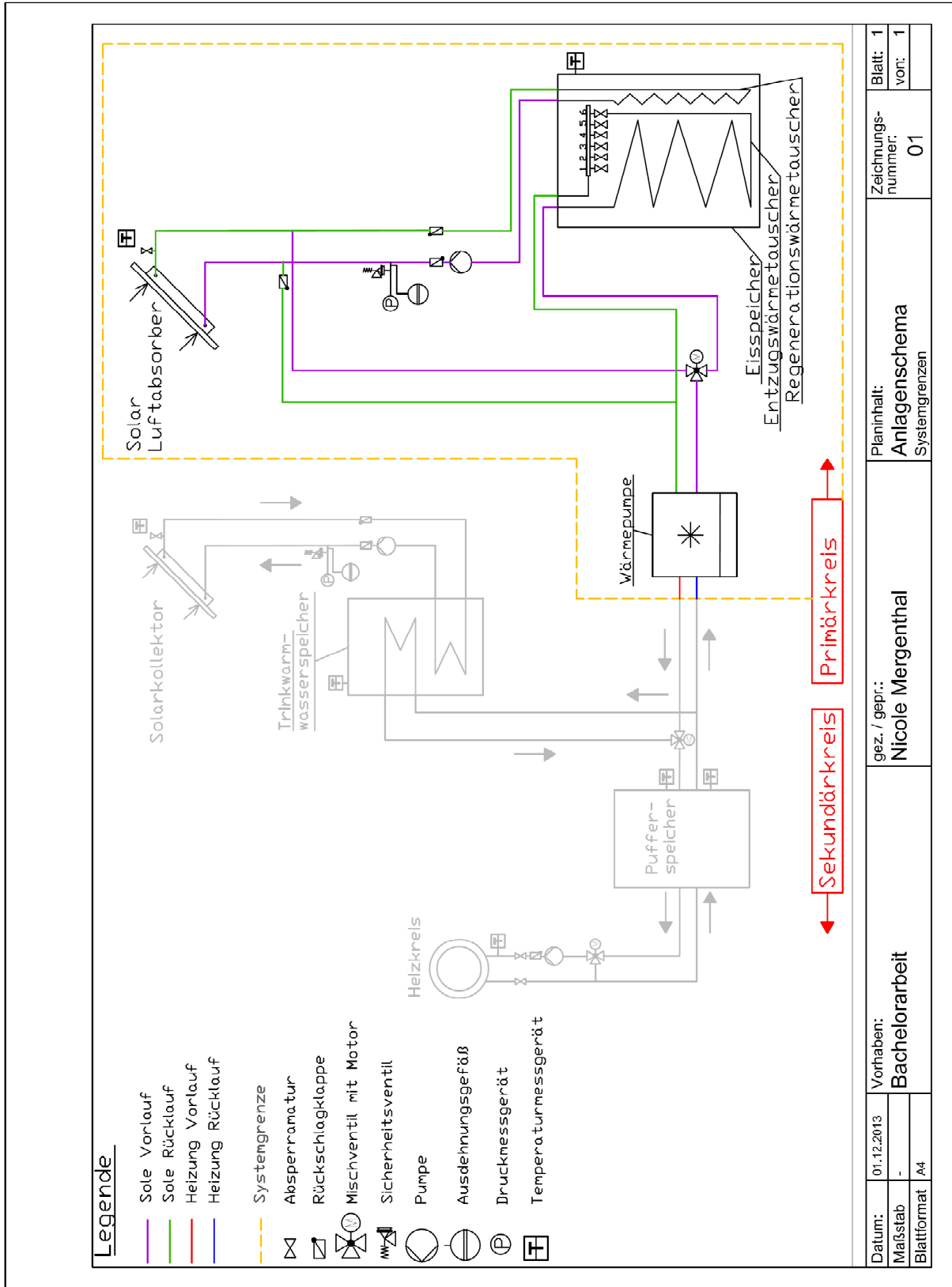
Und über die Kosten kann man aber erst mal gar nichts sagen, das kommt auf die Konzeption an. Aber wir sind immer günstiger als der standardisierte Unfug.

Unsere Dienstleitung ist, wie bei allen anderen die gleiche: Wir machen die Räume behaglicher. Nur wir betrachten mehr den energetischen Aspekt. Wir haben eben kein Energieproblem, sondern ein Energienutzungsproblem.

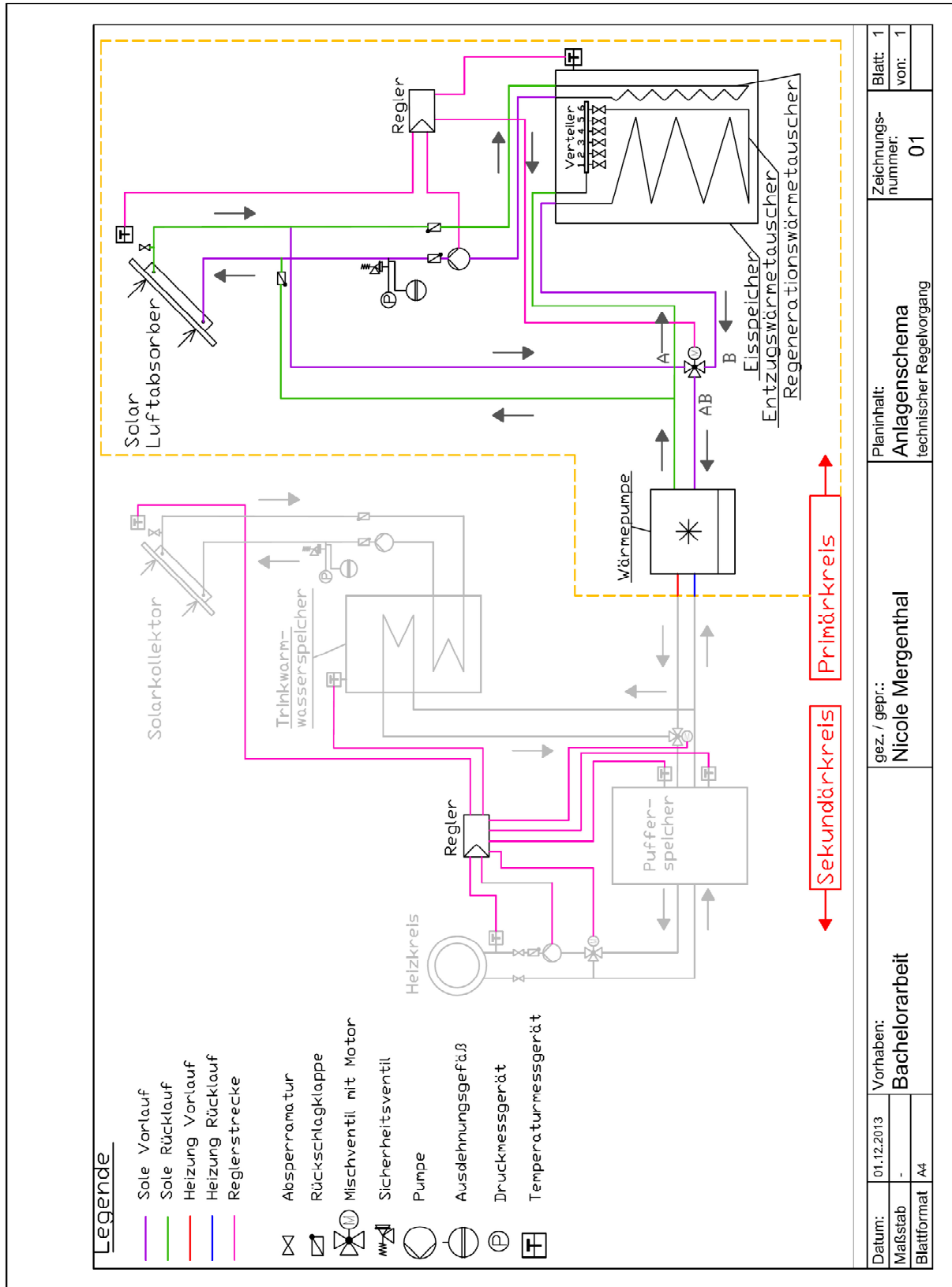
Anhang 2: Technische Zeichnung – Anlagenschema



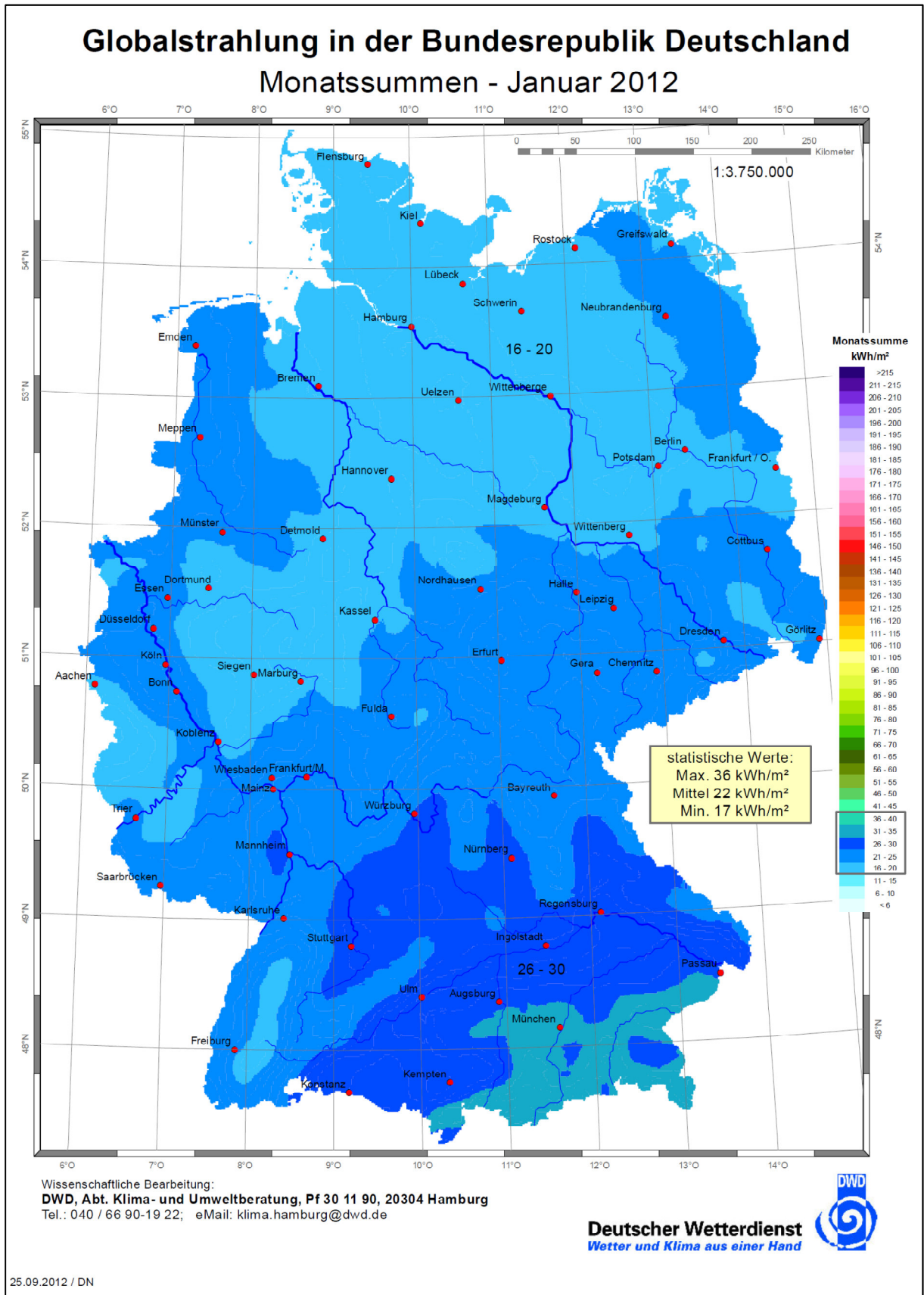
# Anhang 3: Technische Zeichnung – Anlagenschema – Systemgrenzen



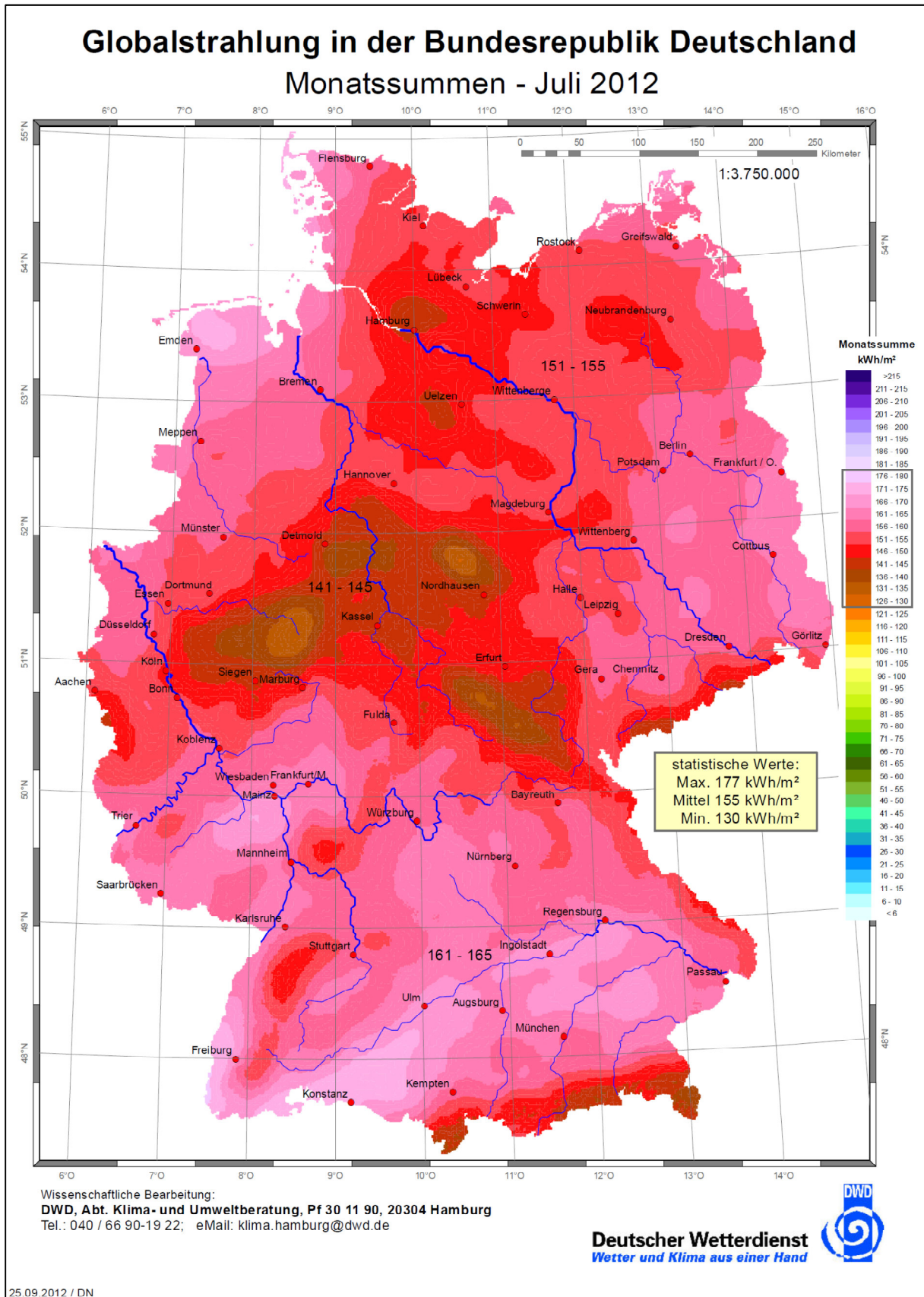
# Anhang 4: Technische Zeichnung – Anlagenschema – technischer Regelvorgang



## Anhang 5: Globalstrahlung in Deutschland (Monatssumme – Januar 2012)

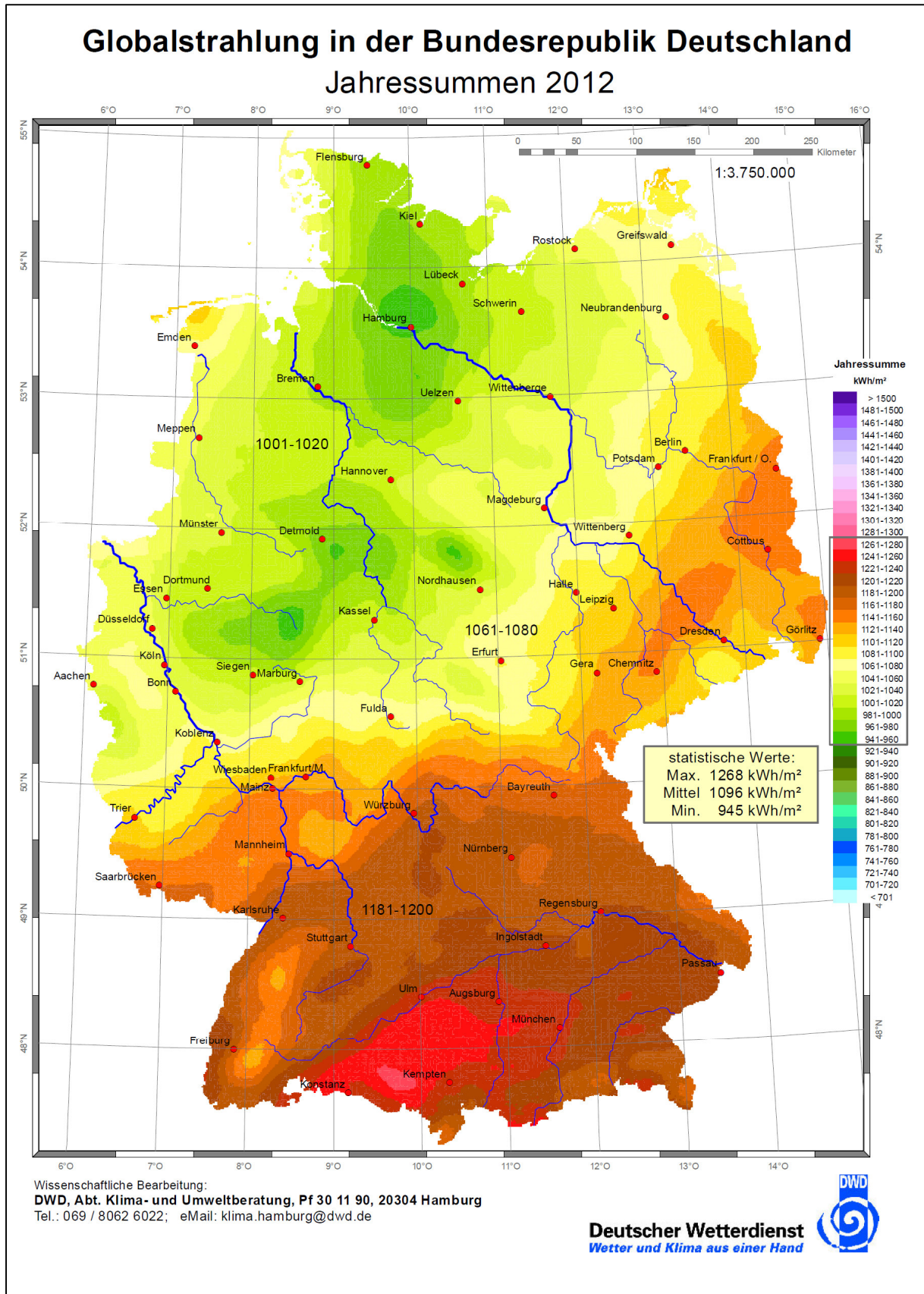


# Anhang 6: Globalstrahlung in Deutschland (Monatssumme – Juli 2012)

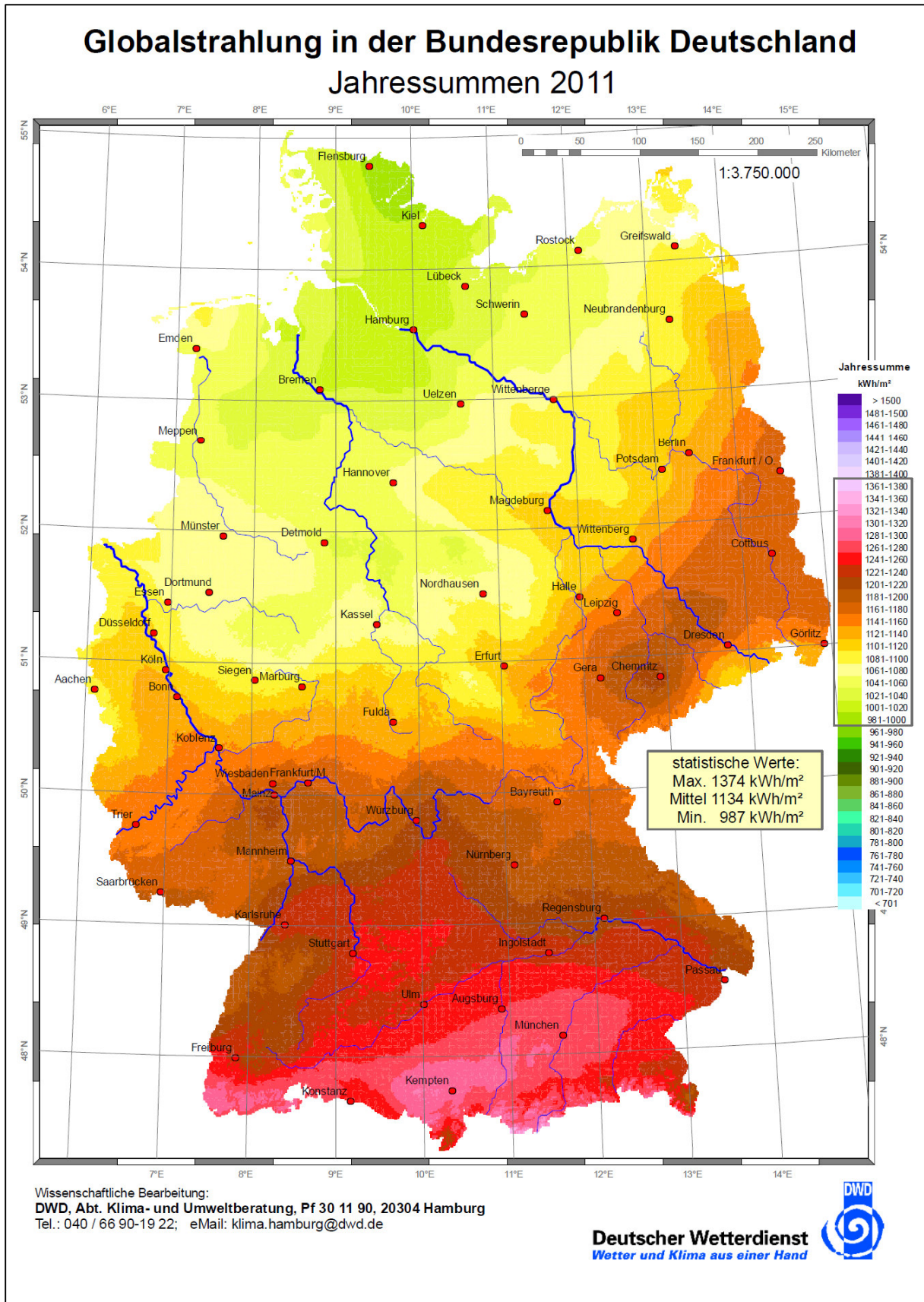




**Anhang 7: Globalstrahlung in Deutschland 2012**



**Anhang 8: Globalstrahlung in Deutschland 2011**



## Anhang 9: Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Hamburg University of Applied Sciences

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

#### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Mergenthal

Vorname: Nicole

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Analyse eines Eisspeichersystems

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

28.02.2014

Datum

Unterschrift im Original