

Hans Kramer, B.Sc.

# Entwicklung kostenoptimierter solarthermischer Systeme in Kunststoffbauweise

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

((Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau))

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

DI Thomas Ramschak

AEE Intec

Beurteiler

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hochenauer Christoph

Institut für Wärmetechnik

Graz, im April 2016

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

### *AFFIDAVIT*

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

## KURZFASSUNG

Titel: Entwicklung kostenoptimierter solarthermischer Systeme in Kunststoffbauweise

Autor: Hans Kramer

1. Stichwort: Leistungsanforderungen
2. Stichwort: Wärmegestehungskosten
3. Stichwort: Überhitzungsschutz

Thermische Kollektoren und Kollektorsysteme werden derzeit in aufwändigen und kostenintensiven Fertigungsprozessen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien mit einem vergleichsweise geringen Kunststoffanteil gefertigt. Im Projekt SolPol 4/5 wird deshalb an der Entwicklung solarthermischer Systeme mit vermehrtem Kunststoffanteil gearbeitet, um die Kosten- und Designvorteile die sich daraus ergeben, nutzbar zu machen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt nun auf der Ermittlung der Leistungsanforderungen (Temperatur-/Druckbelastungen) angepasster gepumpter solarthermischer Systeme mit hohem Kunststoffanteil sowie der Berechnung der Wärmegestehungskosten samt Kostenreduktionspotential. Hierzu wurden 6 Referenzstandorte ausgewählt und ein dazugehöriges ortsübliches solarthermisches Referenzsystem definiert, das mit bis zu 6 verschiedenen Kunststoffsystemen anhand der auftretenden Temperaturen, Drücke und Wärmegestehungskosten verglichen wird. Die Temperaturen wurden mit dem Programm SHW simuliert. Bei der Berechnung der Drücke wurden für unterschiedliche Systemkonzepte eigens entwickelte Berechnungsmethoden eingesetzt. Die Wärmegestehungskosten wurden basierend auf einer Kostenanalyse in Österreich mit Hilfe der Kapitalwertmethode ermittelt.

Da die Belastungsgrenzen von kostengünstigen Kunststoffen im Vergleich zu Metallsystemen weitaus geringer sind, ist es notwendig, in solarthermischen Systemen auf eine kunststoffgerechte Ausführung zu achten. Ein Überhitzungsschutz in Form der Rückkühlung/Hinterlüftung des Kollektors oder das Systemkonzept Drain-Back stellen wirksame Mittel dar, um den Leistungsanforderungen gerecht zu werden. Unter Berücksichtigung dieser Maßnahmen und auch anderer Faktoren, die sich durch den Einsatz von Kunststoffen ergeben, erscheint ein Kostenreduktionspotential von 50 % im Vergleich zu Metallsystemen als durchaus möglich.

## **ABSTRACT**

Title: Development of low-cost solar-thermal systems based on polymeric materials

Author: Hans Kramer

1<sup>st</sup> keyword: performance requirements

2<sup>nd</sup> keyword: heat generation costs

3<sup>rd</sup> keyword: overheat protection

Thermal collectors and collector systems are currently produced in intricate and cost-intensive processes with a low percentage of polymeric materials. The project SolPol-4/5, therefore, works on the development of solar thermal systems with a high percentage of polymeric materials in order to make use of their cost and design advantages.

The main focus of this work is to determine the performance requirements (temperature and pressure load) of the adapted pumped solar-thermal polymeric systems as well as the calculation of heat generation costs, including a potential cost reduction. Thus, six reference locations are chosen and an appropriate reference system is defined, which is compared with up to six different polymeric systems on the basis of temperature, pressure, and heat generation costs. The temperatures were calculated with the simulation program SHW. The pressure is calculated with own calculation methods. The heat generation costs are based on a cost analysis in Austria by using the net present value method.

Because of the load limits of cheap polymeric materials being much lower than the metal systems, it is necessary to ensure a proper design of solar-thermal systems from polymeric materials. Things like rear-ventilation or a back-cooler attached to the collector as well as the system concept Drain-Back are effective methods, which live up to the performance requirements of these systems. In consideration of these methods and other factors, which result from the use of polymeric materials, a cost reduction of 50 % in comparison with conventional systems seems possible.

## VORWORT

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projekts „SolPol-4/5“, das vom österreichischen Klima und Energiefond gefördert wird, während meiner Tätigkeit als Diplomand an der AEE Intec.

An dieser Stelle möchte ich beim Team der AEE Intec für die angenehme Atmosphäre und die Möglichkeit, die vorliegende Arbeit zu verfassen, bedanken.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer DI Thomas Ramschak für die umfangreiche und gute Betreuung dieser Arbeit und auch Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Streicher, der mich unter anderem bei simulationstechnischen Fragestellungen in Bezug auf das von ihm entwickelte Simulationsprogramm SHW unterstützt hat.

Ebenso möchte ich mich bei meinem Beurteiler Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christoph Hochenauer für die sehr kurzen Korrekturzeiten und wichtigen Ratschläge bedanken.

Dank gilt auch meinen Eltern, die mich während des Studiums finanziell unterstützt haben und mir immer zur Seite gestanden sind.

## Abkürzungsverzeichnis

ADG	Membranausdehnungsgefäß
AVG	arithmetischer Mittelwert
Bauhöhe <sub>ADGKoll</sub>	Höhe zwischen Ausdehnungsgefäß und Kollektor
BUS	BerechnungsUmgebungSolar
DB	Drain-Back
KS	Kunststoff
KS_DB	offenes Kunststoffsystem mit Drain-Back-Tank
KS_DB_G	geschlossenes Kunststoffsystem mit Drain-Back-Tank
KS_HL_DB	offenes Kunststoffsystem mit Hinterlüftung und Drain-Back-Tank
KS_HL_DB_G	geschlossenes Kunststoffsystem mit Hinterlüftung mit Drain-Back-Tank
KS_HL_G	geschlossenes Kunststoffsystem mit Hinterlüftung
KS_RK	geschlossenes Kunststoffsystem mit Rückkühlung
PES	Polyethersulfon
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
PVC	Polyvinylchlorid
REF	Referenzsystem
SD	solarer Deckungsgrad
Solar_RL	Rücklauf des Solarkreislaufs
Solar_VL	Vorlauf des Solarkreislaufs
Switch	Pumpenstatus
T-Kol_a	Kollektoraustrittstemperatur
T-Kol_m	Kollektormitteltemperatur
T-Solar_RL	Temperatur des Rücklaufs
T-Solar_VL	Temperatur des Vorlaufs
T-Sp_m	Temperatur der mittleren Speicherschicht
T-Sp_o	Temperatur der obersten Speicherschicht
T-Sp_u	Temperatur der unteren Speicherschicht
T-WT_aus	Temperatur des Wärmetauscheraustritts

T-WT <sub>ein</sub>	Temperatur des Wärmetauschereintritts
U	Wärmedurchgangskoeffizient
WT	Wärmetauscher
WW	Warmwasser
$A_{Koll}$ [m <sup>2</sup> ]	Aperturfläche des Kollektors
$A_t$ [€]	jährliche Betriebskosten
$c_0$ [-]	Konversionsfaktor
$c_1$ [W/m <sup>2</sup> K]	linearer Wärmeverlustkoeffizient
$c_2$ [W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ]	quadratischer Wärmeverlustkoeffizient
$d_{Sp}$ [m]	Durchmesser des Speichers
$f_0$ [-]	Korrekturfaktor für thermotrope Schichten
$f_1$ [-]	Korrekturfaktor für Rückkühlung/Hinterlüftung
$i$ [-]	Realzinssatz
$I_0$ [€]	Investitionssumme
$I_G$ [W]	Globalstrahlung
$L_{RLDB}$ [m]	Länge aller Rohrleitungen zwischen Höhenniveau des DB-Tanks und Kollektors
$n$ [-]	wirtschaftliche Nutzungsdauer
$p_0$ [bar]	Gefäßvordruck
$p_{ADG}$ [bar]	Druck im Ausdehnungsgefäß
$p_{DBT}$ [bar]	Druck im Drain-Back-Tank
$p_e$ [bar]	Anlagenenddruck am Sicherheitsventil
$p_{füll}$ [bar]	Fülldruck der Anlage
$p_K$ [bar]	Druck im Kollektor
$\dot{Q}_{abst}$ [W]	vom Kollektor abgegebene Wärmestrahlung
$\dot{Q}_{Koll}$ [W]	aufgenommene Wärmeleistung des Kollektors
$\dot{Q}_{konv}$ [W]	abgegebene Wärmeleistung des Kollektors durch Konvektion
$\dot{Q}_{re,abs}$ [W]	vom Kollektor reflektierte Wärmeleistung
$Q_t$ [kWh]	solarer Nutzwärmeertrag
$RuD$ [m]	Rohrlänge unter Dampf
$s_{Wand}$ [m]	Speicherwanddicke
$t$ [-]	Jahr der Nutzungsperiode

$T_a$	[°C]	Außentemperatur
$T'_a$	[°C]	Himmelstemperatur
$\bar{T}_{Abs}$	[°C]	Temperatur des Absorbers
$T_{Abs,fl}$	[°C]	mittlere Temperatur der Kollektorflüssigkeit
$T_B$	[°C]	Temperatur im Betrieb
$T_{füll}$	[°C]	Fülltemperatur der Anlage
$T_k$	[°C]	Flüssigkeitstemperatur bei Stagnation
$T_{Max}$	[°C]	maximal zulässige Temperatur des Ausdehnungsgefäßes
$T_{Stag}$	[°C]	Siedetemperatur des Wärmeträgermediums bei Fülldruck im Kollektor
$T_V$	[°C]	maximale Temperatur der Flüssigkeit im MAG
$U_{Koll}^*$	[W/m <sup>2</sup> K]	mittlerer Wärmeverlustkoeffizient des Kollektors für konvektive und Leitungsverluste
$V_0$	[l]	Luftvolumen des DB-Tanks im entleerten Zustand
$V_{ADG}$	[l]	Volumen des Ausdehnungsgefäßes
$V_B$	[l]	Luftvolumen des DB-Tanks im Betrieb
$V_F$	[l]	Volumen des Wärmeträgers im Solarkreislauf
$V_{füll}$	[l]	Volumen der Anlage bei Fülltemperatur
$V_G$	[l]	Volumen des gesamten Solarkreislaufs
$V_{RLDB}$	[l]	Volumen der Rohrleitungen zwischen Höhenniveau des DB-Tanks und des Kollektors
$V_V$	[l]	Flüssigkeitsvorlage des Ausdehnungsgefäßes
$WGK$	[€/kWh]	Wärmegestehungskosten
$\alpha_{Abs}$	[-]	Absorptionskoeffizient des Absorbers
$\varepsilon_{Abs}$	[-]	Emissionskoeffizient des Absorbers
$\eta_{Koll}$	[-]	Kollektorwirkungsgrad
$\lambda_{Wand}$	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit der Speicherwand
$\lambda_{Wasser}$	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des Wassers
$\rho_F$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Wärmeträgermediums im Solarkreislauf
$\rho_{füll}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte bei Fülltemperatur des Wärmeträgermediums
$\sigma$	[W <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\tau_{Abd}$	[-]	Transmissionskoeffizient der Abdeckung

# INHALTSVERZEICHNIS

<b><u>1</u></b>	<b><u>EINLEITUNG</u></b>	<b><u>11</u></b>
1.1	Das Projekt SolPol-4/5	11
1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	11
1.3	Methodik	12
<b><u>2</u></b>	<b><u>GRUNDLAGEN</u></b>	<b><u>13</u></b>
2.1	Sonnenenergie	13
2.2	Zwangsumlaufsystem	14
2.3	Energiebilanz eines Flachkollektors	19
2.4	Stagnation	21
<b><u>3</u></b>	<b><u>POLYMERWERKSTOFFE</u></b>	<b><u>22</u></b>
3.1	Grundlagen	22
3.2	Kunststoffkollektor	24
3.3	Kunststoffspeicher	25
<b><u>4</u></b>	<b><u>KOSTENANALYSE</u></b>	<b><u>28</u></b>
4.1	Konventionelle Systeme	28
4.2	Kunststoffsysteme	34
<b><u>5</u></b>	<b><u>REFERENZSYSTEME</u></b>	<b><u>38</u></b>
5.1	Auswahl der Referenzstandorte	38
5.2	Klimadaten an den Referenzstandorten	39
5.3	Beschreibung der Referenzanlagen	42
<b><u>6</u></b>	<b><u>SYSTEME IN KUNSTSTOFFGERECHTER AUSFÜHRUNG</u></b>	<b><u>51</u></b>
6.1	Drain-Back-System	52

6.2	Rückkühlung/Rückkühler	53
6.3	Hinterlüftung	56
6.4	Kunststoffsysteemkonzepte	59
6.5	Tagesverläufe	63
6.6	Bestimmung der Kollektorfläche in Kunststoffausführung	70
<b>7</b>	<b><u>WÄRMEGESTEHUNGSKOSTEN</u></b>	<b>75</b>
7.1	Wärmegestehungskosten ohne kunststoffspezifische Kostenreduktionen	76
7.2	Wärmegestehungskosten mit kunststoffspezifischen Kostenreduktionen	82
<b>8</b>	<b><u>TEMPERATURBELASTUNGEN</u></b>	<b>89</b>
8.1	Temperaturbelastungen des Referenzsystems zur WW-Bereitung in Graz	90
8.2	Temperaturbelastungen der KS-Systeme zur WW-Bereitung in Graz	92
8.3	Temperaturbelastungen des Referenz-Kombi-Systems in Graz	93
8.4	Temperaturbelastungen der KS-Kombi-Systeme in Graz	95
<b>9</b>	<b><u>DRUCKBELASTUNGEN</u></b>	<b>96</b>
9.1	Druckbelastungen geschlossener Systeme	96
9.2	Druckbelastungen offener Systeme	108
9.3	Zusammenfassung der Druckbelastungen aller Systeme in Graz	109
<b>10</b>	<b><u>ZUSAMMENFASSUNG</u></b>	<b>112</b>
	<b><u>LITERATUR</u></b>	<b>116</b>
	<b><u>ANHANG</u></b>	<b>119</b>
	<b><u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</u></b>	<b>134</b>
	<b><u>TABELLENVERZEICHNIS</u></b>	<b>139</b>

## **1 EINLEITUNG**

### **1.1 Das Projekt SolPol-4/5**

Solarthermische Systeme werden momentan mittels kostenintensiver Prozesse unter Verwendung von Materialien, die meist nicht aus Kunststoff bestehen, hergestellt. Um diese Ressourcen (z.B. Kupfer, Aluminium), die nur begrenzt zur Verfügung stehen zu schonen, entstand die Idee, solarthermische Anlagen aus Kunststoff zu fertigen, die zudem ein großes Potential in Funktionalität und Design aufweisen. Gleichzeitig könnte die Wettbewerbsfähigkeit durch reduzierte Kosten verbessert werden, was zu einer größeren Marktpenetration führen würde. Untermauert werden diese Argumente, durch die Einführung von Polymermaterialien in der Automobil-, Elektro- und Bauindustrie.

Bei SolPol handelt es sich nun um ein Forschungsprojekt über solarthermische Systeme in Kunststoffbauweise, das seinen Beginn im Jahr 2009 mit SolPol-1 fand und sich mit den Anforderungen von Solarsystemen aus Kunststoff und der Beurteilung einer möglichen Marktpenetration beschäftigte. Aufbauend auf den Ergebnissen des vorangegangenen Projekts wurde SolPol-2 ins Leben gerufen, dessen Fokus auf der Entwicklung von unterschiedlichen Solarkollektoren für druckbehaftete Systeme und drucklosen Drain-Back-Systemen lag. Mit SolPol-4/5, in das auch die vorliegende Arbeit eingebunden ist, liegt nun der Schwerpunkt auf der Entwicklung marktfähiger, gepumpter und nichtgepumpter Systeme aus Kunststoff oder im Hybriddesign, wobei man bei gepumpten Systemen eine Kostenreduktion von bis zu 50% gegenüber konventionellen Solaranlagen anstrebt.

### **1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Arbeitspakets 1 des Projekts Solpol-4/5 in Zusammenarbeit mit der AEE Intec durchgeführt. Ziel dieses Arbeitspakets ist die Entwicklung kostenoptimierter solarthermischer Systeme mit hohem Kunststoffanteil sowie die Bestimmung der Leistungsanforderungen der jeweiligen Komponenten des Systems. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Ermittlung der thermischen Belastungen, Druckbelastungen und der Kosten von gepumpten Systemen. Die Ergebnisse sollen als Grundlage für die Auswahl geeigneter Kunststoffe und für weitere Entwicklungen im Projekt „SolPol“ dienen sowie Potentiale für die Kostenreduktion offenlegen.

### **1.3 Methodik**

Im ersten Schritt wurde eine Kostenanalyse konventioneller Warmwasser- (WW) und Kombi-Systeme durchgeführt. Die Daten basieren dabei auf österreichischen Förderanträgen real umgesetzter Anlagen.

Im nächsten Schritt wurden nach einer Marktrecherche Referenzstandorte ausgewählt und passende Referenzsysteme definiert. Danach wurde eine erste Simulationsreihe mit dem Simulationsprogramm SHW durchgeführt, um einen Überblick über die in den Referenzsystemen auftretenden Temperaturen zu erhalten. Im Hinblick darauf wurden vier Kunststoffsystemkonzepte ausgearbeitet, die mit unterschiedlichen Mechanismen ausgestattet sind, um den ermittelten Temperaturen und auch den erwartenden Drücken standhalten zu können.

Die vier Kunststoffsysteme wurden danach ebenfalls mit SHW simuliert und die Temperaturbelastungen ausgewertet.

Für die Berechnung der Druckbelastungen wurden noch zwei zusätzliche Kunststoffsysteme definiert.

Die Druckbelastungen aller Systeme wurden anhand der ermittelten Temperaturen in Excel über eine eigene Funktion berechnet.

Mittels der Simulationsergebnisse aller Systeme an allen Standorten und der Kostenanalyse konnten weiterführend auch die Wärmegestehungskosten aller Systeme berechnet werden.

## 2 GRUNDLAGEN

In den folgenden Unterkapiteln werden wichtige Grundlagen und Begriffe dieser Arbeit behandelt.

### 2.1 Sonnenenergie

Bei der Sonnenstrahlung die auf die Erde trifft, handelt es sich um elektromagnetische Wellen deren Ursprung Kernfusionsprozesse von Wasserstoffatomen zu Helium bilden. Die riesige Leistung die dabei pro Quadratmeter auf den Außenrand der Erdatmosphäre trifft, beträgt im Mittel  $1367 \text{ W/m}^2$  und wird als Solarkonstante bezeichnet. Die geringere, schlussendlich direkt auf die Erdoberfläche auftreffende Strahlung wird Globalstrahlung genannt und unterteilt sich in Direktstrahlung und Diffusstrahlung (siehe Abbildung 2-1). Unter Direktstrahlung versteht man das Sonnenlicht, dass ohne Umlenkung auf die Erde auftrifft, wo hingegen Diffusstrahlung, jener Teil der Sonnenstrahlung ist, der an Partikeln in der Atmosphäre gestreut wird. Je nach Tageszeit, Bewölkung, Standort und Höhenlage variiert die Globalstrahlung stark. (Brandstetter et al, 2004)

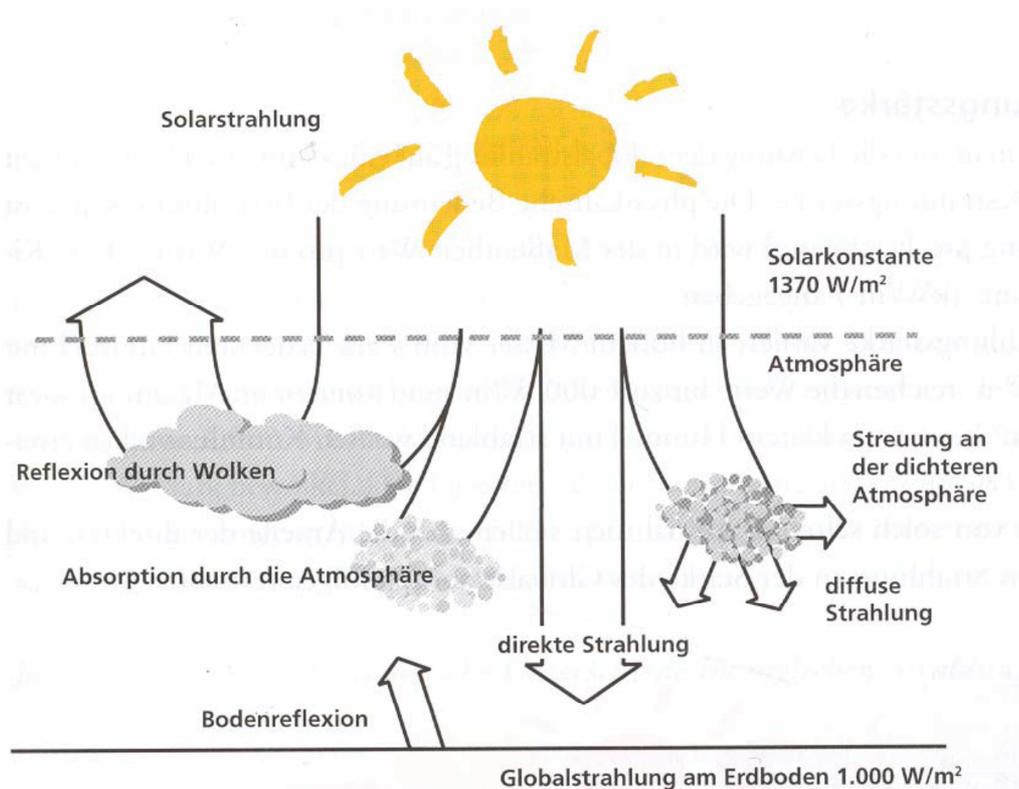


Abbildung 2-1: Vorgänge beim Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre (Brandstetter et al, 2004)

In der nachfolgenden Abbildung 2-2 sind die mittleren Globalstrahlungssummen auf die horizontale Fläche für ein Jahr weltweit ersichtlich. Sie betragen im Schnitt zwischen 800 und 2200 kWh/m<sup>2</sup>a. In Österreich liegen die Werte zwischen 1000 und 1400 kWh/m<sup>2</sup>a.

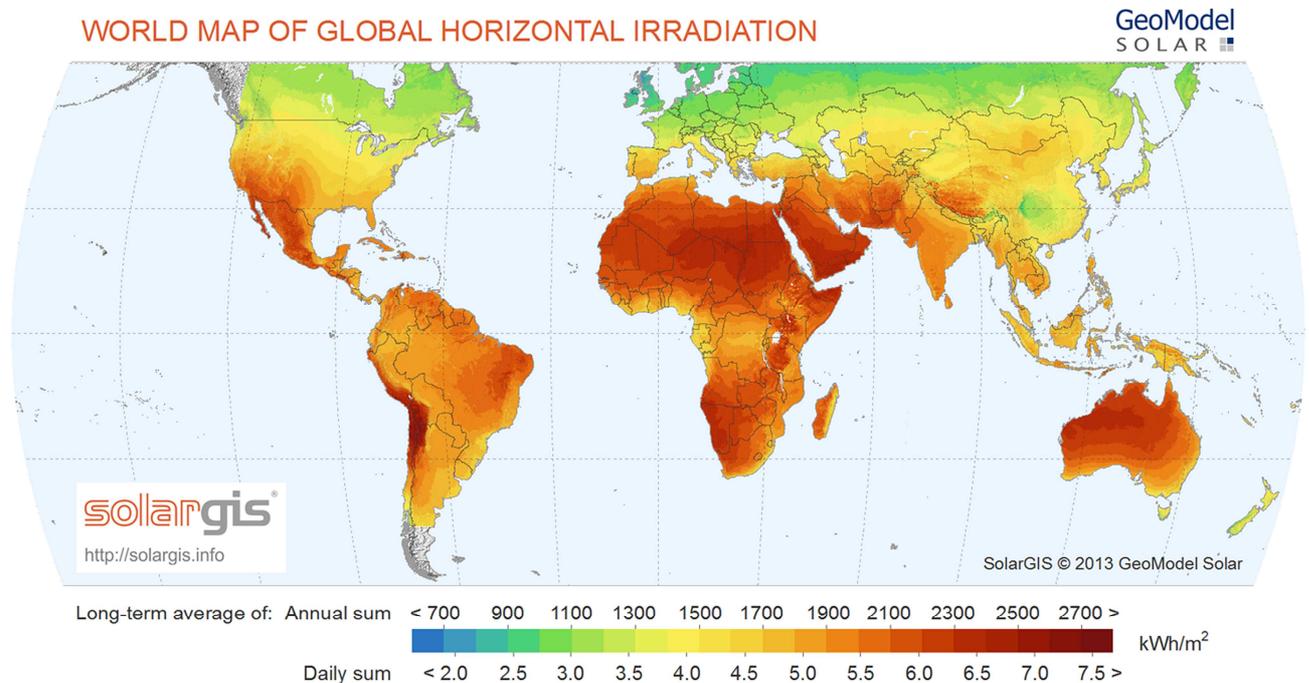


Abbildung 2-2: Jahressumme der Globalstrahlung auf die horizontale Fläche weltweit  
(<http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI>; 14.07.2015)

## 2.2 Zwangsumlaufsystem

Die von der Sonne ausgestrahlte Energie, kann beispielsweise über einen Sonnenkollektor, der in ein Hydrauliksystem mit Zwangsumlauf (gepumptes System) integriert ist, nutzbar gemacht werden.

Im Kollektor wird die einfallende Sonnenstrahlung in Wärme umgewandelt und an ein Wärmeträgermedium weitergegeben. Die Pumpe leitet das Trägermedium durch die Rohrleitungen zum Speicher, wo der Wärmeaustausch stattfindet. Das im Speicher erwärmte Wasser steht nun zur Entnahme für Warmwasser und/oder Raumheizung bereit. Reicht die Wärme aus dem Solarkreislauf nicht aus, kann das Wasser im Speicher mittels Nachheizung weiter erwärmt werden.

Ausgehend von Abbildung 2-3 werden die Komponenten eines solchen Zwangsumlaufsystems näher beschrieben.

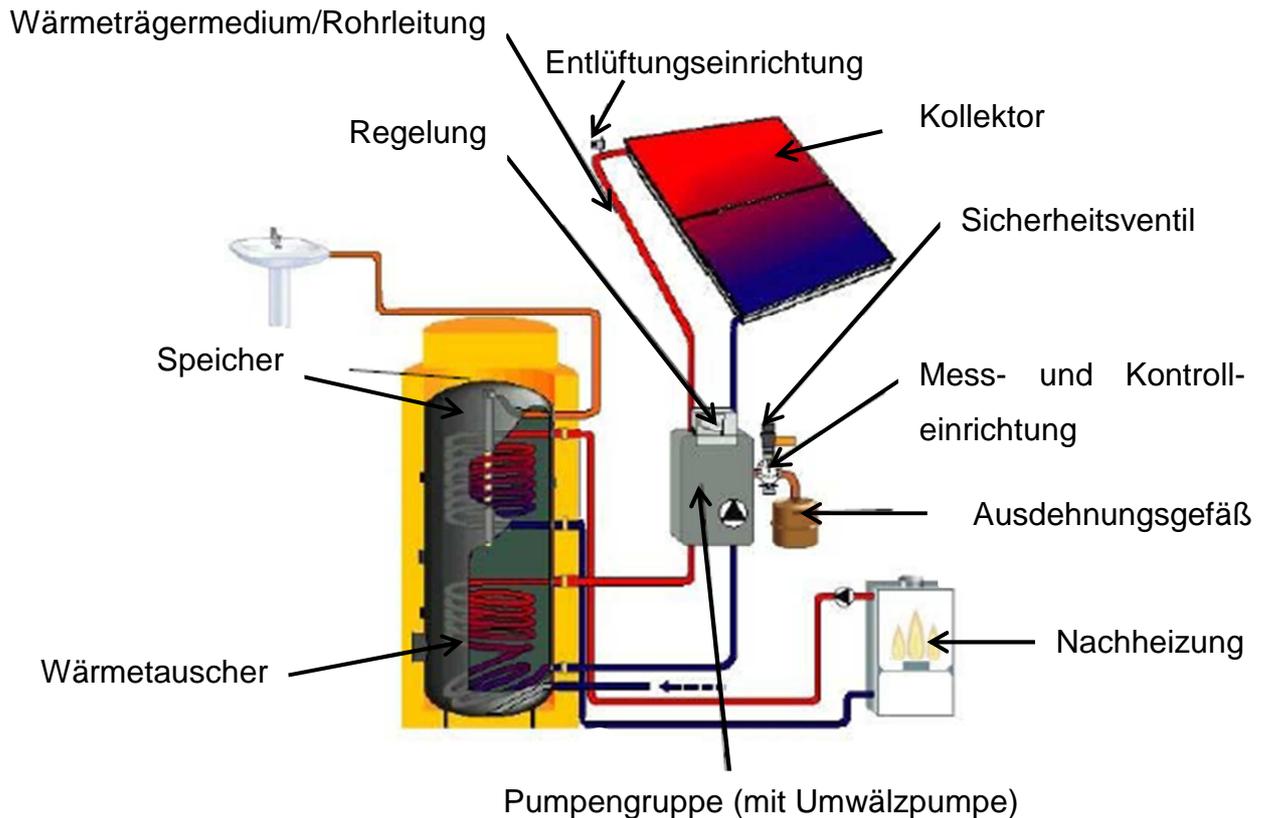


Abbildung 2-3: Hydraulikschema einer solarthermischen Warmwasserbereitungsanlage mit Umwälzpumpe (Brandstetter et al, 2004)

### Pumpengruppe:

Die Pumpengruppe oder auch Solarstation genannt, besteht im Allgemeinen aus:

- Rückschlagventil: verhindert eine Selbstentladung des Systems in der Nacht
- Mengenregulierungsventil: Regulation des Volumenstroms um eine optimale Energieausbeute zu erreichen
- Absperrarmatur: dient zum Sperren der Rohrleitung (Füll- und Entleervorgänge)
- Umwälzpumpe: zur Förderung des Wärmeträgermediums

Die Umwälzpumpe muss den Strömungswiderstand, verursacht durch Rohrleitungen und Ventile, überwinden können. Je nach Volumenstrom unterscheidet man zwischen „High-Flow“ (20-70 l/m<sup>2</sup>h) und „Low-Flow“ (5-20 l/m<sup>2</sup>h). Die Simulationen der WW-Systeme richten sich nach dem „High-Flow“-Prinzip. Die Simulationen der Kombi-Anlagen stützen sich auf das „Low-Flow“-Prinzip.

## Regelung:

Die Aufgabe der Regelung ist es, die Pumpen und Ventile so zu steuern, dass eine möglichst hohe Energieausbeute erreicht wird und der Nachheizbedarf auf ein Minimum reduziert wird.

In Abbildung 2-4 ist das Schema einer Einkreisregelung (Temperaturdifferenzregelung) für den Solarkreislauf zu sehen. Mit Beginn des Tages heizt sich der Kollektor (blaue Linie) je nach Einstrahlung mehr oder weniger schnell auf, bis die voreingestellte Startdifferenz (übliche Werte liegen im Bereich von 5-10 K, für die Simulationen wurde ein Wert von 6 K gewählt) zwischen Kollektor- und Speichertemperatur (rote Linie) erreicht wird. Zur Bestimmung der Differenz ist jeweils am Kollektorausstritt und in Höhe des Solarkreiswärmetauschers im Speicher ein Temperaturfühler platziert, deren Werte von der Regelung gegeneinander abgeglichen werden. Ist die voreingestellte Temperaturdifferenz erreicht, schaltet die Regelung die Pumpe ein. Verbunden mit dem Einschalten der Pumpe ist ein Abfall der Kollektortemperatur, da sich noch kaltes Wärmeträgermedium in den Rohrleitungen befindet. Befindet sich der gesamte Kreislauf auf Temperatur, steigt die Kollektortemperatur durch die stärker werdende Globalstrahlung weiter an, bis sie um die Mittagszeit ihr Maximum erreicht und wieder zu sinken beginnt. Bei Erreichen einer voreingestellten Ausschalthysterese von 2-3 K (für die Simulation wurden 2 K gewählt), wird die Pumpe ausgeschaltet. Der Kollektor kühlt gegen die Umgebung aus, während die Temperatur des Warmwasserspeichers langsamer abfällt, da sich der Speicher im Gebäude befindet.

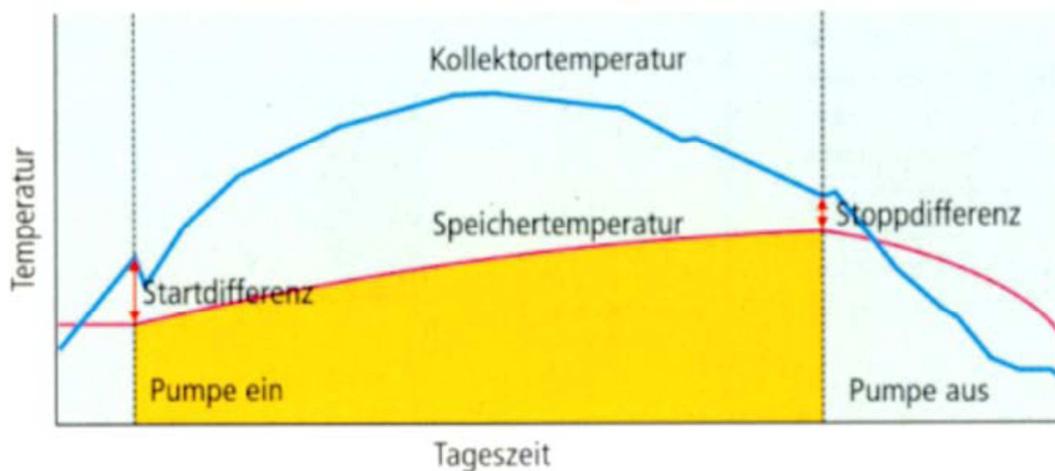


Abbildung 2-4: Hysterese beim Ein- und Ausschalten der Pumpe (Brandstetter et al, 2004)

### Flachkollektor:

In diesem Abschnitt wird der Flachkollektor anhand von Abbildung 2-5 beschrieben.

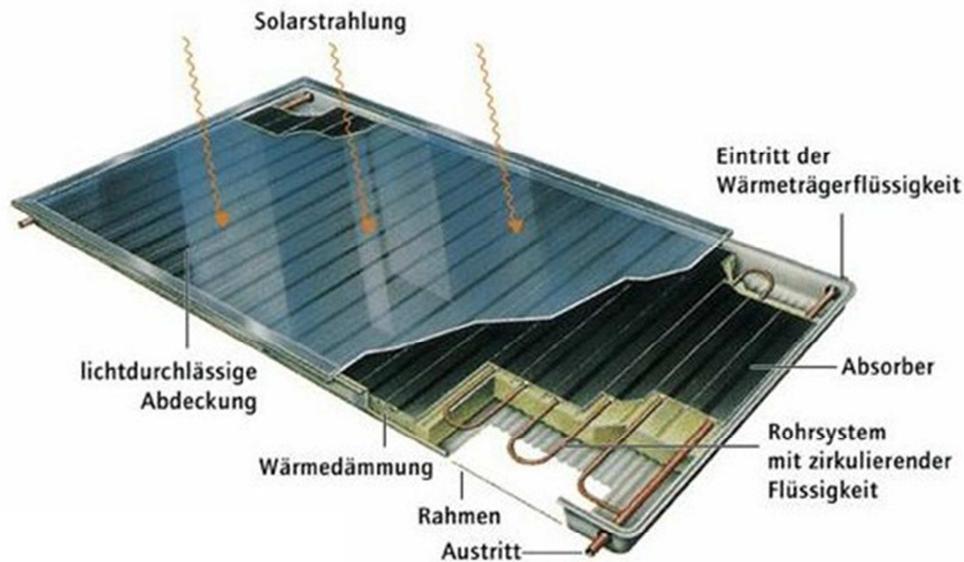


Abbildung 2-5: Aufbau eines Flachkollektors (<http://www.kaufmann-heizung.de/content/52/53/info;>  
14.07.2015)

Der Flachkollektor besteht aus einem Gehäuse, dessen Aufgabe es ist, die einzelnen Komponenten zusammenzuhalten. Um die Wärmeverluste so gering wie möglich zu halten, werden Rück- und Seitenwände mit einer dementsprechenden Wärmedämmung (z.B. aus Mineralfaserdämmstoff) versehen. Direkt auf der Rückwanddämmung befindet sich der Absorber und die darin eingebettet, serpentin-, oder streifenförmig angeordneten Absorberröhren, in denen das Wärmeträgermedium zirkuliert. Der Absorber besteht meist aus Kupfer, Aluminium oder Edelstahl. Der Absorber wandelt die durch das Solarglas (lichtdurchlässige Abdeckung) einfallende Strahlung in Wärme um und gibt die Energie an das Wärmeträgermedium weiter. Um die Wärmeübergabe so effizient wie möglich zu gestalten, kommen hierfür selektive Beschichtungen (auf dem Absorber) zum Einsatz, die neben einem hohen Absorptionsgrad auch einen geringen Emissionsgrad aufweisen.

Die Aufgabe des Solarglases (lichtdurchlässige Abdeckung) ist es einerseits möglichst viel der kurzwelligigen Strahlung durchzulassen (ca. 91%) und andererseits den Austritt von Wärmestrahlung zu verhindern, sowie den Absorber vor Witterungseinflüssen zu schützen. (Brandstetter et al., 2004)

### Ausdehnungsgefäß (ADG):

Das Ausdehnungsgefäß dient zur Reduzierung des Druckanstieges bei einer Volumsänderung der Flüssigkeit (Flüssigkeitsdehnung, Dampfbildung) im Solarkreislauf durch Temperaturzu- und -abnahme und schützt dadurch die Systemkomponenten vor Schäden.

### Sicherheitsventil:

Das Sicherheitsventil dient zur Absicherung der Anlage, wenn es aufgrund einer Störung zu einem unkontrollierten Druckanstieg kommt, der durch das Ausdehnungsgefäß nicht ausgeglichen werden kann.

### Wärmeträgermedium:

Die Aufgabe des Wärmeträgermediums ist es die vom Absorber aufgenommene Wärme aufzunehmen und zum Wärmetauscher zu transportieren. Gängige Wärmeträgermedien sind Wasser-Propylenglykol-Gemische, die als Frost- und Korrosionsschutz dienen.

### Rohrleitungen:

Die Rohrleitungen bilden die Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten. Wichtige Eigenschaftsmerkmale sind: Temperaturbeständigkeit (auch für Minusgrade), Druckbeständigkeit, Flexibilität und Beständigkeit gegenüber dem Wärmeträgermedium. Standardmäßig werden Kupfer-, Stahl- und Edelstahlrohre eingesetzt.

### Wärmetauscher:

Dient hier zur Übertragung der Energie mit möglichst geringen Temperaturdifferenzen zwischen dem Wärmeträgermedium des Primärkreislaufs und dem im Speicher vorhandenen Heizungs-/Brauch-/Trinkwasser.

### Speicher:

Da Energieangebot und Wärmebedarf selten übereinstimmen, ist es notwendig, die vom Kollektor eingefangene Energie bis zu ihrer Nutzung so verlustfrei wie möglich zu speichern. Bei geschlossenen Systemen werden Speicher meist aus Stahl und Edelstahl (Korrosionsschutz) eingesetzt. Es sind jedoch auch Kunststoffspeicher am Markt erhältlich.

## 2.3 Energiebilanz eines Flachkollektors

In Kapitel 2.2 wurden der Aufbau und die Funktionsweise eines Flachkollektors bereits beschrieben. In diesem Abschnitt werden die Energieflüsse anhand von Abbildung 2-6 näher erläutert.

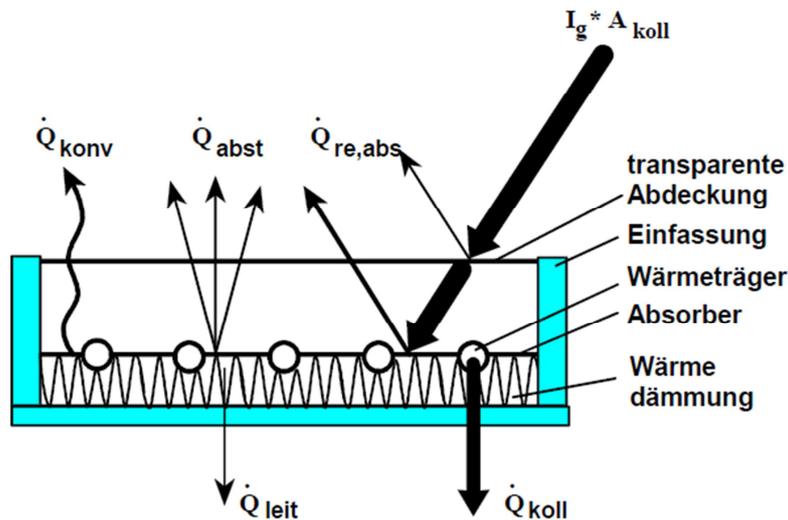


Abbildung 2-6: Schematischer Aufbau und Energieflüsse eines Sonnenkollektors (Streicher et al, 2014)

### Wärmeverluste:

- Unter  $\dot{Q}_{re,abs}$  sind die Wärmeverluste zusammengefasst, die durch die Reflexion der gesamt einfallenden Strahlung  $I_G \cdot A_{Koll}$  an der Abdeckung und am Absorber auftreten.
- $\dot{Q}_{abst}$  ist die vom heißen Absorber abgegebene langwellige Strahlung und ist nach dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz definiert.
- $\dot{Q}_{konv}$  bezeichnet den Wärmeverlust an die Umgebung durch Konvektion.
- $\dot{Q}_{leit}$  steht für die an der Kollektorrückwand abgegebene Wärme.

Durch Abzug der Wärmeverluste von der einfallenden Strahlung ergibt sich die vom Kollektor aufgenommene Wärmeleistung ( $\dot{Q}_{Koll}$ ) zu:

$$\dot{Q}_{Koll} = I_G \cdot A_{Koll} - \dot{Q}_{re,abs} - \dot{Q}_{abst} - \dot{Q}_{konv} - \dot{Q}_{leit} \quad (\text{Gl. 2-1})$$

Der Wirkungsgrad des Kollektors ergibt sich zu:

$$\eta_{Koll} = \frac{\dot{Q}_{Koll}}{I_G \cdot A_{Koll}} = \tau_{Abd} \cdot \alpha_{Abs} - \frac{U_{Koll}^* \cdot (\bar{T}_{Abs} - T_a)}{I_G} - \frac{\varepsilon_{Abs} \cdot \sigma \cdot (\bar{T}_{Abs}^4 - T_a'^4)}{I_G} \quad (Gl.2-2)$$

Durch Modifikation von Gleichung 2-2 erhält man schlussendlich die Wirkungsgradkennlinie des Kollektors:

$$\eta_{Koll} = c_0 - c_1 \cdot \frac{(T_{Abs,fl} - T_a)}{I_G} - c_2 \cdot \frac{(T_{Abs,fl} - T_a)^2}{I_G} \quad (Gl.2-3)$$

- $c_0[-]$  Konversionsfaktor (maximaler Wirkungsgrad des Kollektors bei  $\bar{T}_{Abs,fl}=T_a$ )
- $c_1[W/m^2K]$  linearer Wärmeverlustkoeffizient
- $c_2[W/m^2K^2]$  quadratischer Wärmeverlustkoeffizient, Annäherung an die realen Strahlungsverluste
- $T_{Abs,fl}[^\circ C]$  mittlere Temperatur der Kollektorflüssigkeit
- $T_a[^\circ C]$  Außentemperatur
- $I_G[W/m^2]$  Globalstrahlung

In Abbildung 2-7 ist die Änderung des Wirkungsgrades  $\eta_{Koll}$  mit der Temperaturdifferenz  $T_{Abs,fl}-T_a$  zu sehen. Die Wirkungsgradkennlinie ist in schwarz eingezeichnet. Die Fläche darunter gibt den vom Kollektor aufgenommene Wärmeanteil an. Darüber sind die durch die Koeffizienten  $c_0$ ,  $c_1$  und  $c_2$  verursachten Verluste grafisch dargestellt.

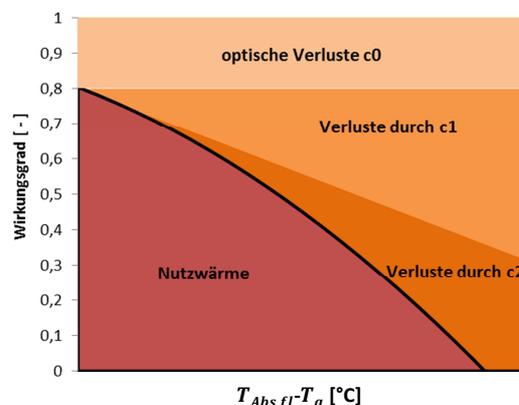


Abbildung 2-7: schematische Darstellung der Wirkungsgradkennlinie

### 2.4 Stagnation

Von Stagnation spricht man wenn die Pumpe des Solarkreislaufs nicht in Betrieb ist, sich der Absorber durch Einstrahlung aber weiterhin erwärmt.

Bei entsprechender Einstrahlung kann der Kollektor Temperaturen erreichen, die über dem Siedepunkt des Wärmeträgermediums bei gegebenem Druck liegen, wodurch es zur Dampfbildung im Kollektor kommt. Der entstehende Dampf drückt dabei die Flüssigkeit in das Ausdehnungsgefäß, wodurch sich der Systemdruck erhöht. Je schlechter das Entleerungsverhalten des Kollektors, d.h. je mehr Flüssigkeit im Kollektor zurückbleibt, desto mehr Dampf wird gebildet, umso höher sind die erreichten Drücke und umso weiter kann der Dampf zu temperaturempfindlichen Komponenten vordringen und diese schädigen. Um die Dampfbildung so kurz wie möglich zu gestalten, ist auf die Vermeidung von Flüssigkeitssäcken bei der Kollektorauslegung zu achten. Stagnation kann je nach Einstrahlung und Überhitzungsschutzmechanismus mehrere Stunden andauern. Es können, je nach Effizienz des Kollektors, Spitzentemperaturen von bis zu 200 °C erreicht werden. (Hausner & Fink, 2003)

Abbildung 2-8 zeigt den Druckverlauf während der Stagnation für Kollektoren mit unterschiedlich gutem Entleerungsverhalten, unterteilt in 5 verschiedene Phasen. Phase 1 beginnt mit dem Ausschalten der Pumpe. Bei einer andauernden hohen Einstrahlung auf den Kollektor erhöht sich die Temperatur im Solarkreislauf, das Wärmeträgermedium dehnt sich aus und der Druck nimmt langsam zu. In Phase 2 kommt es erstmalig zur Dampfbildung, wodurch das Wärmeträgermedium in das Ausdehnungsgefäß gedrückt wird und der Druck rapide ansteigt. In den ersten beiden Phasen spielt das Entleerungsverhalten des Kollektors noch eine untergeordnete Rolle, was man auch anhand der geringen Abweichungen der Druckverläufe erkennt. In Phase 3 beginnt nun die restliche Flüssigkeit im Kollektor zu verdampfen. Je mehr Restflüssigkeit dabei im Kollektor zurückbleibt, desto mehr Dampf kann gebildet werden und umso höher steigt der Druck an. Wie viel Restflüssigkeit zurückbleibt wird vom Entleerungsverhalten bestimmt. Bei sehr gutem Entleerungsverhalten ist die Druckspitze recht gering und liegt bei den entsprechenden Rahmenbedingungen bei ca. 3,25 bar. Bei schlecht entleerendem Kollektor kann das Druckmaximum hingegen weit höher liegen (hier: 4,25 bar) und benötigt auch mehr Zeit, um wieder abgebaut zu werden. In Phase 4 ist ein Großteil der Restflüssigkeit bereits verdampft und der Druck nimmt weiter ab. Hier nähern sich auch die Druckverläufe wieder einander an. In Phase 5 unterschreitet schlussendlich auch die Temperatur im Kollektor bei sinkender

Einstrahlung die Siedetemperatur, wodurch auch das restliche sich im Kollektor befindliche Dampfvolumen kondensiert und der Druck wieder auf sein Ausgangsniveau absinkt.

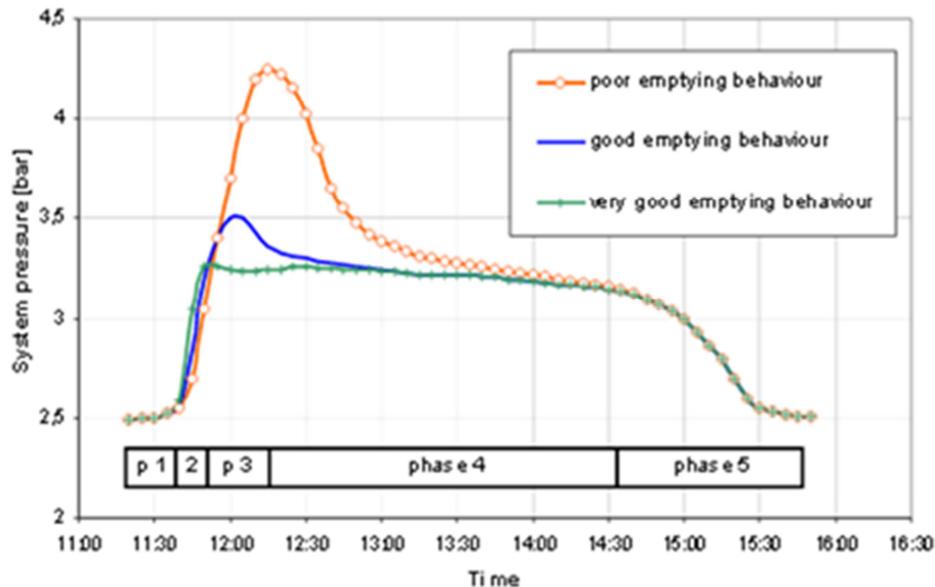


Abbildung 2-8: Systemdruck während der Stagnation bei unterschiedlichen Entleerungsverhalten (Hausner & Fink, 2003)

### 3 POLYMERWERKSTOFFE

#### 3.1 Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf Polymerwerkstoffe und ihrem Einsatz in solarthermischen Anwendungen näher eingegangen.

Kunststoffe sind synthetisch hergestellte organische Materialien, die aus Erdgas und Erdöl gewonnen werden und meist aus Makromolekülen bestehen. Diese Makromoleküle (Polymere) sind aus sich wiederholenden Struktureinheiten (Monomere) aufgebaut, die mittels Polymerisation verkettet werden. Sie zeichnen sich durch, chemische Beständigkeit sowie Verformbarkeit aus und eignen sich als elektrische Isolatoren oder zur Wärmedämmung. Mit ihrem geringen Gewicht (Dichte zwischen 0,8 und 2,2 g/cm<sup>3</sup>) sind sie um ein Vielfaches leichter als Metalle.

Kunststoffe unterteilen sich entsprechend ihrer physikalischen Eigenschaften in drei große Gruppen:

- Thermoplaste: ihre Verformbarkeit verändert sich mit der Temperatur

- Duroplaste: es handelt sich um Flüssigharz, das unter Hitzeeinwirkung oder Wärmestrahlung durch Vernetzung der Makromoleküle erhärtet und seine Form beibehält
- Elastomere: zeichnen sich durch sehr hohe Elastizität und Flexibilität aus

Der Gesamtkunststoffverbrauch belief sich 2010 auf rund 265 Millionen Tonnen. 74 % davon ist auf Thermoplaste zurückzuführen, die für den Einsatz in solarthermischen Anlagen interessant sind. (Köhl et al, 2012) Abbildung 3-1 zeigt die Einteilung von Thermoplasten anhand einer Pyramide. Es wird differenziert zwischen Standardkunststoffen, die Temperaturen von bis zu 100 °C standhalten können, technische Kunststoffen mit einem Temperaturbereich von 100-150 °C und Hochleistungskunststoffen, die auch bei Temperaturen über 150 °C noch eingesetzt werden können. Mit zunehmender Temperaturbeständigkeit steigen allerdings auch die Kosten des Werkstoffes an. Standardkunststoffe mit bekannten Vertretern wie Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylenterephthalat (PET) sind bereits für unter 2 €/kg erhältlich. Hochleistungskunststoffe wie Polyphenylensulfid (PPS) und Polyethersulfon (PES) beginnen ab 4 €/kg, wobei hier aber Preise von 10 €/kg und mehr möglich sind. Gruppenübergreifend kann bei Thermoplasten noch zwischen amorphen (Atome bilden ungeordnete Strukturen) und semikristallinen Aufbau unterschieden werden.

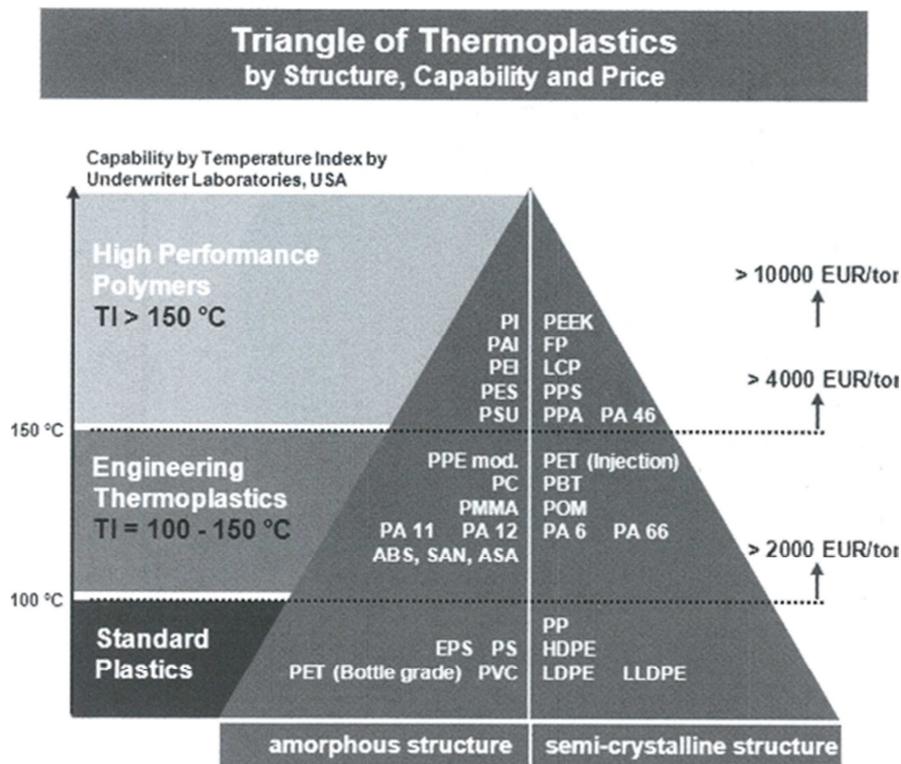


Abbildung 3-1: Polymerpyramide (Köhl et al, 2012)

### 3.2 Kunststoffkollektor

In konventionellen Kollektoren mit einem durchschnittlichen Gewicht von 20 kg/m<sup>2</sup> liegt der Anteil an Kunststoff bei 0,5 kg/m<sup>2</sup>. Aus kürzlichen Entwicklungen ist allerdings ein Trend zu mehr Kunststoff erkennbar. Gründe dafür sind die dadurch gewonnene Kosten- und Gewichtsreduktion als auch die erhöhte Flexibilität und erleichterte Fertigung.

Durch die starken Temperaturanforderungen die an das Absorbermaterial gestellt werden, gibt es nur wenige Kollektoren die mit Kunststoffabsorbern ausgestattet sind. Den hohen Temperaturen (vor allem während der Stagnation) kann allerdings durch den Einsatz von Hochleistungspolymeren, kontinuierlich gepumpten Systemen, thermotroper Schicht oder Rückkühlung (siehe Kapitel 6) entgegengewirkt werden.

Weitere Probleme sind die geringe Wärmeleitfähigkeit  $U = 0,2 \text{ W/mK}$  im Vergleich zu Kupfer mit  $380 \text{ W/mK}$  und der höhere Aufwand um die Absorberoberfläche selektiv zu beschichten. Um die Effektivität weiter zu verbessern, versucht man deshalb die Wanddicke der Absorber weiter zu reduzieren und die mit Wasser benetzte Absorberfläche durch die Verwendung sehr schmale Röhrchen bzw. vollflächiger Durchströmung zu maximieren.

Zu den wenigen Kunststoffkollektorherstellern zählt die englische Firma Solar Twin Ltd deren Kollektorabsorber aus Silikongummirohre bestehen, die teilweise zwischen Metallplatten verpresst sind. Des Weiteren sei die Firma Magen Eco Energy aus Israel und ihr Eco-Flare Kollektor genannt. Beim Absorber handelt es sich um Polyamidröhren, die durch ein speziell gestaltetes Sammelrohr verbunden sind. In den Kollektor integriert ist auch ein spezielles Überhitzungsschutzsystem, dass die Wärmedehnung des Absorbers bei zunehmender Temperatur ausnützt, um mechanische Belüftungsklappen zu öffnen und Kollektor auf diese Weise zu kühlen. Auf den Kunststoffkollektor der Firma Aventa AS wird hier näher eingegangen (siehe Abbildung 3-2), da er auch für die Simulationen und die Berechnung der Wärmegestehungskosten herangezogen wird. Der Drain-Back-Kollektor (DB-Kollektor) ist 60cm breit und kann in Längen von 1,5 bis 5,9 m gefertigt werden. Bei der Abdeckung handelt es sich um eine Doppelstegplatte aus Polycarbonat, die zusammen mit dem Absorber in einem Aluminiumgehäuse eingebettet ist. Die Kollektorverglasung muss eine hohe Transmission garantieren, Wärmeverluste verhindern und UV-Strahlung und anderen Witterungseinflüssen standhalten können.

Ein Problem ist allerdings noch immer die vergleichsweise schnelle Alterung von Kunststoffen, wenn sie über längere Zeit Hitze oder Licht ausgesetzt sind, vor allem im Hinblick auf einen Lebenszyklus des Kollektors von 10–20 Jahren.

Der Absorber des Aventa AS (siehe Abbildung 3-2) ist eine steife, extrudierte Doppelstegplatte, die aus Polyphenylensulfid hergestellt wird. Durch diesen Aufbau ergibt sich eine vollflächige Durchströmung des Absorbers, einzig getrennt durch die Stege, die die Kanäle definieren. Somit kann trotz schlechter Wärmeleitfähigkeit ein guter Wirkungsgrad erreicht werden. Die Dicke des Kollektors beträgt zusammen mit einer 25 mm dicken Wärmedämmung (Steinwolleplatten) rund 60 mm. Das Gewicht beläuft sich auf 5 kg/m<sup>2</sup>. Als Temperaturgrenze wird 160 °C angeführt. (Köhl et al, 2012)

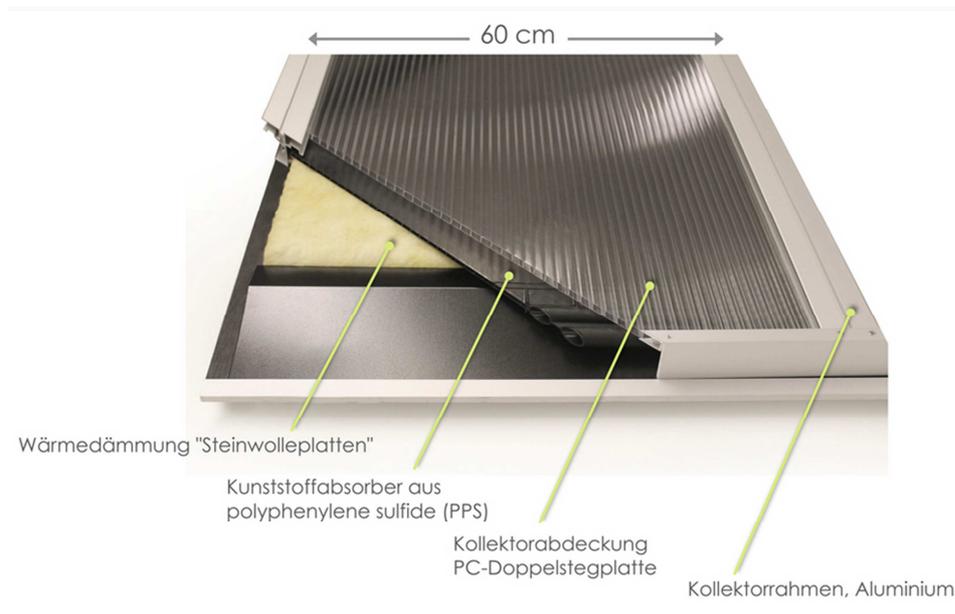


Abbildung 3-2: Kollektor der Firma Aventa (<http://www.bine.info/themen/news/kollektoren-guenstig-in-gebaeude-integrieren/>, 2.9.2015)

### 3.3 Kunststoffspeicher

Da die Temperaturanforderungen im Speicher 100 °C nicht wesentlich übersteigen, ist hier der Einsatz von kostengünstigen Massenkunststoffen möglich. Vorzüge sind deren Korrosionsbeständigkeit, flexible Formgestaltung (siehe Conus 502, Abbildung 3-4) und die Gewichtsreduktion, die den Einbau erleichtern. Die Temperaturschichtung im Speicher würde durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Materials ebenfalls nicht gestört. Aufgrund der geringeren mechanischen Belastbarkeit ist eine drucklose Ausführung vorzuziehen. Um dies zu realisieren sind die im Handel erhältlichen

Kunststoffspeicher mit einem internen Wärmetauscher oder einem Tank-im-Tank System ausgestattet.

In Abbildung 3-3 ist ein Kunststoffwärmespeicher der Firma Rotex beispielhaft aufgeführt. Der Speicher wird mit einem Fassungsvermögen von 500 l angeboten und ist 1,53 m hoch. Der Tank selbst besteht aus Polypropylen. Für die Wärmedämmung wird Polyurethan eingesetzt. Beim Material des Trinkwasserwärmetauschers (13), der von drucklosem Speicherwasser (17) umgeben ist, handelt es sich um vernetztes Polyethylen (PEX). Je nach Wahl des Wärmeerzeugers können bis zu 2 Edelstahl-Wellrohr-Wärmetauscher (22,23) oder ein Elektroheizstab (21) zusätzlich eingebaut werden. Mittels Kollektor kann der Speicher allerdings auch ohne zusätzlichen internen Wärmetauscher über die Anschlüsse 9 und 11 mit Wärme versorgt werden. Der Speicher ist für Temperaturen von maximal 85 °C ausgelegt. Erwähnenswert ist auch der Kunststoffspeicher „Conus 502“ der Firma Consolar (siehe Abbildung 3-4), für dessen Gehäuse und Wärmedämmung Polypropylen verwendet wird. Der Aufbau des Speichers ist konusförmig, um so den Wärmedämmforderungen besser gerecht zu werden. Um die Temperaturdifferenz beim Wärmetausch möglichst gut auszunutzen ist der Solarwärmetauscher sehr nahe am Boden montiert und spiralförmig ausgelegt. Das Speicherwasser wird durch den Wärmetauscher erwärmt und steigt durch das Aufströmrohr in die obere Hälfte des Speichers, womit eine Durchmischung der unterschiedlichen Temperaturschichten verhindert wird. In der Mitte befindet sich ein zweiter Wärmetauscher der mit einem externen Wärmeerzeuger verbunden ist und der Nachheizung dient. Der obere Spiralwärmetauscher, der u-förmig in das Abströmrohr „eintaucht“ dient der Trinkwassererwärmung. Das warme Speicherwasser strömt am Außenrand des Wärmtauschers ein, kühlt sich ab und fließt über das Abströmrohr Richtung Behälterboden, wo es wieder vom Solarwärmetauscher erwärmt wird. Durch dieses Schichtleitsystem kann das Speicherwasser im Vergleich zu herkömmlichen Speichern schneller erwärmt werden und der Wärmeerzeuger muss weniger oft zugeschalten werden. Das für die Wärmetauscher eingesetzte Material ist Kupfer. Der Conus 502 fasst ein Volumen von 490 Litern und hält Maximaltemperaturen von bis zu 90 °C stand. Obwohl durch Kunststoffspeicher die System- und Installationskosten reduziert werden können, ist die Langzeitstabilität der verwendeten Polymere für mehr als 20 Jahren noch unbewiesen. (Köhl et al, 2012)

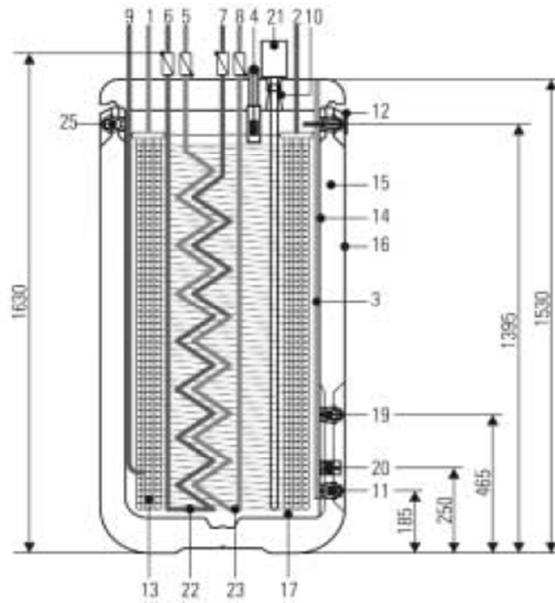


Abbildung 3-3: Kommerziell erhältlicher Wärmespeicher aus Kunststoff „Sanicube Pex“ von der Firma Rotex ([http://de.rotex-heating.com/service/techn-unterlagen/archiv/sanicubehybridcube.html?tx\\_damdownloads\\_pi1%5Bdownload%5D=1152](http://de.rotex-heating.com/service/techn-unterlagen/archiv/sanicubehybridcube.html?tx_damdownloads_pi1%5Bdownload%5D=1152), 10.9.2015)

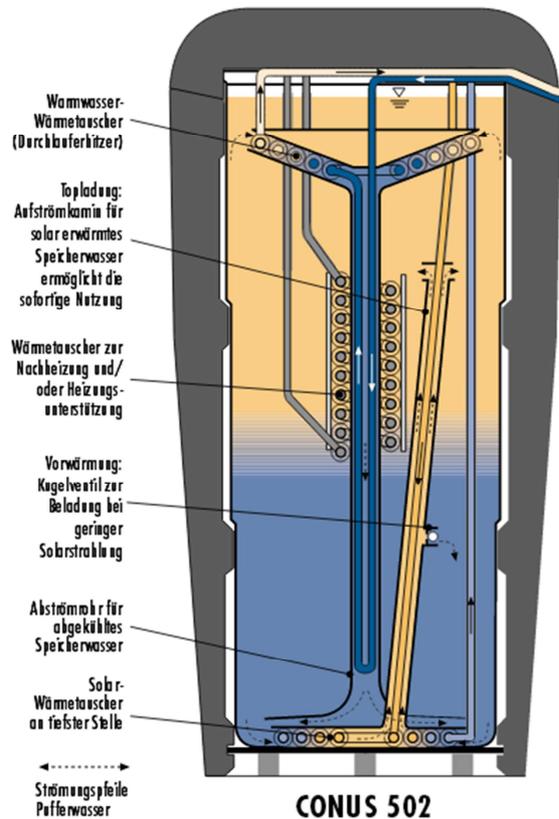


Abbildung 3-4: "Conus 502", Kunststoffspeicher der Firma Consolar ([https://www.dbu.de/533bild14431\\_123\\_1863\\_123.html](https://www.dbu.de/533bild14431_123_1863_123.html), 3.9.2015)

## 4 KOSTENANALYSE

Eines der Ziele von SolPol-4/5 ist die Kostenreduktion solarthermischer Systeme. Aus diesem Grund wird hier auf die Kosten konventioneller Systeme und Kunststoffsysteme näher eingegangen. Alle in diesem Kapitel vorkommenden Kosten und Preise sind ohne Mehrwertsteuer zu verstehen.

### 4.1 Konventionelle Systeme

In diesem Abschnitt wurden die Kosten konventioneller WW- und Kombi-Anlagen ausgewertet. Die sich ergebende Kostenstruktur soll Einsparungspotentiale ersichtlich machen. Als Datenbasis wurden österreichische Förderanträge real umgesetzter Anlagen herangezogen.

Mit Unterschieden zwischen WW- und Kombi-Anlagen gliedert sich die Kostenstruktur folgendermaßen:

- Kollektorfeld: Kollektor, Befestigung
- Speicher: Speicher, Anschlussgarnitur, Schichtladeeinheit, (evtl. Frischwassermodul)
- Rücklaufgruppe: Solarstation, Solarreglung, Pumpe, Volumenstrommesser, Thermometer, Durchlauf-,Entlüftungs-, Sicherheitsventil, Kugelhahn
- Membranausdehnungsgefäß (ADG)
- Rohrleitungen: Rohre, Form- und Verbindungsstücke inkl. Isolierungen und zusätzlichem Befestigungsmaterial
- Montage: Lieferung, Montage des Kollektors, der Rohrleitungen, des Speichers sowie Heizungseinbindung, Einstellung der Regelung und Inbetriebnahme
- Brauchwassermischer
- Frostschutz: Wärmeträgermedium

Bei der Montage wurden Stemmarbeiten oder Elektroanschlussarbeiten nicht berücksichtigt.

Da sich die Montagekosten aus den Förderanträgen nicht immer explizit nur auf die solarthermische Anlage beziehen, wurde zusätzlich eine Befragung bei Installationsfirmen durchgeführt. Daraus ergeben sich durchschnittliche Montagekosten von 90 € zu je 20 Arbeitsstunden für eine WW-Anlagen durchschnittlicher Größe (Kollektorfläche 7m<sup>2</sup>) bzw. 40 Arbeitsstunden für Kombianlagen durchschnittlicher Größe (Kollektorfläche 15 m<sup>2</sup>).

Die Effizienz der Anlagen und der Systemkomponenten wurde bei der Auswahl der Förderanträge nicht berücksichtigt.

### Warmwasseranlagen:

Basierend auf den Daten von 10 WW-Anlagen wurde die prozentuelle Kostenstruktur in Abbildung 4-1 erstellt.

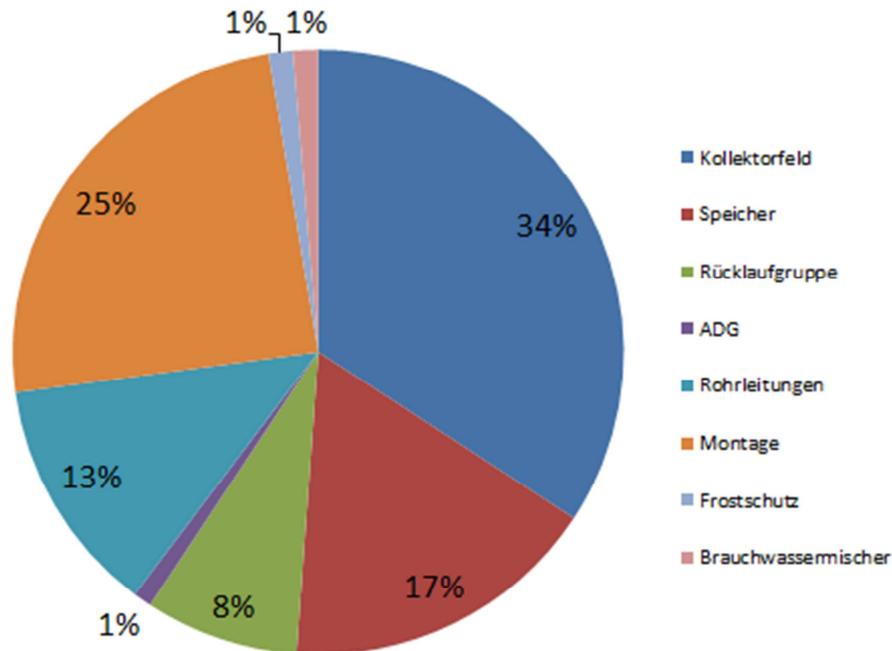


Abbildung 4-1: Kostenstruktur von solarthermischen Systemen zur Warmwasserbereitung

Wie in Abbildung 4-1 gut zu erkennen ist, macht das Kollektorfeld rund ein Drittel der Gesamtkosten aus. Allerdings hat die bisherige Forschung in diesem Bereich gezeigt, dass durch den Einsatz von Kunststoffkollektoren Kostenvorteile nicht immer erreicht werden können. Es wurde jedoch bereits in SolPol2 aufgezeigt, dass die Produktionskosten des Kollektor bei der Lösung spezifischer Probleme (druckbeständiges Absorbermaterial, kostengünstiger Überhitzungsschutz, kostengünstige extrudierbare Kunststoffe für Drain-Back-Kollektoren) von rund 70 €/m<sup>2</sup> um 30 % reduziert werden können. Rund ein Viertel der Kosten geht auf die Montage der Anlage zurück. Das ist auch jener Bereich, in dem man auf große Kosteneinsparungen durch Vereinfachung und Standardisierung hofft.

Speicher, Rohrleitungen, sowie die Rücklaufgruppe kommen zusammen auch noch auf 38 % der Gesamtkosten. Die Restkosten beziehen sich auf den Brauchwassermischer,

das Ausdehnungsgefäß und das Wärmeträgermedium (Frostschutz), die jeweils bei 1 % der Gesamtkosten liegen.

### Kombianlagen:

Basierend auf den Daten von 13 Kombianlagen wurde die prozentuelle Kostenstruktur in Abbildung 4-2 erstellt.

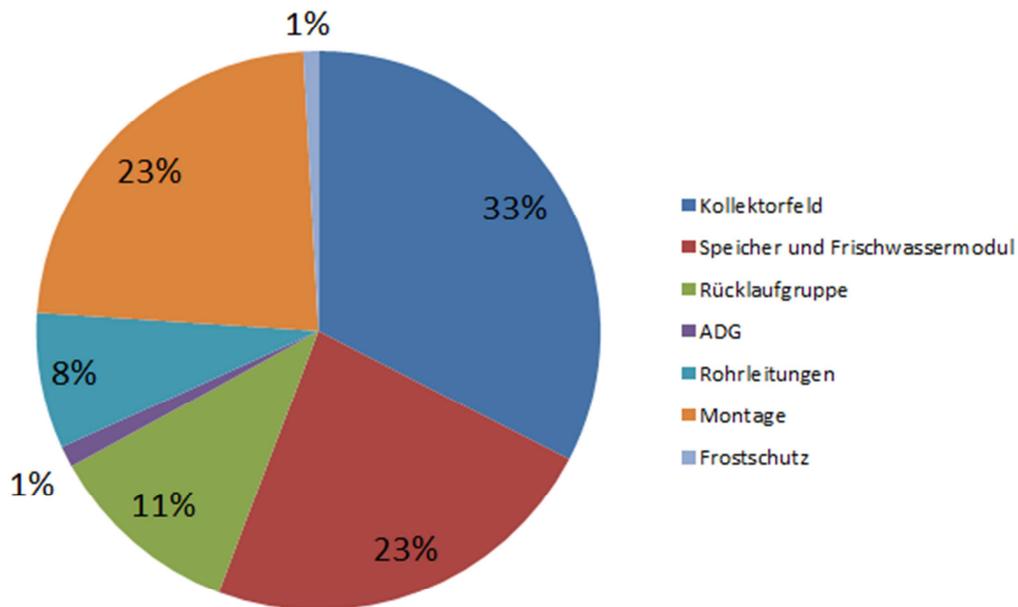


Abbildung 4-2: Kostenstruktur von Kombi-Anlagen

Die Kostenstruktur der Kombi-Anlagen unterscheidet sich nur geringfügig von jener der Warmwasseranlagen. Der Anteil des Kollektorfeldes an den Gesamtkosten ist nahezu gleich. Montage- und Speicherkosten sind verhältnismäßig gleich groß und machen je knapp ein Viertel der Gesamtkosten aus. Rücklaufgruppe und Rohrleitungen kommen zusammen auf 19 %. Der Rest der Kosten teilt sich auf das Ausdehnungsgefäß und den Frostschutz mit jeweils 1 % auf.

**Gesamtkosten:**

In Abbildung 4-3 sind die spezifischen Gesamtkosten (bezogen auf die Aperturfläche) der solarthermischen Systeme zur Warmwasserbereitung sowie für die Kombisysteme dargestellt. Unter der Aperturfläche versteht man die Lichteintrittsfläche eines Kollektors. Die Gesamtkosten der Anlagen liegen in einem Bereich von 600-1000 €/m<sup>2</sup>. Das blau eingefärbte Quadrat (AVG(WW)) markiert den Mittelwert der WW-Anlagen, der einem Wert von rund 850 €/m<sup>2</sup> entspricht. Der Durchschnittswert der Kombi-Anlagen (AVG(Kombi)) beträgt rund 790 €/m<sup>2</sup> bei einer Kollektorfläche von 17,9 m<sup>2</sup>. Mit einer Mehrwertsteuer von 20 %, ergibt sich ein Mittelwert von etwa 1000 €/m<sup>2</sup> für die Warmwasser- sowie für die Kombi-Anlagen.

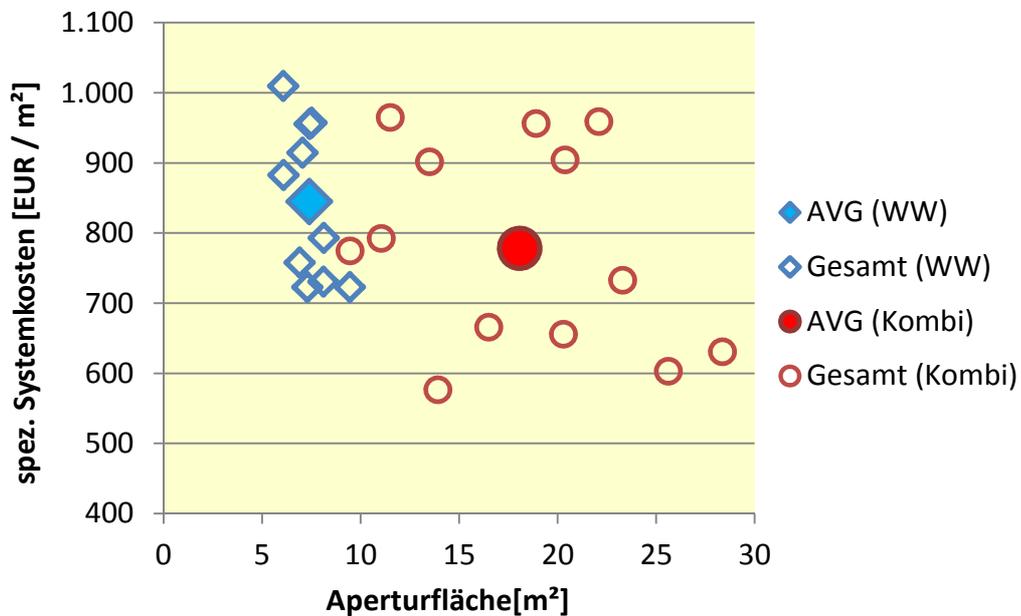


Abbildung 4-3: Spezifische Systemkosten solarthermischer Anlagen

**Kollektor:**

In Abbildung 4-4 sind die spezifischen Kosten der Kollektoren zu sehen. Anzumerken ist die breite Streuung der einzelnen Anlagen. Das blaue gefüllte Quadrat markiert hier den Mittelwert der WW-Anlagen mit 220 €/m<sup>2</sup>. Im Gegensatz dazu besitzen die Kombi-Anlagen im Schnitt etwas niedrigere Kollektorkosten pro m<sup>2</sup> (205 €/m<sup>2</sup>)

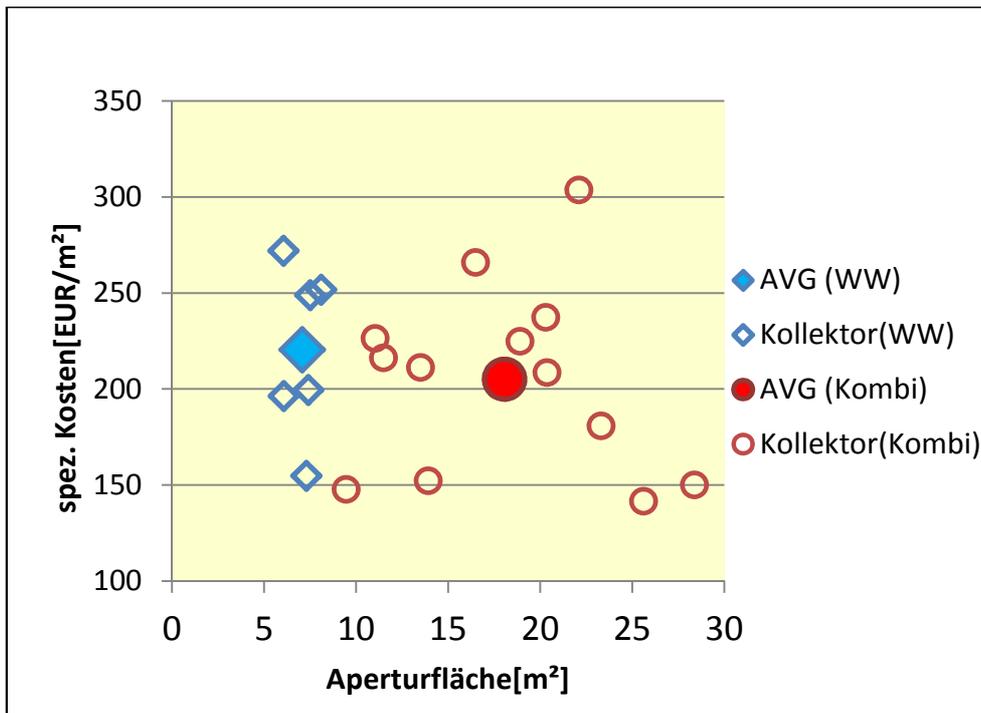


Abbildung 4-4: spezifische Kosten des Kollektors

**Speicher:**

Die Kosten der Speicher für die solarthermischen Systeme sind im nachfolgenden Diagramm abgebildet. Gut zu erkennen sind die steigenden Kosten, die mit einer Erhöhung der Kollektorfläche einhergehen, da auch das Volumen des Speichers mit der Kollektorfläche zunimmt. Die blauen Datenpunkte spiegeln die Ergebnisse der WW-Anlagen wider und belaufen sich auf einen durchschnittlichen Preis von 1160 € bei einer durchschnittlichen Speichergöße von 450 l. Die roten Datenpunkte bilden die Ergebnisse der Kombi-Anlagen ab mit einem Durchschnittswert von 2700 € bei 1650 l.

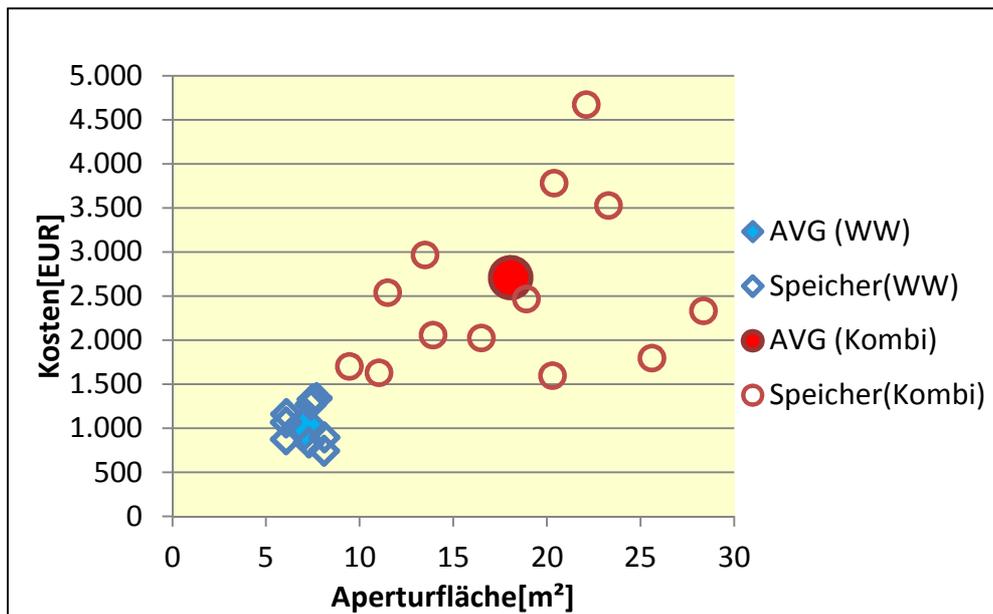


Abbildung 4-5: Kosten des Speichers

**Rohrleitungen:**

Den kleinsten Anteil (abgesehen vom Frostschutz und dem ADG) machen die Rohrleitungen aus, da sie, wie auch in Abbildung 4-6 zu sehen ist, mit der Größe der Anlage sinken. Die Abbildung setzt die spezifischen Kosten in Relation zur Aperturfläche. Der durchschnittliche Rohrleitungspreis pro Kollektorfläche beträgt 115 €/m² für die WW-Systeme und 60 €/m² für die Kombi-Systeme.

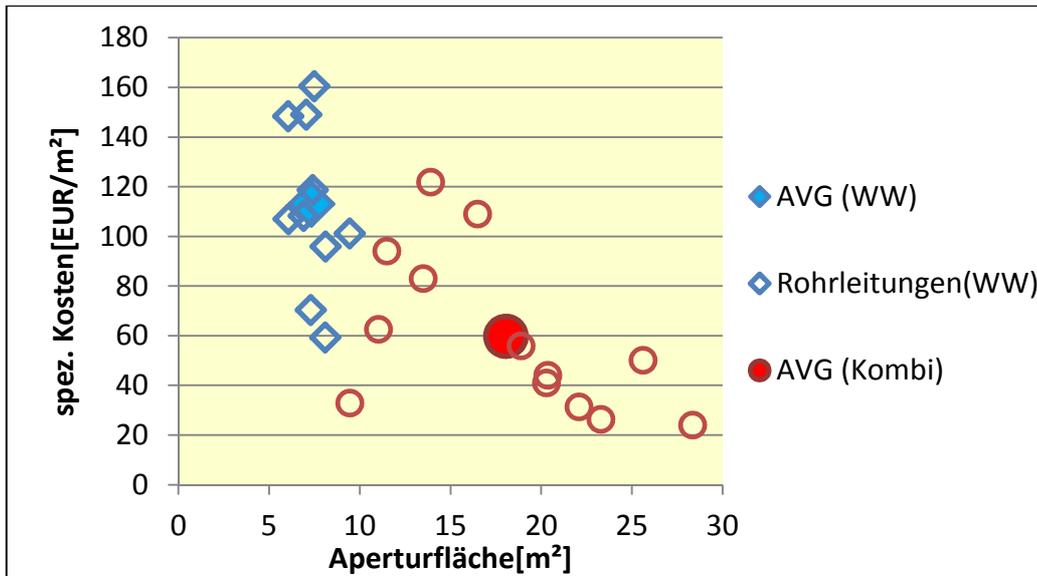


Abbildung 4-6: Spezifische Kosten der Rohrleitungen

## 4.2 Kunststoffsysteme

Da es momentan kein am Markt erhältliches, voll aus Kunststoff bestehendes Solarsystem gibt, werden als Beispiel zwei Hybrid-Systemlösungen (ohne Rohr- und Montagekosten, ohne Mehrwertsteuer) von Aventa angeführt, die von ihnen vertrieben werden.

### WW-Anlage:

Die WW-Anlage (siehe Abbildung 4-7) besteht aus drei Aventa H65 Solarkollektormodulen mit einer Länge von 3,7 m und einer Bruttogesamtfläche von 6,7 m<sup>2</sup>. Als Warmwasserspeicher wird der AventaSolar330 aus rostfreiem Stahl eingesetzt, der ein Fassungsvermögen von 331 l besitzt, wovon 61 l auf den darin integrierten Drain-Back-Tank fallen, der sich im unteren Speicherbereich befindet und drucklos ausgelegt ist. Ebenfalls enthalten ist ein interner Wärmetauscher, an dem der Solarkreislauf angeschlossen wird sowie ein elektrischem Heizelement, das als Nachheizung fungiert. Die Pumpe für den Solarkreislauf ist auch am Speicher vormontiert. Als Solarregelung wird Aventa uc:symphony verwendet, bestehend aus einer Kontrolleinheit im Heizraum und einer Bedieneinheit im Wohnbereich. Die Endkundenpreise setzen sich wie in Tabelle 1 zusammen.

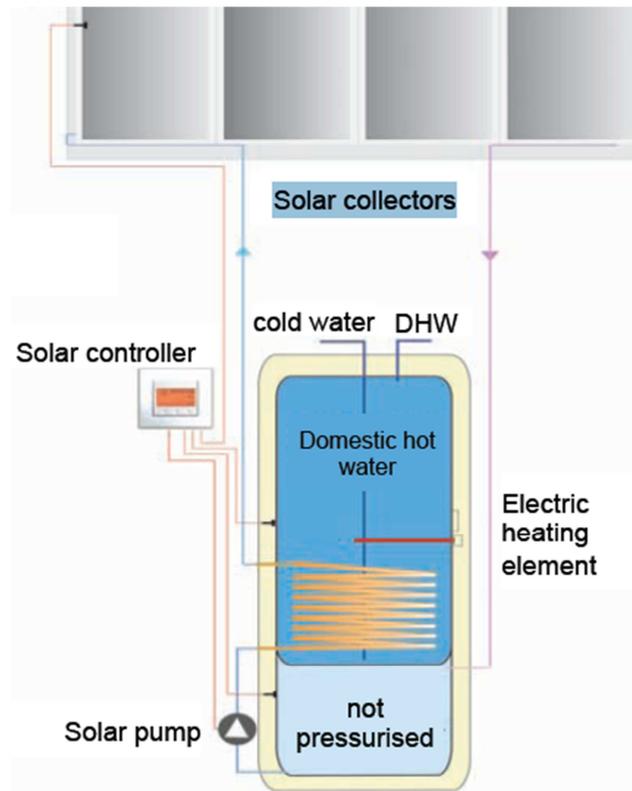


Abbildung 4-7: WW-System von Aventa

([http://www.avena.no/eng/content/download/7837/39760/version/1/file/Price\\_example\\_DHW-20150820\\_EN.pdf](http://www.avena.no/eng/content/download/7837/39760/version/1/file/Price_example_DHW-20150820_EN.pdf), 12.1.2016)

Tabelle 1: Kosten des WW-Systems von Aventa

Bezeichnung	Kosten
3x AventaSolar H65	985 €
1x AventaSolar330	1529 €
1x Aventa uc:symphony	233 €
Gesamtpreis	2747 €



## Kostenanalyse

Tabelle 2: Kosten des Kombi-Systems von Aventa

Bezeichnung	Kosten
8xAventaSolar V65	2625 €
1x Aventa HS800	4248 €
1x Aventa uc:symphony	770 €
Gesamtpreis	7679 €

Tabelle 3 zeigt die Preise pro Quadratmeter für unterschiedlich lange Kollektormodule. Diese sind umso kleiner je länger die verwendeten Kollektormodule sind, was auch auf das Fertigungsverfahren (Extrusion) des Absorbers zurückzuführen ist. Rot markiert sind die in beiden Anlagen verwendeten Kollektorgrößen.

Tabelle 3: Preise der AventaSolar Kollektormodule für unterschiedliche Kollektorlängen

Module length	Gross area (m <sup>2</sup> )	Costs / module (€)	Costs / m <sup>2</sup> (€)
1.50 m	0.9 m <sup>2</sup>	177.-	197.-
1.90 m	1.14 m <sup>2</sup>	205.-	180.-
2.40 m	1.44 m <sup>2</sup>	239.-	166.-
3.05 m	1.83 m <sup>2</sup>	284.-	155.-
3.70 m	2.22 m <sup>2</sup>	328.-	148.-
4.20 m	2.52 m <sup>2</sup>	363.-	144.-
4.60 m	2.76 m <sup>2</sup>	390.-	141.-
5.90 m	3.54 m <sup>2</sup>	479.-	135.-

Ein direkter Vergleich zu den Systemkosten von konventionellen Systemen in Österreich wie sie im Kapitel evaluiert wurden, ist zwar möglich aber nicht sehr aussagekräftig, da unterschiedliche Rahmenbedingungen (Speichervolumen, Kollektorfläche, Einbausituation der Kollektoren, Klima) vorherrschen und keine Aussage über die Effizienz des dahinter stehenden Systems getroffen werden kann. Vergleicht man nur die spezifischen Endkundenpreise des Kollektors (bezogen auf die Aperturfläche), liegen diese mit rund 170 €/m<sup>2</sup> unter jenen der ausgewerteten konventionellen Systemen in Österreich (siehe Abbildung 4-4), wobei aber auch hier auf die relativ große Spreizung der Kollektorkosten verwiesen werden muss.

## 5 REFERENZSYSTEME

In diesem Kapitel werden die Referenzsysteme und deren Standorte detailliert beschrieben und analysiert.

### 5.1 Auswahl der Referenzstandorte

Da der Fokus von SolPol-4/5 auf die Entwicklung marktreifer Solaranlagen aus Kunststoff gerichtet ist, ist das Hauptkriterium bei der Standortauswahl, eine hohe Marktrelevanz im jeweiligen Gebiet. Ein möglichst breites Spektrum an Orten unterschiedlicher klimatischer Bedingungen auszuwählen, fließt ebenfalls in die Entscheidungsfindung ein.

Abbildung 5-1 zeigt hierzu die zehn Länder mit der größten installierten solarthermischen Kollektorleistung und deren Aufteilung in unverglaste Solarkollektoren, Flach- und Vakuumröhrenkollektoren. An der Spitze steht China mit 262262 MW<sub>th</sub>. Obwohl in China hauptsächlich Vakuumröhren zum Einsatz kommen, bietet es dennoch ein enormes Marktpotential auch für Flachkollektoren. In den USA sind Drain-Back Systeme die speziell für den Einsatz von Kunststoffen in solarthermischen Systemen Vorteile bieten, sehr verbreitet (Botpaev & Vajen, 2014). Die Türkei erreichte mit Jahr 2013 Zuwachsraten von über 18 Prozent im Vergleich zum Vorjahr. (Mauthner et al, 2015)

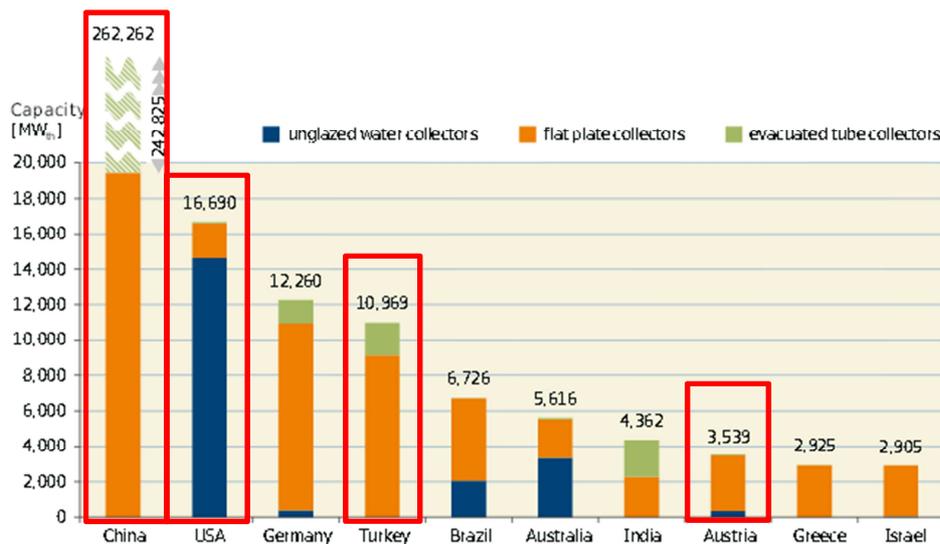


Abbildung 5-1: Die zehn Länder mit der größten installierten solarthermischen Kollektorleistung im Jahr 2013 (Mauthner et al, 2015)

Zusammen mit den vorhin erwähnten Kriterien sowie mittels Expertengesprächen wurden folgende Referenzstandorte ausgewählt:

- Antalya (Türkei)
- Graz (Österreich)
- Jacksonville (Florida, USA)
- Ottawa (Kanada)
- Peking (China)
- Phoenix (Arizona, USA)

### **5.2 Klimadaten an den Referenzstandorten**

Um die klimatischen Unterschiede zwischen den Standorten hervorzuheben, wurden drei Diagramme mittels der Klimadaten aus dem Simulationsprogramm Polysun 7.2 (Vela Solaris, 2014), das auf Daten von Meteonorm 6 zurückgreift, in Excel erstellt.

In Abbildung 5-2 ist die Globalstrahlung auf horizontaler Fläche und auf geneigter Fläche an den verschiedenen Standorten zu sehen. Die geneigte Fläche entspricht hierbei immer dem Breitengrad am jeweiligen Standort und erhöht bei einer dementsprechenden Ausrichtung des Kollektors den Anteil an einfallendem Licht. Für alle Simulationen wurde deshalb der Neigungswinkel des Kollektors dem Breitengrad angepasst. Wenn man die Globalstrahlung der jeweiligen Referenzstandorte auf horizontaler und geneigter Fläche vergleicht, sieht man, dass durch die Neigung des Kollektors eine Steigerung der einfallenden Strahlung von 10 % und mehr möglich ist. Wie man gut erkennt, liegt der Unterschied zwischen globalstrahlungsschwächsten und -stärksten Ort auf das gesamte Jahr bezogen bei über 1000 kWh/m<sup>2</sup>, wobei Phoenix mit einem Wert von knapp 2400 kWh/m<sup>2</sup>/a an der Spitze liegt.

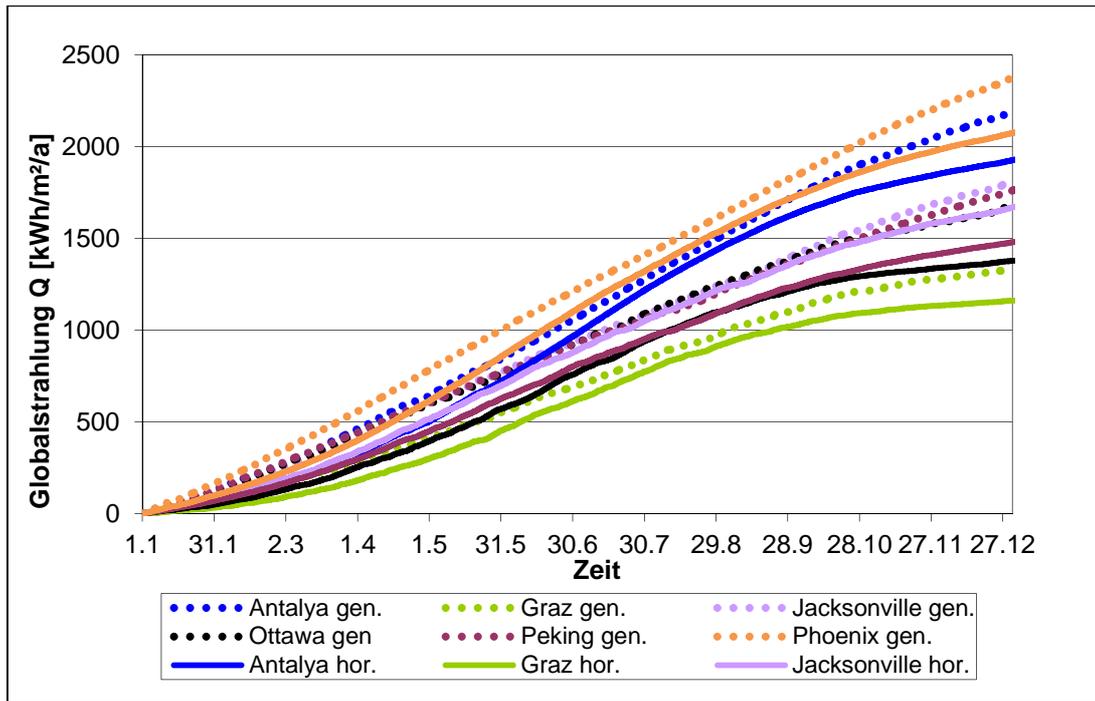


Abbildung 5-2: Jahressumme der Globalstrahlung auf die horizontale und geneigte Fläche an den Referenzstandorten

Das nächste Diagramm (Abbildung 5-3) gibt Aufschluss über die Luftfeuchte an den ausgewählten Standorten. Der trockenste Ort ist Phoenix; Graz und Jacksonville hingegen jene mit den höchsten Luftfeuchtigkeitswerten. Beim Vergleich zwischen Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 ist auch eine Korrelation zwischen Luftfeuchte und Globalstrahlung erkennbar.

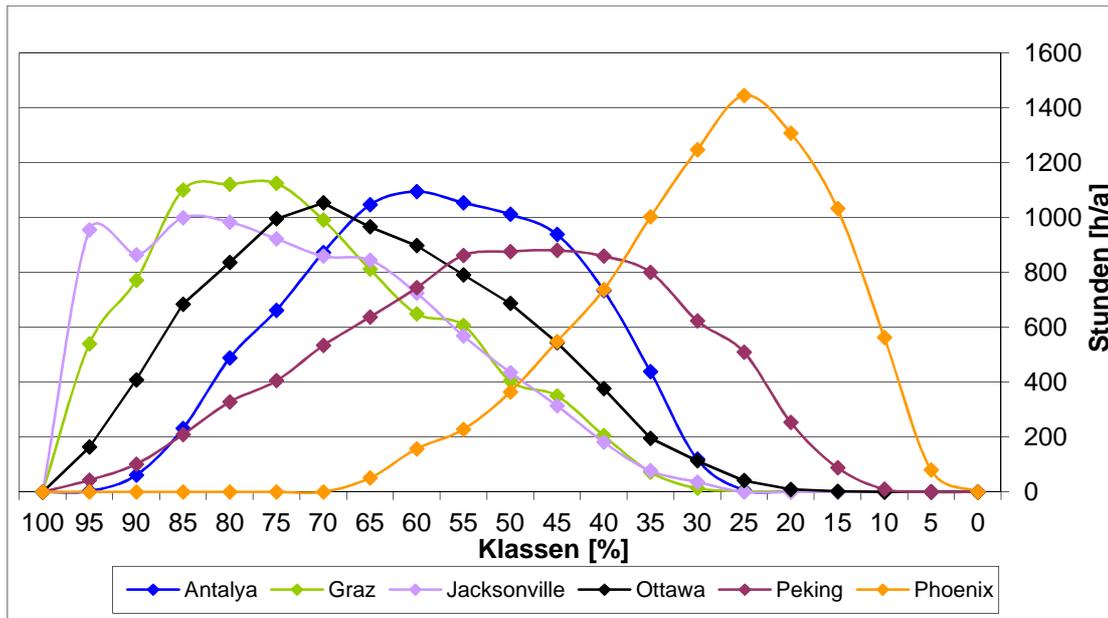


Abbildung 5-3: Häufigkeitsverteilung der relativen Luftfeuchte an den Referenzstandorten

In Abbildung 5-4 ist ein Whisker-Box-Plot-Diagramm der Außenlufttemperatur dargestellt. Die Maximal- und Minimalwerte werden durch die Balken begrenzt. Die grauen Kästchen geben den Bereich wieder, indem 50 % der über das Jahr auftretenden Temperaturen liegen. Das rote Kreuz markiert den Median. Am kältesten Ort Ottawa werden Temperaturen von unter  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht, der zudem auch die größte Temperaturschwankungsbreite besitzt. Temperaturen unter dem Gefrierpunkt treten auch noch vermehrt in Graz und Peking auf. In Jacksonville, Antalya und Phoenix werden kaum Temperaturen unter dem Gefrierpunkt erreicht. Vor allem in Phoenix und Antalya wäre damit der Einsatz eines Drain-Back-Systems in Kunststoffbauweise (siehe Kapitel 6.1) ohne Frostschutzmittel denkbar, was je nach Kollektorgröße eine merkbare Kostenreduktion mit sich bringen würde (siehe Kapitel 7).

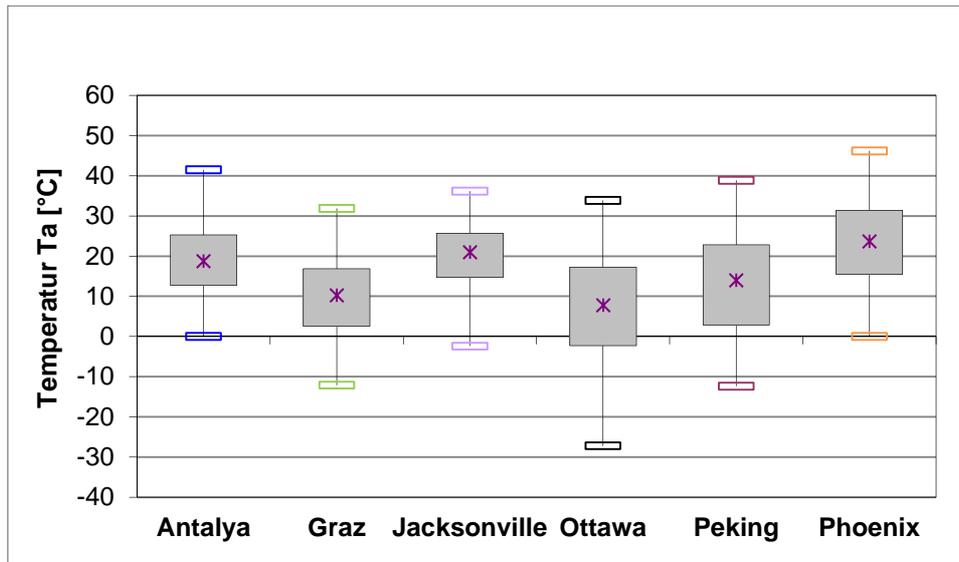


Abbildung 5-4: Außenlufttemperatur an den Referenzstandorten

### 5.3 Beschreibung der Referenzanlagen

Für die Simulation der Temperaturbelastungen und des Solarertrags in SHW wurden 2 verschiedene Grundsysteme verwendet. Zum einen die in Abbildung 5-5 gezeigte WW-Anlage und zum anderen die in Abbildung 5-7 gezeigte Kombi-Anlage. Mit Hilfe von SHW, das in FORTRAN geschrieben wurde, können Solaranlagen zur Warmwasserbereitung, zur kombinierten WW-Bereitung und Heizungsunterstützung und zur teilsolaren Speisung von Fernwärmenetzen berechnet werden. Als Eingabe wird ein ASCII Eingabedatensatz verwendet, die Ausgabe erfolgt ebenfalls über solche Datensätze. Diese Datensätze können mit beliebigen Editoren und Tabellenkalkulationen erstellt und ausgewertet werden. 2011 wurde auch noch die Möglichkeit der Berechnung von Kollektoren mit Rückkühlung und Hinterlüftung eingeführt, die für die vorliegende Arbeit notwendig ist. Entwickelt wurde das Programm am Institut für Wärmetechnik der TU Graz. (Streicher et al, 2011)

Da SHW keine eigene Klimadatenbank verwendet, wurden diese aus dem Programm Polysun 7.2 exportiert und in einen für SHW konformen Eingabedatensatz umgewandelt (siehe: Anhang, Abbildung 0-5).

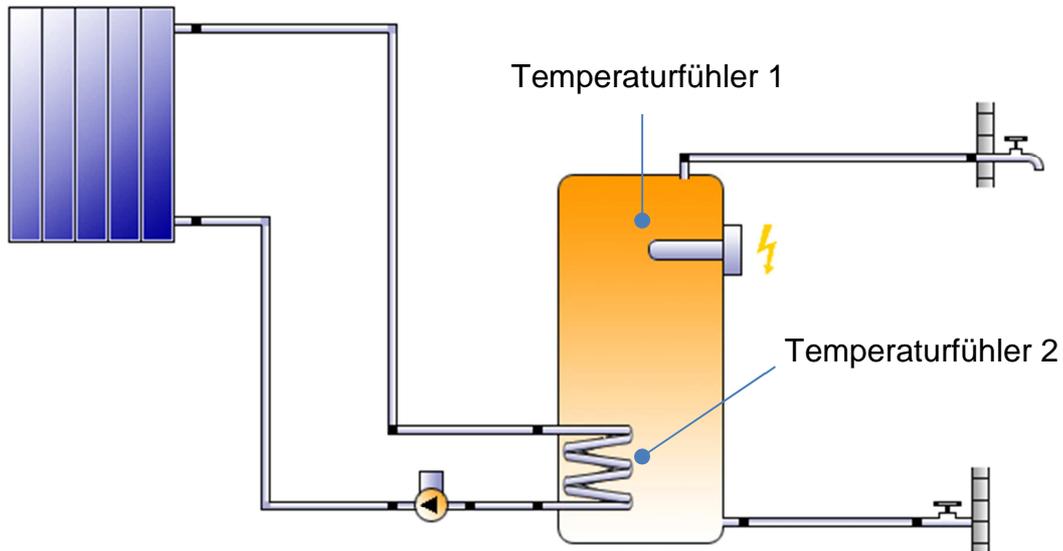


Abbildung 5-5: Aufbau der WW-Anlage

Die WW-Anlage in Abbildung 5-5 ist recht einfach aufgebaut. Das Wärmeträgermedium wird durch den Kollektor erhitzt und über die Rohrleitungen durch den internen Wendelwärmetauscher hindurch geleitet, wo der Wärmeaustausch zum Speicher hin stattfindet. In SHW wird der Speicher in maximal zehn Schichten eingeteilt. Es können allerdings zwei oder mehr Schichten zu einer zusammengefasst werden, falls der Temperaturunterschied kleiner einem voreingestellten Wert ist (hier: 0,6 K). Die Schichthöhe sowie auch die Anzahl der Schichten sind also je nach Temperaturgefälle variabel. Der Solarkreislauf wird über die Pumpe betrieben und über die Steuerung geregelt. Übersteigt die Temperaturdifferenz zwischen Kollektorausstritt und Temperaturfühler 2 (liegt ca. auf mittleren Höhe des Wärmetauschers) 6 K, wird die Pumpe eingeschaltet. Sinkt die Temperaturdifferenz unter 2 K oder wird eine Kollektortemperatur von über 120 °C (Gefahr der Dampfbildung) erreicht oder überschreitet die Temperatur des Fühlers 2 einen Wert von 65 °C, wird die Pumpe abgeschaltet. Der spezifische Volumenstrom der Pumpe wird ebenfalls über Steuerung festgelegt und beträgt 40 l/m<sup>2</sup>/h (High Flow). Falls die vom Kollektor erhaltene Wärme nicht ausreicht um die benötigte Speichertemperatur zu erreichen, kann ein speicherinterner Wärmeerzeuger (E-Patrone mit einer Heizleistung von 2 kW) jederzeit hinzugeschaltet werden. Die Schalthysterese orientiert sich hierbei an der geforderten Solltemperatur (z.B.: 50 °C für Graz, siehe Tabelle 5) des Warmwassers. Wenn die Fühlertemperatur 1 (Einbauhöhe in Graz: 1,575 m) unter die Solltemperatur fällt, wird sofort die E-Patrone eingeschaltet, um das Bereitschaftsvolumen für die WW-

Erzeugung auf Temperatur zu halten. Die Ausschalttemperatur der Nachheizung liegt 5 K über der Solltemperatur. Angelehnt an das Beispiel vorhin, beträgt sie somit 55 °C. Für das in den Speicher einströmende Frischwasser wurde, wie auch bei der Kombianlage, eine mittlere Temperatur von 13,2 °C angenommen und eine Temperaturschwankung über das Jahr von  $\pm 1,9$  K festgelegt. Die Zapfung des Warmwassers erfolgt gemäß dem Warmwasserprofil (siehe Abbildung 5-8) kontinuierlich über den Tag verteilt.

Als Wärmeträgermedium im Solarkreislauf wird eine Propylenglykalmischung (Dichte: 1021 Kg/m<sup>3</sup>, Wärmekapazität: 3810 J/kgK bei 50 °C) verwendet.

### Kollektor:

Der Neigungswinkel des Kollektors entspricht dem Breitengrad des Standortes. Da sich alle Standorte nördlich des Äquators befinden, sind diese nach Süden ausgerichtet. Der Flüssigkeitsinhalt der Referenzkollektoren wurde auf 0,8 l/m<sup>2</sup> festgelegt. Weicht der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung 30° von der senkrechten Strahlung auf die Kollektorfläche ab, beträgt der Winkelfaktor (Abminderungsfaktor des Transmissionsgrades) 0,99. Bei einer Abweichung von 50° beträgt er 0,92. Flüssigkeitsinhalte, Winkelkorrekturfaktoren und alle weiteren Kennwerte wurden, bis auf die Kollektorkoeffizienten für die Referenzkollektoren übernommen.

In Abbildung 5-6 sind die Wirkungsgradkennlinien der Referenzflachkollektoren für die unterschiedlichen Standorte bei 1000 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung und 30 °C Umgebungstemperatur zu sehen. Vergleicht man die unterschiedlichen Kollektoren anhand ihrer Kennlinie, erkennt man die hohe Qualität der mitteleuropäischen Kollektoren. Durch die hochwertige selektive Beschichtung weist der Kollektor am Standort Graz geringe Wärmeverluste auf und erreicht Stagnationstemperaturen von rund 195 °C. Etwas abgeschlagen dahinter liegt der in der Türkei verwendete Kollektor. Den schlechtesten Kennlinienverlauf zeigt der in China hergestellte Kollektor, dessen Konversionsfaktor aufgrund der schlechteren Beschichtung nur 0,67 beträgt (<https://secure.solar-rating.org/Certification/Ratings/RatingsReport.aspx?device=1522&units=METRICS>, 24.3.2016).

Für Phoenix und Jacksonville wurde jeweils ein und derselbe Referenzkollektor gewählt, der als orange Kennlinie im unteren Diagramm aufscheint.

Die für die Simulation verwendeten Kollektordaten beruhen auf dem Prüfprotokoll des Kollektors eines größeren Herstellers des jeweiligen Landes (siehe: Tabelle 4). Bei allen

Ländern (bis auf Kanada) handelt es sich jeweils um den größten Flachkollektorhersteller im Land.

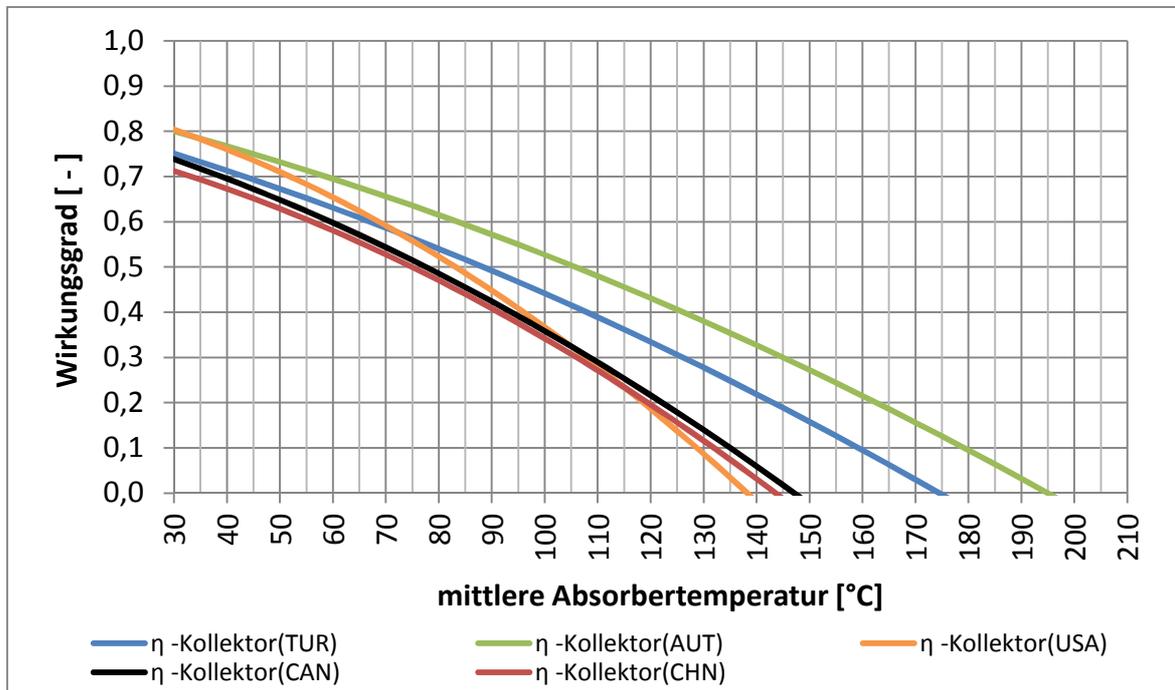


Abbildung 5-6: Kennlinien der Referenzkollektoren bei 1000W/m<sup>2</sup> Einstrahlung und 30°C Umgebungstemperatur

Tabelle 4: Liste des Kollektorherstellers des jeweiligen Landes

Land	Firma
Türkei	Ezinc
Österreich	GreenOneTec
USA	AET
Kanada	Thermodynamics
China	Five Star

Speicher:

Der Speicher besteht aus Stahl mit einer Wandstärke von 2 mm und ist von PU-Hartschaum mit einer Dämmungs-Dicke von 30 mm umgeben, dessen Wärmeleitfähigkeit 0,03 W/mK beträgt. Der darin eingebaute Wendelwärmetauscher aus Edelstahl, dessen oberer Anschluss in einer Höhe von 0,36 m liegt, besitzt eine Oberfläche von 1,8 m<sup>2</sup>, bei einer Bauteilhöhe von 0,3 m und einem U-Wert von 500 W/m<sup>2</sup>K. Wie bereits oben erwähnt, entspricht die Leistung der eingebauten E-Patrone 2 kW.

Weicht die Speicherhöhe/Speichervolumen am jeweiligen Standort von 1,8 m ab (siehe Tabelle 5 Ottawa und Peking), werden die Einbau – und Anschlussmaße am Speicher im Verhältnis dazu angepasst. Ausgenommen davon sind die Einbauhöhe des Wärmetauschers und die dazugehörige Position von Temperaturfühler 2.

Bei der Berechnung des mittleren vertikalen Wärmeleitwerts wurde auf folgende Formel (Streicher et al, 2011) zurückgegriffen:

$$\text{Leitwert} = \frac{4 \cdot s_{\text{Wand}} \cdot \lambda_{\text{Wand}}}{d_{\text{Sp}}} + \lambda_{\text{Wasser}} \quad (\text{Gl. 5-1})$$

Der mittlere vertikale Wärmeleitwert dient zur Berechnung der Durchmischung der unterschiedlichen Speicherschichten. Für  $\lambda_{\text{Wand}}$  wurden 50 W/mK (Stahl) und für  $\lambda_{\text{Wasser}}$  0,6 W/mK angenommen.  $d_{\text{Sp}}$  gibt den Durchmesser des Speichers an. Mit  $s_{\text{Wand}}$  ist die Speicherwanddicke gemeint.

### Rohrleitungen:

Die Länge der Rohrleitungen der WW-Anlagen des gesamten Solarkreislaufes beträgt 20 m. Für die Simulation wurden Kupferrohre mit einem Außendurchmesser von 18 mm und einer Wandstärke von 1mm gewählt. Bei der Wärmedämmung handelt es sich um Glas- und Steinwolle mit einer Dämmungs-Dicke von 20 mm und einer durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit von rund 0,05 W/mK (<http://www.waermedaemmstoffe.com/htm/mineralwolle.htm>, 23.2.2016).

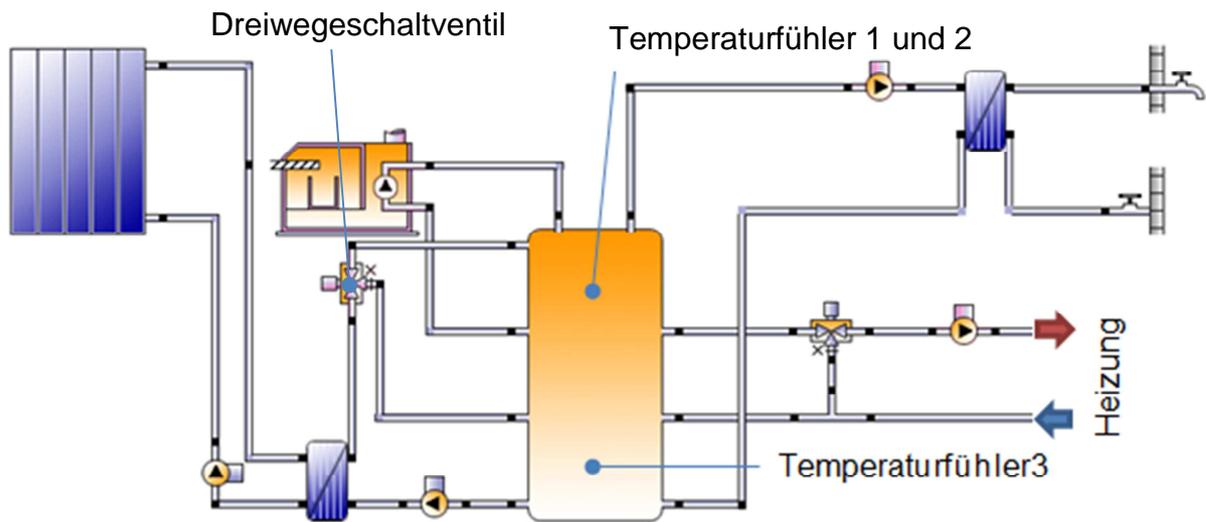


Abbildung 5-7: Aufbau der Kombi-Anlage

Abbildung 5-7 zeigt das Kombi-System. Anstatt eines speicherinternen Wärmetauschers besitzt das System einen externen Plattenwärmetauscher, wodurch im Solarkreislauf nun 2 Pumpen notwendig sind. Über die Steuerung werden die beiden Pumpen geregelt. Übersteigt die Differenz der Kollektorausstrittstemperatur und der Fühlertemperatur 3 (liegt in einer Höhe von 0,25 m, bei einer Gesamtspeicherrhöhe von 2 m in Graz) 6 K, werden beide Pumpen eingeschaltet. Die Ausschalttemperaturdifferenz beträgt 2 K. Bei einer Kollektortemperatur höher 120 °C oder einer Fühlertemperatur 3 von über 75 °C, werden die Pumpen ebenfalls abgeschaltet. Der spezifische Durchsatz beider Pumpen ist mit 15 l/m<sup>2</sup>h (Low Flow) festgelegt. Ebenfalls im System integriert, ist ein Dreiwegeschaltventil. Ist die Temperatur in der Rohrleitung vor dem Ventil größer als bei Fühler 1 (Höhe: ~1,6 m), wird die erwärmte Flüssigkeit des Sekundärkreislaufes im oberen Speicherbereich eingespeist. Ist die Rohrleitungstemperatur kleiner, wird das Wärmeträgermedium in den unteren, kühleren Bereich geleitet. Falls die vom Kollektor gelieferte Wärmemenge nicht ausreicht, kann der Wärmebedarf mittels einer externen Wärmequelle (z.B.: Heizkessel) gedeckt werden. Die Leistung der Wärmequelle wurde auf 10 kW festgelegt. Geregelt wird die Nachheizung über Temperaturfühler 2, der sich auf derselben Höhe wie Fühler 1 befindet. Sinkt die Temperatur dort unter die voreingestellte Solltemperatur für die WW-Bereitung (siehe Tabelle 5), wird die Nachheizung hinzugeschaltet. Liegt sie 5 K über der Solltemperatur, wird die Heizung

gestoppt. Über ein Frischwassermodul wird das Trinkwasser erzeugt. Die Pumpe auf der Primärseite des Frischwassermoduls ist drehzahlregelt, um die Warmwassertemperatur bei Zapfung möglichst konstant auf dem vorgegebenen Wert halten zu können. Da die Kombi-Anlage auch für die Regulierung der Raumwärme zuständig ist, beinhaltet das System einen Heizkreislauf mit Pumpe und Heizelementen (Fußbodenheizung). In SHW wird die Heizung mittels folgender Daten eingestellt: Vorlauf- und Rücklaufemperatur der Heizung (am Beispiel Graz: 35 bzw. 30 °C), Heizbeginntemperatur (15 °C), Raumtemperatur (20 °C), Heizleistung (je nach Standort, z.B.: Graz mit 4680 W), innere Abwärme durch Personen, Elektrogeräte, Beleuchtung etc. (540 W) und die passive Sonnenenergiegewinnung durch die Fensterfläche. Bei der Ermittlung der Heizleistung handelte es sich um einen iterativen Simulationsprozess, bei dem dieser Wert solange angepasst wurde bis in der Ausgabedatei von SHW (siehe Anhang, Abbildung 0-9), unter „Weitere Daten“-„Heizung“ der in Tabelle 5 vorgegebene Heizenergiebedarf für den jeweiligen Standort hinreichend genau (Abweichung von  $\pm 0,3$  %) erreicht wurde. Die Nachtabsenkung (Zeitraum: 22 bis 5 Uhr) wird mit einer Raumtemperatur von 17 °C umgesetzt.

### Speicher:

Der Speicher besteht wieder aus Stahl mit einer Wandstärke von 2,5 mm. Die Dämmung erfolgt mittels PU-Hartschaum und ist 100 mm dick.

Weicht die Speicherhöhe am jeweiligen Standort von 2,0 m ab (siehe Tabelle 5 Peking), werden die Einbau- und Anschlussmaße am Speicher im Verhältnis dazu angepasst. Ausgenommen davon sind die Höhe der Anschlussleitungen zum Wärmetauscher und die Höhe von Temperaturfühler 2. Außerhalb des Speichers liegt der externe Plattenwärmetauscher mit einer Fläche von 1,2 m<sup>2</sup> und einem angenommenen üblichem U-Wert von 2000 W/m<sup>2</sup>K.

Der mittlere vertikale Leitwert wurde nach Gleichung 5-1 berechnet.

### Rohrleitungen:

Im Unterschied zur WW-Anlage sind die Rohre aus Stahl und der Außendurchmesser im Solarkreislauf liegt bei 15 mm. Die Wandstärke bleibt mit 1mm gleich. Die Verrohrungslänge des Solarkreislaufs beträgt 20 m.

Beim Dämmmaterial aller Kreisläufe handelt es sich um Glas- und Steinwolle mit einer Dicke von 20 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von rund 0,05 W/mK.

Alle in den Simulationen verwendeten Warmwasserprofile sind in Abbildung 5-8 zusammengefasst. Phoenix zeigt ein eher ausgewogenes Verbrauchsprofil, während Ottawa und Peking sehr starke Verbrauchsschwankungen aufweisen. Verallgemeinernd kann man sagen, dass bei allen Profilen lokale Maxima um 8 und 19 Uhr auftreten, wobei das 19 Uhr Maximum an allen Orten sehr deutlich hervorsteicht. In Ottawa und Peking treten um 11 bzw. 12 Uhr nochmals sehr starke Verbrauchsspitzen auf.

Für Graz und Antalya wurden voreingestellte Zapfprofile aus Polysun übernommen. Der Tagesverlauf für die USA stammt aus einer Studie von Hendron und Burch (2007). Das Lastprofil für Kanada geht auf die Masterarbeit von Lee (2014) zurück, die sich wiederum auf die Canadian Standards Association bezieht.

Das Zapfprofil für Peking wurde aus der Diplomarbeit von Ramschak (2012) übernommen.

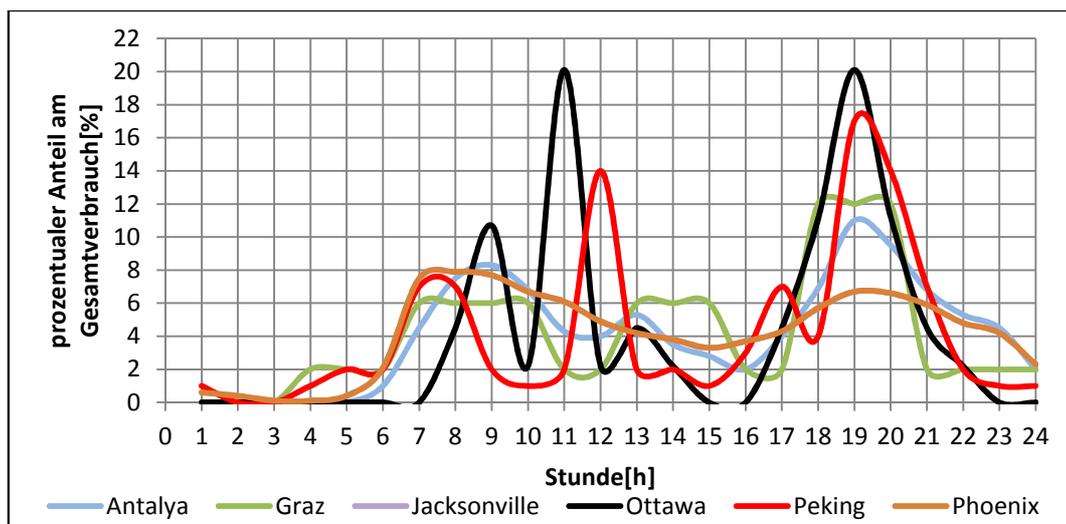


Abbildung 5-8: Warmwasserprofile an den Referenzstandorten

Die wesentlichen Parameter der Referenzsysteme wurden in Tabelle 5 zusammengefasst.

Die Dimensionierung der Kollektorfläche, sowie Speichervolumen, Warmwasserbedarf und das zugrundeliegende Gebäude für die Kombi-Systeme wurde anhand von Expertenbefragungen und einer Marktrecherche festgelegt.

Zusätzlich sind die Eingabedateien für die WW- und Kombi-Anlage in Graz, die zur Simulation in SHW verwendet wurden, im Anhang zu finden.

## Referenzsysteme

Tabelle 5: Parameterübersicht der Referenzsysteme

		Antalya	Graz		Jacksonville	Ottawa		Peking		Phoenix	Einheit
		WW	WW	Kombi	WW	WW	Kombi	WW	Kombi	WW	
<b>Kollektor</b>	Nettofläche	4,4	6	16	5,4	6	18	3,6	16	5,4	[m <sup>2</sup> ]
	Neigung	36,9	47		30,5	45,4		40		34	[°]
	Ausrichtung	Süd	Süd		Süd	Süd		Süd		Süd	[-]
	Konversionsfaktor c0	0,75	0,8		0,8	0,738		0,71		0,8	[-]
	Wärmeverlustkoeffizient c1	3,7	3,2		4,07	4,12		3,7		4,07	[W/m <sup>2</sup> K]
	quadratisches Glied c2	0,01	0,01		0,031	0,018		0,023		0,031	[W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ]
<b>Speicher</b>	Speicher Typ	Trinkwasser	Trinkwasser	Puffer	Trinkwasser	Trinkwasser	Puffer	Trinkwasser	Puffer	Trinkwasser	[-]
	Volumen	300	300	1000	300	270	1000	150	800	300	[l]
	Höhe	1,8	1,8	2	1,8	1,6	2	1,2	1,8	1,8	[m]
	Soll-Temperatur	55	50	50	60	55	55	45	45	60	[°C]
	WW-Verbrauch	160	200	200	250	225	225	120	120	250	[l/d]
<b>Gebäude</b>	Fläche	-	-	150	-	-	129	-	140	-	[m <sup>2</sup> ]
	spez. Heizenergiebed.	-	-	43,3	-	-	65	-	80	-	[kWh/m <sup>2</sup> a]
<b>Heizung</b>	Vorlauftemperatur	-	-	35	-	-	40	-	40	-	[°C]
	Rücklauftemperatur	-	-	30	-	-	30	-	30	-	[°C]

## 6 SYSTEME IN KUNSTSTOFFGERECHTER AUSFÜHRUNG

Da Solaranlagen in Kunststoff- oder Hybridbauweise andere Leistungsanforderungen aufweisen als herkömmliche Systeme, ist es notwendig mit einer dementsprechenden Systemauslegung darauf zu reagieren. Speziell was die Temperaturbeständigkeit der Kunststoffe in den Kollektoren angeht, sind hier die Grenzen (100 °C) bei günstigeren Standardpolymeren schnell erreicht. Durch die geometrische Ausführung (vollflächig durchströmt) des Kunststoffabsorbers müssen Konzepte angewendet werden um die Druckbelastungen zu reduzieren, da der zulässige Betriebsdruck am Beispiel des „EineWeltKollektors“ von Sunlumo bereits bei 2 bar erreicht ist (siehe Prüfbericht, Anhang). Nachfolgend aufgelistet sind einige Methoden, um die Temperatur- und Druckanforderungen an den Kunststoffen zu reduzieren.

- Thermotrope Schicht: temperaturabhängige schaltbare Schicht, die selbstständig ihren Transmissionskoeffizienten verringert und so die optischen Verluste erhöht, um den Kollektor vor Überhitzung zu schützen. (Wallner et al, 2006)
- Thermochrome Schicht: temperaturabhängige schaltbare Schicht, die selbstständig ihren Emissionsgrad erhöht und dadurch den strahlungsbedingten Wärmetransport zwischen Absorber und Glasscheibe erhöht. Dadurch können die Stagnationstemperaturen verringert werden. (Brunold et al, 2007)
- Rückkühlfunktion: Beim Erreichen kritischer Temperaturen wird der Kollektor aktiv mittels eines Rückkühlers (Schildberger, 2008) oder durch gezielte Hinterlüftung (Harrison et al, 2004) gekühlt.
- Drain-Back-System: Verhindert das Erreichen von Belastungsgrenzen (Druck) durch Rückentleerung des Wärmeträgermediums in ein Vorratsvolumen (Drain-Back-Tank). (Hausner et al, 2013)

Nachfolgend wird auf die Systemkonzepte Drain-Back-System, Rückkühlung und Hinterlüftung näher eingegangen. Die Thematik der schaltbaren (thermotrop, thermochrom) Schichten wird in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. In Bezug auf die thermotropen Schichten zeigt Hausner in seiner Arbeit „Solarthermische Kunststoffkollektoren mit integriertem Überhitzungsschutz“ (Hausner, 2011), dass die dargestellten Wirkungsgrade sowohl des verwendeten Labormusters als auch der kommerziell erhältlichen thermotropen Schicht einen geringen Schalhub besitzen. An thermochromen Schichten wird zwar verstärkt geforscht, jedoch speziell auf

Metallabsorber abgestimmt. Bis dato gibt es noch keine Langzeiterfahrungen mit diesen Schichten und eine eventuelle Applikation auf Kunststoffe ist nicht Teil des Forschungsprojektes SolPol4/5.

### **6.1 Drain-Back-System**

Die Aufgabe des Drain-Back-Tanks ist es, den Flüssigkeitsinhalt des Kollektors und Teile der Rohrleitungen beim Erreichen zu hoher Temperaturen aufzunehmen, um so Dampfbildung oder zu hohe Drücke im System zu verhindern.

Eine WW- oder Kombi-Anlage mit Drain-Back-Tank kann als offenes oder geschlossenes System ausgeführt werden. Beide Systeme bieten den Vorteil, dass auf diverse Komponenten verzichtet werden kann. In offenen Systemen (druckloser Solarkreislauf der zur Umgebung hin geöffnet ist) können sowohl auf Ausdehnungsgefäß, Sicherheitseinrichtungen als auch Rückschlageinheit verzichtet werden. In Hinblick auf die Verwendung von Kunststoff in solarthermischen Anlagen, dessen Druckbeständigkeit weit geringer ist als die von Alu, Kupfer oder Stahl, wäre in Drain-Back-Systemen eine gute Lösung gefunden. Durch die Rohrleitung, die ausgehend vom Kollektor in den Drain-Back-Tank mündet, entsteht während des Betriebs am Kollektorausstritt allerdings ein Unterdruck, wodurch die Siedetemperatur unter 100 °C fällt. Somit wird die mögliche Kollektorbetriebstemperatur durch die Höhendifferenz zwischen Kollektorausstritt und Drain-Back-Tank herabgesetzt (z.B.: 86,5 °C bei 4 m). In geschlossenen Systemen, können die Betriebstemperaturen durch Einstellung des gewünschten Anlagendrucks erhöht werden, wodurch jedoch Sicherheitseinrichtungen (Überdruckventil, usw.) notwendig sind. In geschlossenen Systemen übernimmt der Drain-Back-Tank die Funktion des Ausdehnungsgefäßes. Es besteht auch die Möglichkeit (bei geschlossenen sowie offenen Drain-Back-Systemen) auf Frostschutz zu verzichten, da das Wärmeträgermedium aus den frostgefährdeten Bereich (z.B.: über Nacht) in den Tank entleert werden kann. Dabei ist bei real umgesetzten Anlagen auf eine stetig fallende Rohrleitung und gutes Entleerungsverhalten des Absorbers zu achten. Der Korrosionsschutz geht so zwar verloren, ist aber in einem Vollkunststoffsystem (Solarkreislauf) auch nicht nötig. Weiters schlagen sich die Kosten für den Wärmeträger bei rund 4,2 l/m<sup>2</sup> (im Falle des Kunststoff-Absorbers von Aventa) - das Referenzsystem hat nur 0,8 l/m<sup>2</sup> - mit zunehmender Kollektorfläche merkbar nieder. Dadurch erhöhen sich die Gesamtkosten des Systems. Bei einem 6 m<sup>2</sup> Solarsystem ergibt sich bei einem Frostschutzpreis von

rund 5 €/l (Durchschnittspreis aus der Kostenanalyse) allein durch das größere Flüssigkeitsvolumen des Kunststoffkollektors eine Preiserhöhung von über 100 €.

Abbildung 6-1 zeigt das Drain-Back-System links im Betriebs- und rechts im Ruhezustand. Während die Pumpe betrieben wird, fließt das erhitzte Wärmeträgermedium vom Kollektoraustritt durch die Rohrleitung in den Drain-Back-Tank und von dort weiter an den Wärmetauscher zum Speicher. Wird eine festgelegte Temperatur überschritten, schaltet die Regelung die Solarpumpe aus und der Kollektor und Teile der Rohrleitung entleeren sich durch die Einwirkung der Schwerkraft selbstständig bis auf das Niveau des Drain-Back-Tanks (siehe Bild rechts).

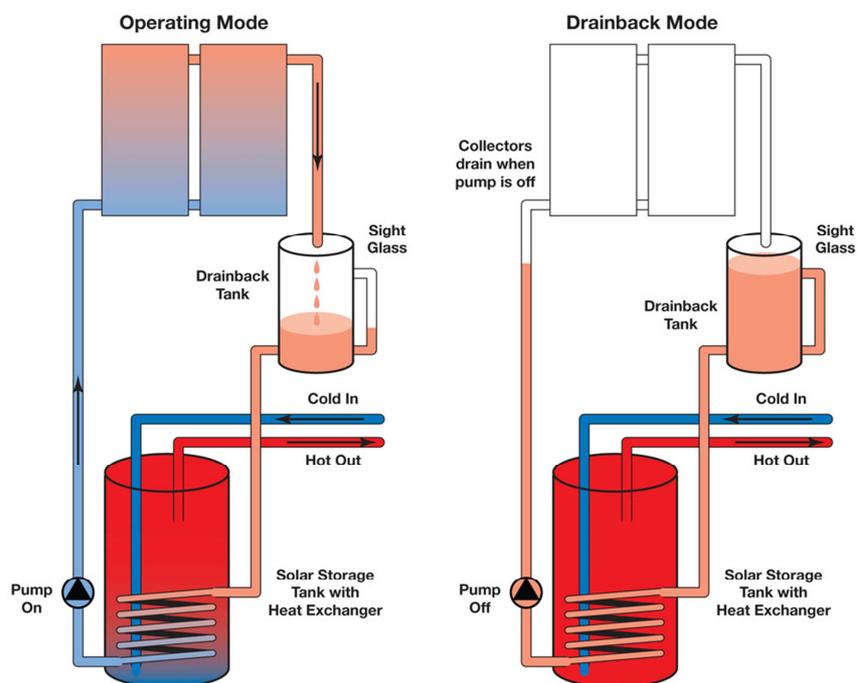


Abbildung 6-1: Drain-Back-System im Betrieb (links) und im Ruhezustand (rechts)

([http://www.homepower.com/sites/default/files/articles/ajax/docs/5\\_Ramlow-DB.jpg](http://www.homepower.com/sites/default/files/articles/ajax/docs/5_Ramlow-DB.jpg), 16.12.2015)

## 6.2 Rückkühlung/Rückkühler

Um den Kollektor vor kritischen Temperaturen zu bewahren, kann, wie in Abbildung 6-2 zu sehen ist, ein Rückkühler auf der Hinterseite des Kollektors angebracht werden. Der Rückkühlkreislauf kann durch ein thermisch gesteuertes Umschaltventil freigegeben werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung eines pumpengesteuerten Ventils, das im Zuge des SolPol-Projekts entwickelt werden soll. Beide Konzepte bieten den Vorteil, dass sie auch bei Stromausfall funktionieren.

Das pumpengesteuerte Ventil schließt bei Betrieb den Rückkühlkreislauf und gibt diesen mittels einer Rückstellfeder bei Pumpenstillstand frei.

Da der Rückkühler außen und auf der vom Kollektor beschatteten Seite liegt, beginnt das Wärmeträgermedium im Stagnationsfall aufgrund der Dichteunterschiede zwischen Rückkühler und Absorber zu zirkulieren und führt damit überschüssige Wärme über die Rückseite ab.

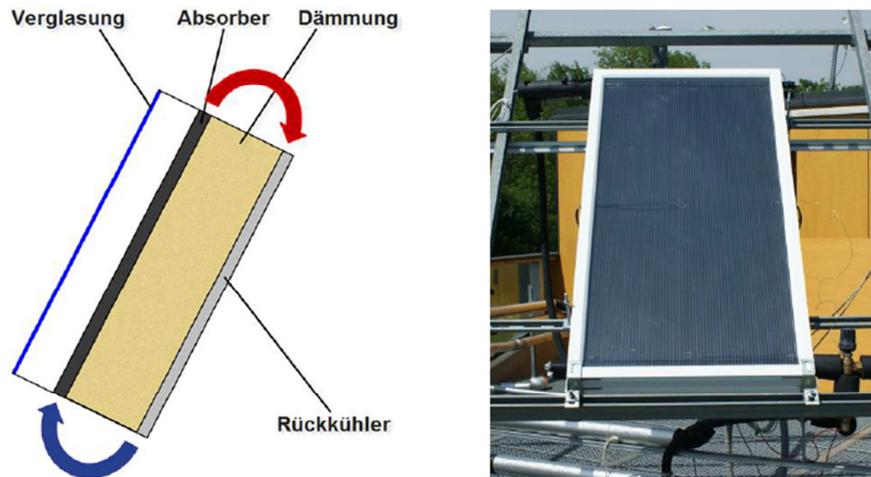


Abbildung 6-2: Prinzip eines Kollektors mit Rückkühlung (links) und der Versuchsaufbau (rechts) (Lang et al, 2014)

Abbildung 6-3 zeigt die Verschaltung zwischen Absorber und Rückkühler im Stagnationsfall. Zur Vermeidung von Temperaturmaxima an einzelnen Stellen am Absorber, besitzen beide einen harfenförmigen Aufbau, wodurch sich eine gute Strömungsverteilung ergibt und somit eine gleichmäßige Wärmeabfuhr gewährleistet werden kann.

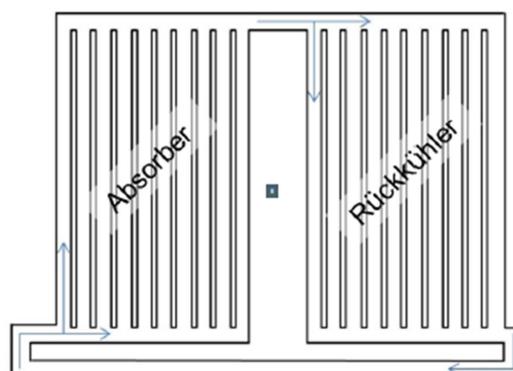


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung der Durchströmung des Kunststoffkollektors mit Rückkühler bei Stagnation (Hintringer et al, 2013)

Im Laufe des SolPol Projektes wurden bereits erfolgreiche Labortests durchgeführt. In Abbildung 6-4 ist das Potential des Rückkühlkonzeptes anhand eines Tagesverlaufes dargestellt. Die Pumpe im Solarkreislauf wurde für diesen Test durchgehend abgestellt. Von 11:00 bis ca. 12:30 Uhr ist der Rückkühler durch ein Kugelventil verschlossen. Die violette Linie zeigt den Tagesverlauf der Globalstrahlung. Die roten Linien zeigen die Temperaturen an verschiedenen Stellen (oben, Mitte, unten, Eintritt, Austritt) des Absorbers (unterscheidbar durch die Helligkeitsabstufung). Welcher Temperaturverlauf zu welcher Messtelle am Kollektor gehört, ist auch nochmal grob durch die schwarzen Pfeile zwischen Kennlinien und der im Diagramm integrierten schematischen Darstellung des Kollektoraufbaus (rechts unten) eingeteilt. Analog dazu die blauen Linien für den Rückkühler. Die maximalen Temperaturen („Absorberoberfläche oben mittig“) am Absorber erreichen kurz vor Öffnen des Kugelventils über 110 °C und würden ohne Rückkühlung noch weiter steigen. Durch Öffnen des Ventils, das den thermosiphonisch betriebenen Kreislauf über den Rückkühler freigibt, pendelt sich die Maximaltemperatur am Absorber um ca. 13:30 Uhr aber auf 85 °C bei 950 W/m<sup>2</sup> solarer Einstrahlung (auf eine geneigte Kollektorfläche von 45 °) und 20 °C Außentemperatur ein. Man erkennt, dass mittels Rückkühler das Medium vor dem Eintritt in den Absorber soweit gekühlt wurde (siehe „Absorbereintritt“ in Dunkelblau: um 13:30 Uhr ca. 35 °C), dass die maximalen Temperaturen deutlich reduziert werden konnten.

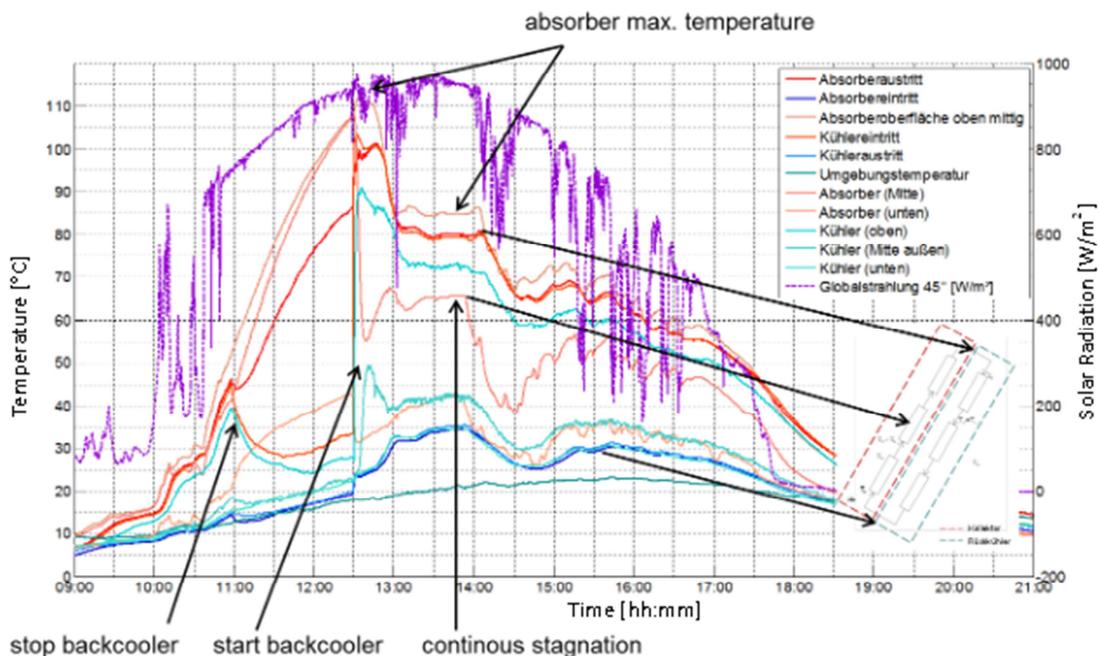


Abbildung 6-4: Temperaturentwicklung des Kunststoffkollektors mit Rückkühler bei Stagnation (Thür et al, 2013)

### 6.3 Hinterlüftung

Abbildung 6-5 zeigt den Querschnitt eines Kollektors auf einer Dachschräge mit integrierten Hinterlüftungsmechanismus, durch den der Kollektor vor zu hohen Temperaturen geschützt werden soll. Auf der Rückseite des Absorbers befindet sich der Lüftungskanal durch den Wärme mittels Luftstrom abgeführt werden kann.

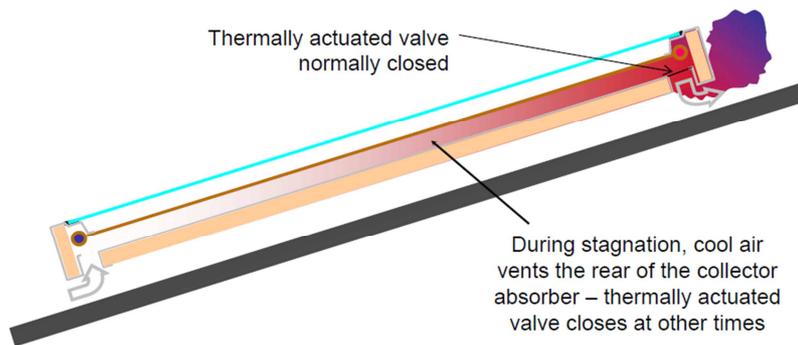


Abbildung 6-5: Kollektor mit Hinterlüftung auf Dach (Harrison und Cruickshank, 2012)

Das Prinzip kann anhand von Abbildung 6-6 näher erläutert werden. Links ist das obere Ende des Kollektors bei geschlossenen Lüftungsklappen abgebildet. In diesem Zustand wird keine Wärme abtransportiert. Ab Erreichen einer gewissen Lufttemperatur beginnen sich die Lüftungsklappen durch die Längenänderung einer Feder aus speziellen Formgedächtnislegierungen zu öffnen. Mit steigender Temperatur wird auch die Öffnung größer. An den sich durch natürliche Konvektion bildenden Luftstrom kann ein Teil der Wärme des Kollektors abgegeben werden.

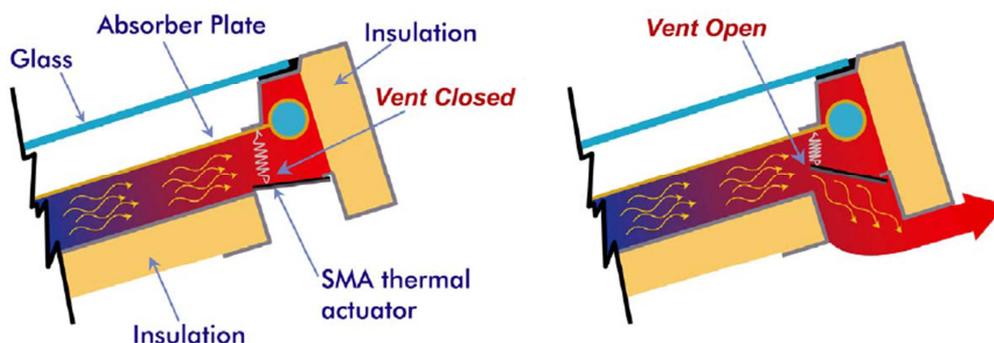


Abbildung 6-6: Prinzip der Belüftung eines Kollektors zwischen Absorber und Rückwanddämmung (Harrison und Cruickshank, 2012)

In Abbildung 6-7 ist das Ansprechverhalten anhand eines Vergleichstest gut zu erkennen. In diesem Test wurden zwei baugleiche Kollektoren parallel vermessen. Die dargestellte rote und blaue Linie zeigen die gemessenen Oberflächentemperaturen an

der obersten (heißesten) Stelle des Absorbers. Es ist zu erkennen dass die Temperaturen des Kollektors mit Hinterlüftung (blau) erst ab einer Temperatur von rund 105 °C (Beginn der Ausdehnung der Feder) von der roten Kennlinie (Kollektor ohne Belüftung) abweichen. Die maximale Temperatur konnte in diesem Fall bei hoher Einstrahlung (~1100 W/m<sup>2</sup>) um rund 30 Kelvin reduziert werden.

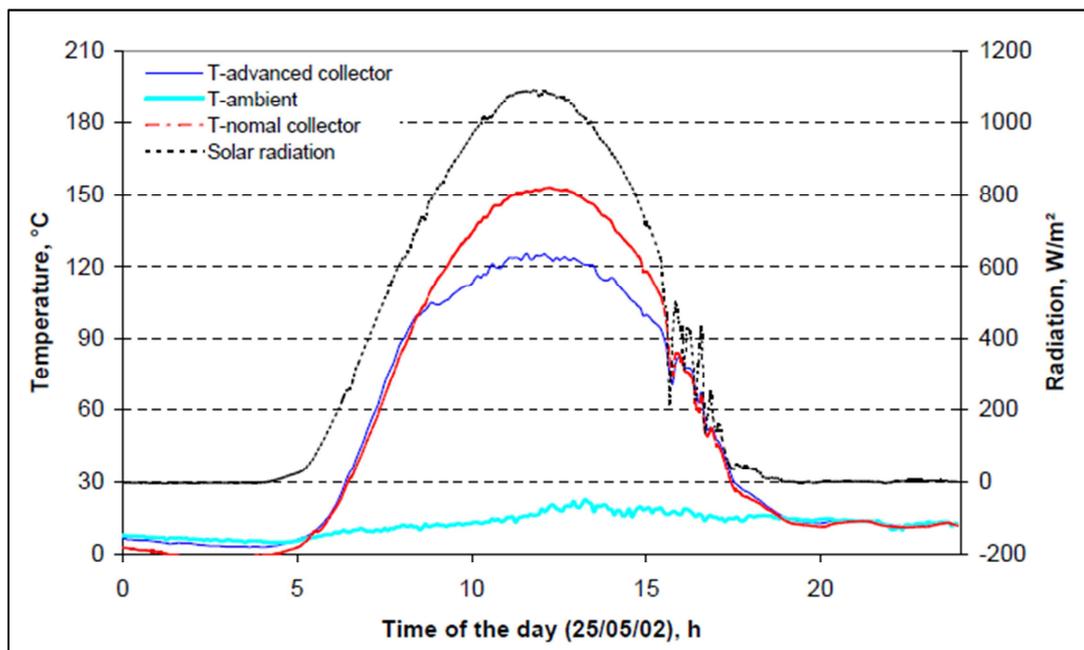


Abbildung 6-7: Temperaturvergleich eines Metallkollektors mit (blau) und ohne Rückkühlung (rot)  
(Harrison et al, 2004)

Im Falle eines Kunststoffabsorbers ist jedoch darauf zu achten, dass die Kühlwirkung von der Betriebsweise abhängig ist. Im Falle eines entleerenden Systems (Drain-Back) wirkt die entstehende Luftschicht in einem vollflächig durchströmten Absorber wie eine Dämmschicht. Wird in diesem Falle nur über die Rückseite des Absorbers belüftet, können deutlich größere Temperaturen auf der sonnenzugewandten Seite auftreten. Die in Abbildung 6-8 dargestellten Kollektorkennlinienverläufe wurden im Zuge des SolPol-4/5 Projektes mit dem Simulationsprogramm „BerechnungsUmgebungSolar“ (BUS) erstellt. Diese Ergebnisse gelten für den von Aventa angebotenen „Aventa HS65“ Kollektor der dahingehend verändert wurde, dass die Rückwanddämmung um 50 % reduziert wurde, um einen Luftkanal zwischen Absorber und Dämmung zu integrieren. Die Kennlinien beziehen sich auf die mittlere Temperatur des Wärmeträgers, wenn der Kollektor gefüllt ist. Die blaue Linie zeigt den Kollektorwirkungsgradverlauf bei geschlossenen Lüftungsklappen. Die rote durchgezogene Kennlinie zeigt den Wirkungsgrad des Kollektors bei permanent vollständig geöffneten Lüftungsklappen

wenn der Kollektor nur zwischen Absorber Rückwand und Dämmung belüftet wird. Die grüne Linie zeigt einen theoretischen Übergang (angenommen als Gerade), wenn die Hinterlüftung ab einer Temperatur von 90 °C einsetzt. Weiters sind die Kollektorkennlinien für eine permanente Belüftung auf der Vorderseite (zwischen Abdeckung und Absorber) und einer beidseitigen Belüftung dargestellt.

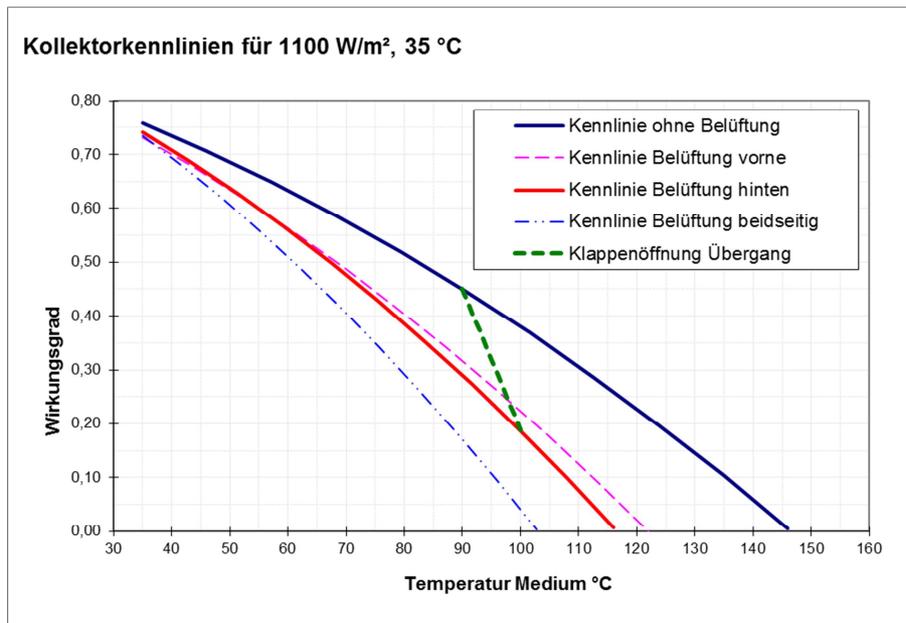


Abbildung 6-8: Kennlinien von Kunststoffkollektoren ohne Belüftung sowie mit unterschiedlichen Durchlüftungsvarianten (Ramschak et al, 2015)

Abbildung 6-9 stellt die Temperaturverteilungen entlang der strahlungsseitigen Absorberoberfläche dar für die Fälle der in Abbildung 6-8 gezeigten Durchlüftung. Man erkennt, dass die Oberflächentemperatur eines ungefüllten Absorbers bei einer rückseitigen Belüftung im Vergleich zur Kennlinie ohne Belüftung zwar deutlich (ca. 30 K) verringert werden konnten, jedoch um etwa 20 K höher ist als die jeweiligen Stagnationstemperaturen. Eine vorderseitige oder beidseitige Belüftung ist zwar technisch möglich, allerdings kann ein Schmutzeintrag, der die Effizienz des Kollektors deutlich reduzieren würde, nur schwer verhindert werden.

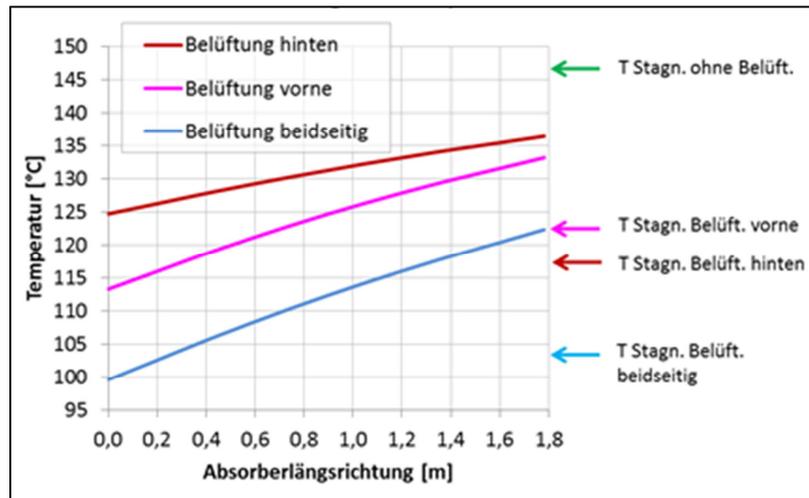


Abbildung 6-9: Temperaturverteilung auf der sonnenzugewandten Absorberfläche bei unterschiedlichen Durchlüftungsvarianten (Ramschak et al, 2015)

## 6.4 Kunststoffsystemkonzepte

Die für die Simulationen eingesetzten vier Kunststoffsysteme (KS-System), die nachfolgend definiert werden, besitzen dieselbe Gesamthydraulik wie die in Kapitel 5 definierten Referenzsysteme mit diversen Anpassungen (Flüssigkeitsinhalt= 4,19 l, Absorbermasse= 3,63 kg, Wärmekapazität des Absorbers= 1700 J/kgK und Regelung) abgestimmt auf die verschiedenen Konzepte.

- **KS\_DB:** Kunststoffkollektor (KS) mit Drain-Back-Tank (DB) ohne Überhitzungsschutz, offenes System. Die Regelung des Solarkreises wurde so eingestellt, dass bei Erreichen einer Kollektortemperatur von 80 °C die Pumpe des Solarkreislaufs abgeschaltet wird. Die Kollektortemperatur wurde mit einer geringen Sicherheit zur Siedetemperatur festgelegt. Bei einer Höhendifferenz von Kollektor zu Drain-Back-Tank von 4 m ergibt sich ein Absolutdruck von rund 0,6 bar und dadurch eine Siedetemperatur von rund 87 °C. Die Höhendifferenz von 4 m wurde deshalb gewählt, um den Drain-Back-Tank im Gebäude und damit im frostsicheren Bereich positionieren zu können. Die Abbildung des Drain-Back-Systems ist in SHW allerdings nur bedingt möglich. Eine Entleerung des Kollektors ist noch nicht implementiert, was zu verändertem Aufwärm- und Auskühlvorgängen im entleerten Zustand führen würde.
- **KS\_RK:** Kunststoffkollektor (KS) mit Rückkühlung (RK), geschlossenes System. Simulationstechnisch wurde die Rückkühlung folgendermaßen umgesetzt. Ab einer Temperatur von 90 °C setzt die Rückkühlung ein und hält die

Stagnationstemperatur auch bei hoher Globalstrahlung und Umgebungstemperatur (1200W, 40 °C) optimalerweise unter 95 °C.

- KS\_HL\_DB: Kunststoffkollektor (KS) mit Hinterlüftung (HL), mit Drain-Back-Tank (DB), offenes System. Wie die Rückkühlung setzt die Hinterlüftung ebenfalls bei 90 °C ein, wobei die Lüftungsklappen erst bei 100 °C vollständig geöffnet sind. Die Luft durchströmt den Kollektor dabei vollflächig, entlang der Hinterseite des Absorbers. Die Kollektorbetriebstemperatur wird aufgrund der Siedetemperatur bei Unterdruck am Kollektorausstritt wie im System ohne Hinterlüftung (KS\_DB) auf 80 °C beschränkt.
- KS\_HL\_G: Kunststoffkollektor (KS) mit Hinterlüftung (HL), geschlossenes System (G). Die Hinterlüftung funktioniert wie oben beschrieben. Die Kollektormaximalbetriebstemperatur wird durch Annahme eines geschlossenen, druckbehafteten Systems auf 120 °C erhöht.

Die Kollektoreffizienz der Kunststoffkollektoren wurde simulationstechnisch mit BUS ermittelt (Ramschak et al, 2015). Diese Kennlinie basiert wie im Kapitel 6.3 beschrieben auf jener des Aventa-Kollektors ohne Belüftung. Um eine leichtere Vergleichbarkeit zwischen den Kunststoffkonzepten zu erlangen, gelten für alle Kunststoffkollektoren bis zu einer Temperatur von 90 °C dieselben Koeffizienten. Erst ab 90 °C treten die kollektorspezifischen Änderungen der Systeme in Kraft (siehe auch Abbildung 6-10).

Die Verläufe der Kollektorkennlinien ab dem Einsetzen von Rückkühlung und Hinterlüftung wurden als Geraden angenommen.

Um Rückkühlung und Hinterlüftung des Kollektors zu simulieren wird in SHW auf eine eigene Eingabedatei mit dem Namen „c0\_therm.dat“ zurückgegriffen. In SHW wird die Wirkungsgradkennlinie aus Gleichung 2-3 noch mit den Korrekturfaktoren  $f_0$  und  $f_1$  modifiziert zu:

$$\eta_{Koll} = c_0 \cdot f_0 - c_1 \cdot f_1 \cdot \frac{(T_{Abs,fl} - T_a)}{I_G} - c_2 \cdot \frac{(T_{Abs,fl} - T_a)^2}{I_G} \quad (\text{Gl. 6-1})$$

Über die Eingabedatei können nun die Werte festgelegt werden, die  $f_0$  und  $f_1$  bei verschiedenen Temperaturen annehmen. Der Faktor  $f_0$  wird für die Simulation thermotroper Schichten eingesetzt und wurde daher in dieser Arbeit nicht verwendet. Über  $f_1$  wird allerdings der Verlauf mit Rückkühlung/Hinterlüftung bestimmt. In den zwei nachfolgenden Tabellen sind die Wertpaare zwischen Temperatur und Korrekturfaktor  $f_1$

zu finden, die in dieser Form auch in die oben erwähnte Eingabedatei geschrieben wurden.

Tabelle 6: Werte des Korrekturfaktors  $f_1$  für Rückkühlung

Temperatur $T_{Abs,fl}$	Korrekturfaktor $f_1$
-50	1,0
50	1,0
60	1,0
70	1,0
85	1,0
90	1,0
95	3,2
100	3,2
120	3,2
250	3,2

Tabelle 6 zeigt die Werte des Korrekturfaktors die zur Ermittlung der Kennlinie des Kollektors mit Rückkühlung verwendet werden. Zwischen 90 und 95 °C springt  $f_1$  von 1,0 (keine Rückkühlung) auf 3,2 (Rückkühlung mit voller Leistung). Die Erhöhung des Wärmeverlustkoeffizienten  $c_1$  um den Faktor 3,2 reicht in diesem Falle aus, um die Stagnationstemperatur auch bei extremen klimatischen Bedingungen (z.B.: in Phoenix) auf 95 °C zu begrenzen. Die Werte dazwischen werden in SHW interpoliert. Bei 92 °C würde der Korrekturfaktor also 1,88 betragen.

Die Werte die der Korrekturfaktor bei Hinterlüftung annimmt, sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Die Änderung des  $f_1$ -Wertes zwischen 90 und 100 °C spiegelt das kontinuierliche Öffnen der Lüftungsklappen wieder. Die leichte Änderung des Korrekturfaktors zwischen 100 und 120 °C beruht darauf, dass so der durch BUS ermittelte Kennlinienverlauf (nicht linear) besser nachempfunden werden kann.

Tabelle 7: Werte des Korrekturfaktors  $f_1$  für Hinterlüftung

Temperatur [°C] $T_{Abs,fl}$	Korrekturfaktor [-] $f_1$
-50	1,0
50	1,0
60	1,0
70	1,0
75	1,0
85	1,0
90	1,0
100	1,68
120	1,7
250	1,7

In Abbildung 6-10 sind nun alle drei Kollektorkennlinien der Kunststoffsysteme zu sehen.

Mit einer Globalstrahlung von 1000 W und 30 °C erreicht der Kunststoffkollektor ohne Überhitzungsschutz eine Stagnationstemperatur von 134 °C. Durch Hinterlüftung des Kollektors kann diese Temperatur auf 105 °C abgesenkt werden. Die Knicke in der Kennlinie des Kunststoffkollektors mit Hinterlüftung markieren den Anfang und das Ende des Öffnungsvorgangs der Lüftungsklappen. Der Kühleffekt der Hinterlüftung fällt im Vergleich zur Rückkühlung geringer aus, da der Luftstrom den Kollektor nur auf einer Seite durchströmt (beidseitige Durchströmung wäre ebenfalls möglich, siehe Kapitel 6.3) und der Effekt der Hinterlüftung durch die Kollektorgeometrie beschränkt ist. Die Rückkühlung kann hingegen sehr großzügig ausgelegt werden und erreicht unter den gegebenen Bedingungen eine Stagnationstemperatur von 92,5 °C.

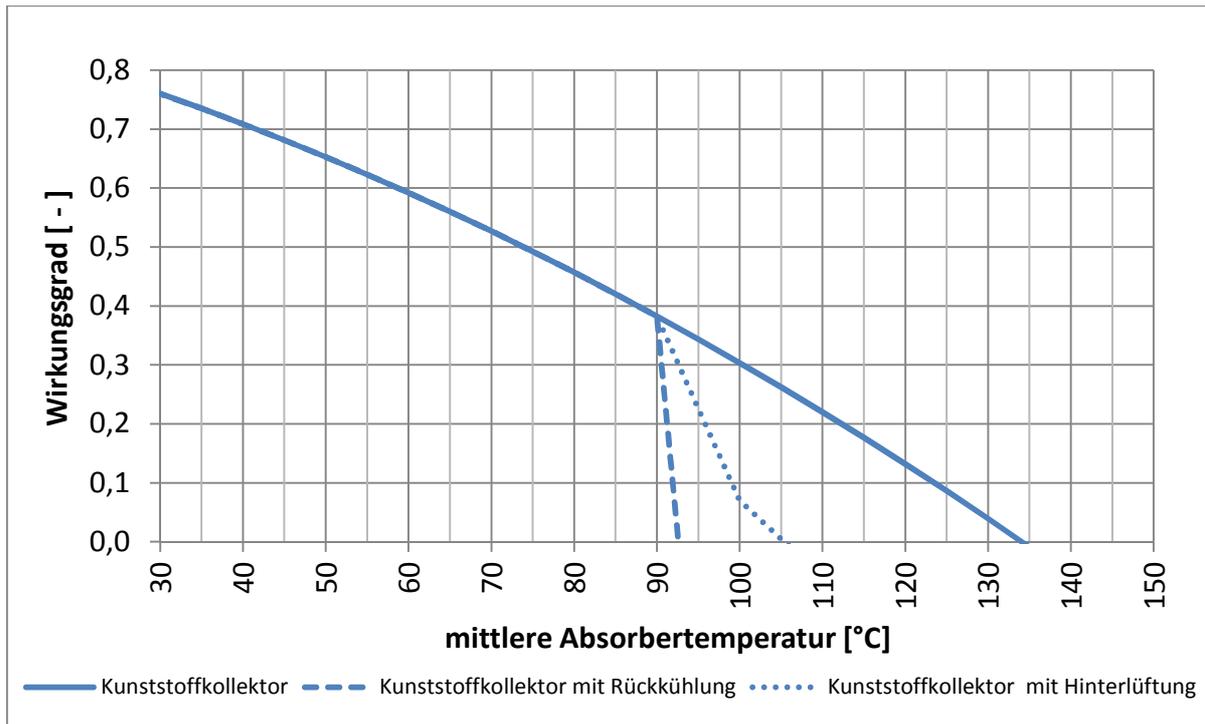


Abbildung 6-10: Kennlinien der Kunststoffkollektoren bei 1000 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung und 30 °C Umgebungstemperatur

In Tabelle 8 sind die Koeffizienten aufgelistet, die aus BUS für den Kunststoffkollektor ohne Überhitzungsschutz ermittelt wurden und mit Gleichung 6-1 zur Berechnung der Wirkungsgradkennlinien der unterschiedlichen Kunststoffkollektorausführungen herangezogen werden.

Tabelle 8: Koeffizienten der Wirkungsgradkennlinie der Kunststoffkollektoren ohne Überhitzungsschutz

Koeffizienten	Werte [-]
$c_0$	0,76
$c_1$	4,91
$c_2$	0,023

## 6.5 Tagesverläufe

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Tagesverläufe an einem sonnigen Tag (hier: 26.Mai) der vier vorhin besprochenen Kunststoffsystemkonzepte und ebenso des in Kapitel 5 beschriebenen Referenzsystems einer WW-Anlage am Standort Graz. Zu beachten ist, dass alle 5 Systeme so ausgelegt sind, dass sie denselben solaren Deckungsgrad erreichen. Die Kollektorflächen der Kunststoffsysteme sind also

dementsprechend größer (siehe Kapitel 6.6). Bezugnehmend auf Graz beträgt die Kollektorgroße des Referenzsystems  $6 \text{ m}^2$ , wobei die Kollektorflächen der Kunststoffsysteme auf ca.  $8,5 \text{ m}^2$  kommen.

In Abbildung 6-11 ist der Tagesverlauf des WW-Referenzsystems zu sehen. Ab 5:00 Uhr morgens beginnt die Globalstrahlung (gelb) langsam zu steigen und mit ihr auch die Umgebungs- (schwarz strichliert) und Kollektormitteltemperatur (rot). Um 6:00 Uhr wäre die in Kapitel 5.3 geforderte Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Temperaturfühler 2 (Temp. WT-Fühler) von 6 K erreicht, dennoch bleibt die Pumpe, erkennbar am Wert Switch (0 %...Pumpe aus; 100 %...Pumpe ein), ausgeschaltet. Der Grund dafür ist, dass SHW auch wenn die Pumpe ausgeschaltet ist, parallel dazu immer auch die Kollektormitteltemperatur bei eingeschalteter Pumpe berechnet. Nur dann, wenn diese theoretische Kollektormitteltemperatur (nicht im Diagramm zu sehen) des nächsten Simulationsschrittes um 6 K höher als Fühlertemperatur 2 liegt, schaltet die Pumpe ein. Deshalb startet die Pumpe des Solarkreislaufs erst um 7:00 Uhr. Real würde ein Taktvorgang stattfinden, also die Pumpe solange ein- und ausschalten bis das Wasser des gesamten Solarkreislaufs so stark erwärmt wurde, dass ein konstanter Pumpenbetrieb möglich ist. Das Einschalten der Pumpe bewirkt ein kurzes Absinken der Kollektormitteltemperatur, wobei die Ausschalthysterese von  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  nicht unterschritten wird. Mit nun stärker werdender Globalstrahlung steigt auch die Temperatur des Kollektors und damit verbunden die Temperatur im Speicher. Um 11:00 Uhr erreicht Fühler 2 die vorgegebene Temperaturbeschränkung von  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  und die Pumpe schaltet wieder ab. Ein starker Anstieg der Kollektortemperatur ist nun zu beobachten, der kurz vor 13:00 Uhr sein Maximum bei über  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht. Der Kollektor befindet sich in Stagnation. Erst um 15:55 Uhr, wenn die Strahlungsstärke abgenommen hat und die Kollektortemperatur kleiner als  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  ist, schaltet die Pumpe aufgrund der Regelungseinstellungen erneut ein.

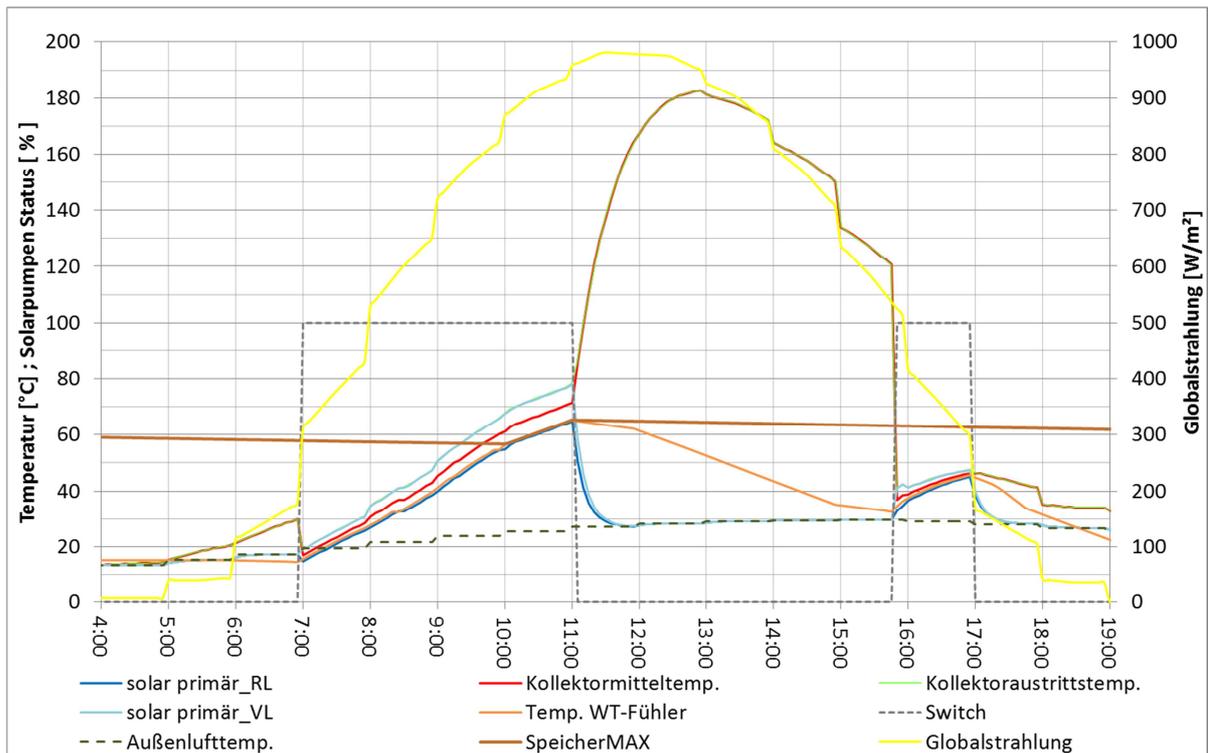


Abbildung 6-11: Tagesverlauf des WW-Referenzsystems am Standort Graz

Abbildung 6-12 zeigt den Tagesverlauf des KS-Systems ohne Überhitzungsschutz, ausgeführt als Drain-Back-System. Ab 7:00 Uhr ist die Strahlung der Sonne stark genug um den Pumpbetrieb bis 11:25 Uhr aufrecht zu halten. Das Temperaturmaximum des Tages liegt aufgrund der schlechteren Kollektorkennlinie bei knapp 130 °C. Der Speicher erreicht wie jener des Referenzsystems sein Speichermaximum bei 65 °C. Auffallend ist auch, dass die vollständige Beladung des Speichers im Vergleich zum Referenzsystem 20 Minuten länger dauert.

Der Speicher wird noch vor dem Erreichen der maximalen Kollektortemperatur von 80 °C (Ausschaltkriterium) vollständig beladen. Dementsprechend hat in diesem Fall dieses Kriterium zu keiner Minderung des Solarertrages geführt.

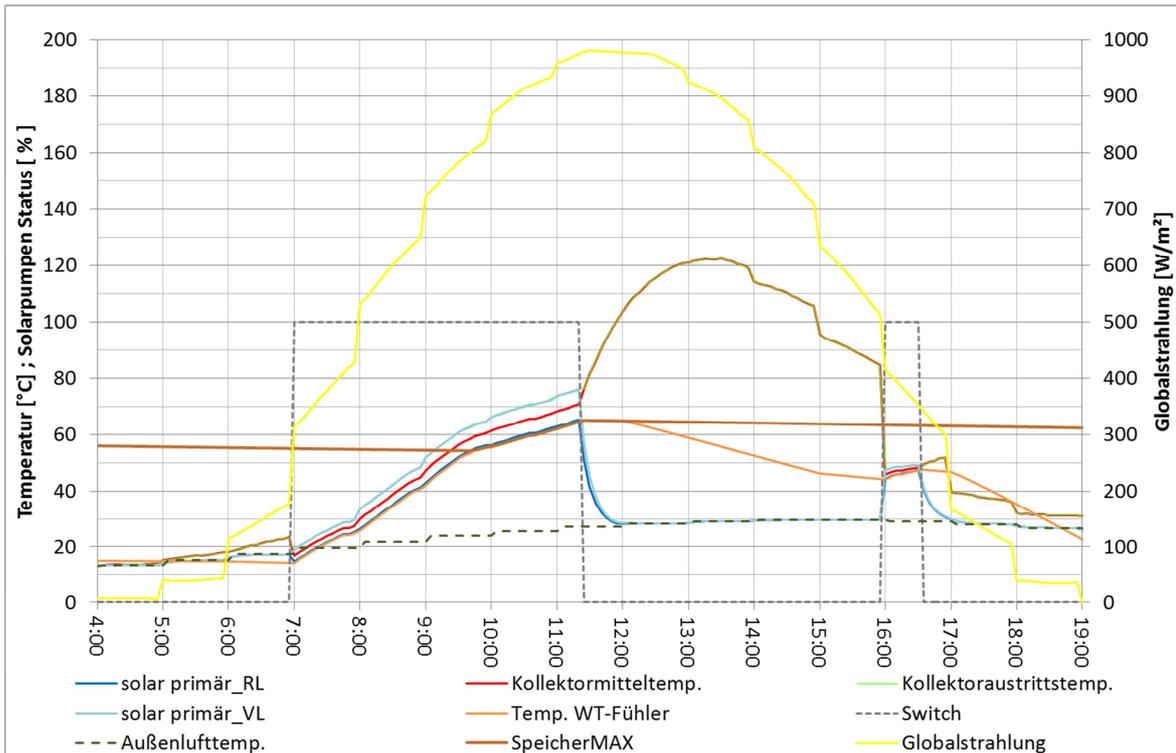


Abbildung 6-12: Tagesverlauf des WW-KS-Systems mit Drain-Back-Tank (KS\_DB) am Standort Graz

In Abbildung 6-13 wird der Tagesverlauf des KS-Systems mit Rückkühlung dargestellt. Der Tagesbeginn der WW-Anlage ist nahezu gleich wie jener des Drain-Back-Systems in Abbildung 6-12. Der Unterschied wird nach 11:30 Uhr sichtbar. Nachdem der Speicher vollständig beladen wurde, schaltet die Pumpe aus und die Kollektortemperatur steigt rapide an. Erreicht die Temperatur nun aber über 90 °C setzt die Rückkühlung ein und kühlt den Kollektor rasch ab. Gut zu sehen am Zickzackverlauf der Kollektormitteltemperatur zwischen 11:00 und 15:00 Uhr. Da die Kollektortemperaturen so unter 100 °C gehalten werden können und im Kollektor selbst ein geringer Überdruck angenommen wurde, besteht keine Gefahr der Dampfbildung. Somit kann auch während der strahlungsintensiven Tagesphase Wärme vom Kollektor in den Speicher eingespeist werden, sobald die Fühlertemperatur 2 unter die voreingestellten 60 °C sinkt. Im Diagramm tritt dieser Fall um 13:00 und 14:10 Uhr auf.

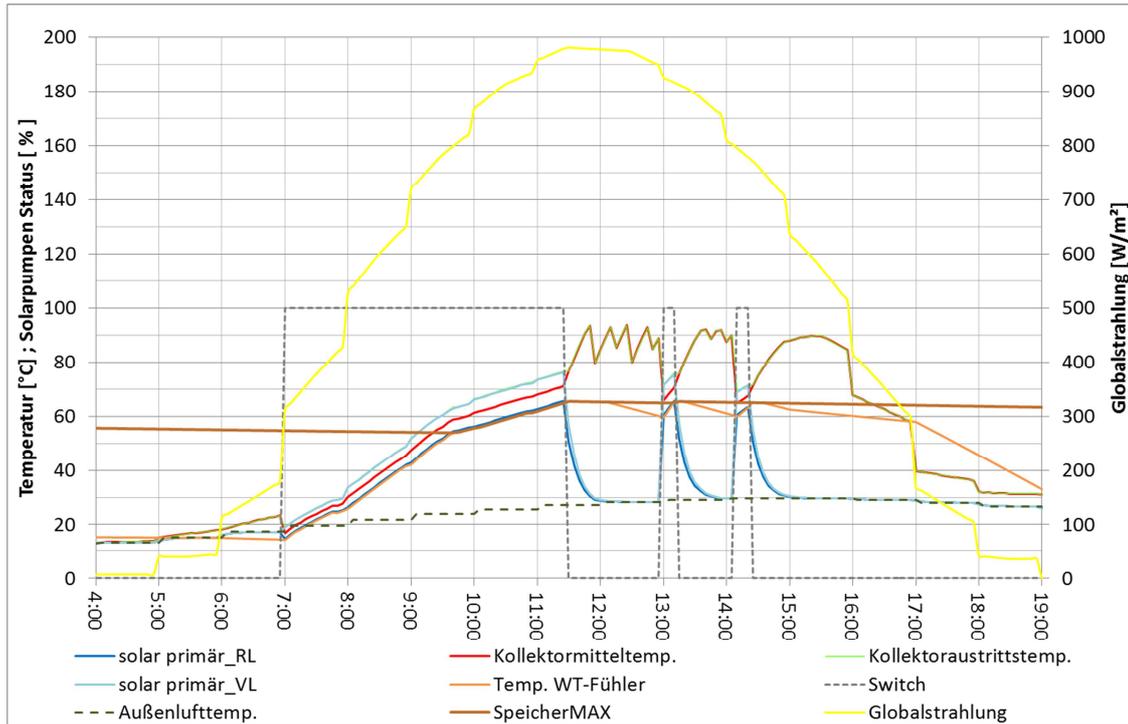


Abbildung 6-13: Tagesverlauf des WW-KS-Systems mit Rückkühlung (KS\_RK) am Standort Graz

Um die Simulation des Rückkühlungsmechanismus in SHW besser erklären zu können, ist der Tagesverlauf zwischen 11:00 und 14:00 Uhr nochmals vergrößert in Abbildung 6-14 dargestellt. Wie bereits erwähnt, laufen die Simulationen in SHW in 5 Minuten Zeitschritten ab. Die Entscheidung darüber, ob die Rückkühlung zum momentanen Zeitpunkt simulationstechnisch hinzugeschaltet wird oder nicht und mit welcher Leistung, hängt von der Kollektortemperatur vor 5 min und in weiterer Folge vom dazugehörigen Korrekturfaktor  $f_1$  ab.

Um 11:40 Uhr liegt die Kollektortemperatur noch unter 90 °C. Somit wird im nächsten Zeitschritt um 11:45 Uhr bei der Berechnung der Kollektorkennlinie von einem  $f_1$ -Wert von 1,0 ausgegangen (siehe: Tabelle 6). Die Rückkühlung ist also noch nicht aktiv, da die Temperatur 5 min davor, also um 11:40 Uhr als Bezugspunkt herangezogen wird und wie bereits erwähnt unter 90 °C lag. Um 11:45 Uhr beträgt die Temperatur knapp über 90 °C. Um 11:50 Uhr liegt die Temperatur nun auf 93,5 °C. Bei genauem Hinsehen ist auch eine Veränderung der Steigung zu erkennen, was auf das Hinzuschalten der Rückkühlung zurückzuführen ist, da die Kollektortemperatur 5 min zuvor bereits über 90 °C lag. Der Kühleffekt ist allerdings klein, da auch der Korrekturfaktor nur unwesentlich erhöht wird. Um 11:55 sinkt die Temperatur auf 79,5 °C ab, da die Rückkühlung nun mit

einem Korrekturfaktor von 2,54 (berechnet ausgehend von der Temperatur um 11:50 Uhr; 93,5 °C) in Gleichung 6-1 eingeht.

Bei realer Umsetzung würde die Kollektormitteltemperatur wesentlich geringeren Schwankungen unterliegen, da die Rückkühlung hier über ein Thermoelement geregelt werden würde und so in Echtzeit auf die Rückkühlungsleistung eingegriffen werden kann.

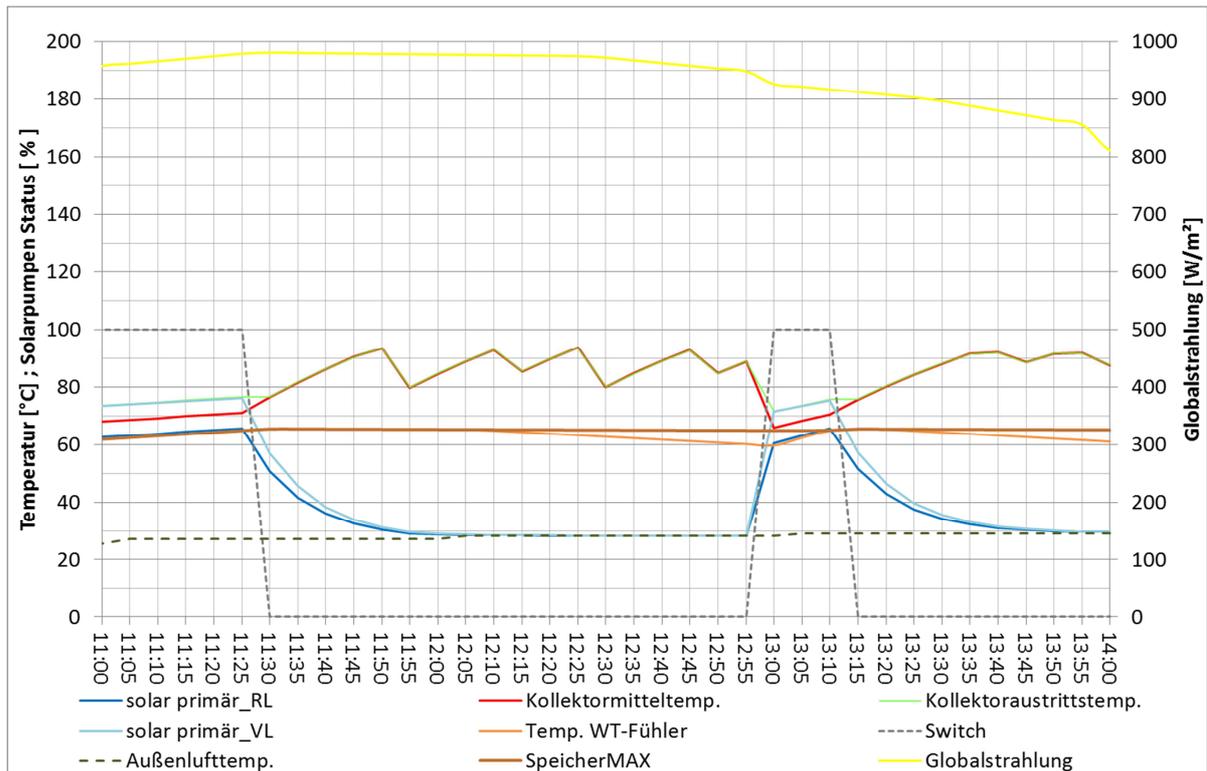


Abbildung 6-14: Zeitausschnitt aus Abbildung 6-13

Abbildung 6-15 zeigt nun das zweite Kühlprinzip in Form der Hinterlüftung an einem offenen System mit Drain-Back-Tank. Bis 11:30 Uhr gleicht der Tagesverlauf den Kunststoffsystemen aus Abbildung 6-12 und 6-13. Ab 11:40 Uhr beginnen sich die Lüftungsklappen zu öffnen. Ab 12:15 Uhr sind die Klappen vollständig geöffnet. Da sich der Großteil der Änderung des Korrekturfaktors in einem doppelt so großen Temperaturintervall (90 auf 100 °C) wie bei der Rückkühlung abspielt und die Änderung der Faktors von 1 auf 1,68 im Vergleich zur Rückkühlung (1 auf 3,2) deutlich kleiner ist, sind hier auch wesentlich geringere Schwankungen der Kollektortemperatur zu beobachten. Die etwas größeren Temperaturschläge um 14:00 und 15:00 Uhr sind auf das abrupte Absinken der Globalstrahlung zurückzuführen. Da die Kollektorbetriebstemperatur aufgrund der Positionierung des Drain-Back-Tanks auf 80

°C begrenzt wurde, kommt es während der intensiven Strahlungsphase zu keiner zusätzlichen Beladung des Speichers, obwohl Fühlertemperatur 2 (ab 12:20 Uhr unter 60 °C) das zuließe. Wenn man jedoch die Betriebszeiten des Kunststoffsystems mit Rückkühlung an diesem Tag mit jenen des offenen Drain-Back-Systems mit Hinterlüftung vergleicht, ist der Unterschied bei den gegebenen Rahmenbedingungen vernachlässigbar. Ähnliches zeigt sich bei der Gegenüberstellung der Betriebszeiten des gesamten Jahres. KS\_RK kommt hier auf 1583 h und KS\_HL\_DB auf 1573 h. Der solare Deckungsgrad von KS\_RK ist also kaum höher als jener von KS\_HL\_DB. Erst durch das Zusammenspiel mehrere Faktoren wie z.B. starker Verkleinerung des Speichervolumens (Halbierung), starker Vergrößerung des Warmwasserverbrauchs (Verdoppelung), Veränderung des Zapfprofils hin zu hohem WW-Verbrauch während globalstrahlungsstärkster Tageszeit und hohe Globalstrahlung (wie in Phoenix) kann mit Rückkühlung (und auch Hinterlüftung) eine höhere solare Deckung erzielt werden als ohne was sich in einer Zunahme von rund 4-5 % widerspiegelt.

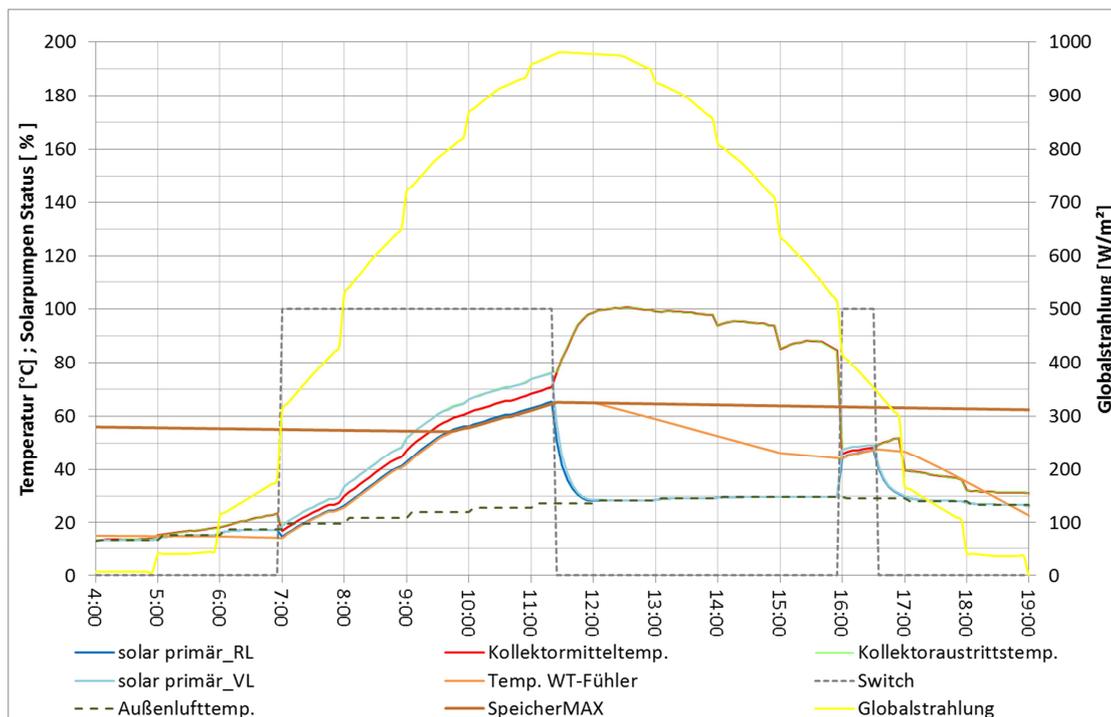


Abbildung 6-15: Tagesverlauf des WW-KS-Systems mit Drain-Back-Tank und Hinterlüftung (KS\_HL\_DB) am Standort Graz

Das letzte Kunststoffsystem ist in Abbildung 6-16 zu sehen. Es handelt sich um ein geschlossenes, druckbehaftetes System, dessen Kollektor mit einer Hinterlüftungseinrichtung ausgestattet ist. Um 11:50 Uhr beginnen sich die

Lüftungsklappen das erste Mal zu öffnen, da die Temperatur um 11:45 Uhr knapp über 90 °C liegt (gleicher Simulationsalgorithmus wie bei der Rückkühlung). Der Effekt der Hinterlüftung (Öffnung der Klappen) wird umso größer, je höher die Kollektortemperatur ansteigt (begrenzt durch die maximale Klappenöffnung bzw. einem Korrekturfaktor  $f_1=1,7$ ). Somit flacht der Verlauf der Kollektortemperatur über die Tageszeit immer mehr ab und hält sich zwischen 12:05 und 13:00 Uhr bei um die 100 °C. Da das System keinen Drain-Back-Tank besitzt, wird die maximale Kollektorbetriebstemperatur wieder mit 120 °C festgelegt, wodurch es der Anlage möglich ist, auch bei hoher Einstrahlung gegebenenfalls Wärme einzuspeisen. Zu sehen jeweils um 13:05 und 14:15 Uhr. Die Fühlertemperatur 2 fällt unter 60 °C und die Anlage kann bis zum Erreichen von 65 °C wieder in Betrieb genommen werden.

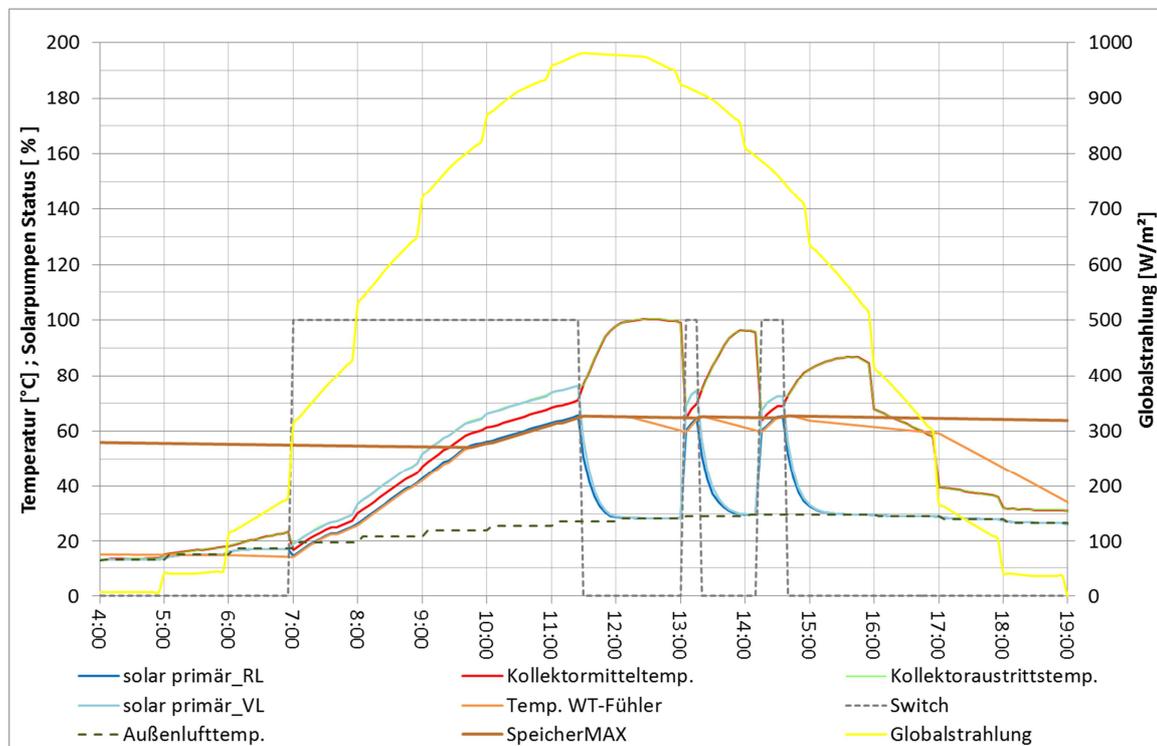


Abbildung 6-16: Tagesverlauf des WW-KS-Systems mit Hinterlüftung (KS\_HL\_G) am Standort Graz

## 6.6 Bestimmung der Kollektorfläche in Kunststoffausführung

Da die Wirkungsgradkennlinie der Kunststoffkollektoren schlechter ist als die der Referenzkollektoren, muss, um den gleichen solaren Deckungsgrad zu erreichen wie eine herkömmliche Anlage, die Fläche des Kollektors dementsprechend erhöht werden. Auch die Speichergröße sollte mit steigender Kollektorfläche erhöht werden (speziell bei den Kombi-Systemen), um die Effizienz zu steigern und so den geforderten solaren

Deckungsgrad bei geringerer Kollektorfläche zu erreichen. Bei den Simulationen ist deshalb von einer Speichergrößenerhöhung von 50 l/m<sup>2</sup> ausgegangen worden.

In Abbildung 6-17 wird die notwendige Flächenvergrößerung am Beispiel von Graz grafisch dargestellt. Blau und rot strichliert sind jeweils die Verläufe des solaren Deckungsgrades des Referenzsystems bzw. des Kunststoffsystems mit Rückkühlung. Der solare Deckungsgrad (SD) wird nach Gleichung 6-2 definiert als:

$$SD = \frac{\text{Solarenergie an Speicher}}{\text{Solarenergie an Speicher} + \text{Energie des Wärmeerzeugers an Speicher}} \quad (\text{Gl. 6-2})$$

Da in Tabelle 5 das Referenzsystem in Graz mit 6 m<sup>2</sup> Kollektorfläche und einer Speichergröße von 300 l definiert ist, kommt man mittels dynamischer Jahressimulationen mit dem Simulationsprogramm SHW auf einen solaren Deckungsgrad von 70 %. Um die gleiche solare Deckung für das Kunststoffsystem (hier: KS\_RK) zu erreichen, benötigt man aber eine Kollektorfläche von 8,5 m<sup>2</sup> bei einem Speichervolumen von 425 l. Die Kollektorfläche als auch die Speichergröße des Kunststoffsystems erhöhen sich also um mehr als 41 % im Vergleich zum Referenzsystem, was sich wiederum auch in den Kosten niederschlägt (siehe hierzu Kapitel 7).

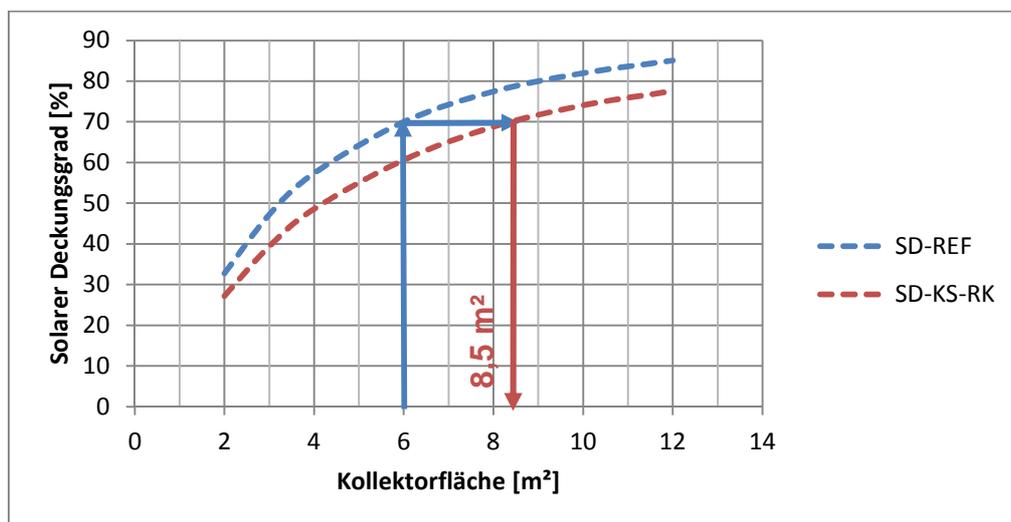


Abbildung 6-17: Kollektorflächenvergleich der WW-Anlagen zwischen Referenzsystem und Kunststoffsystem mit Rückkühlung am Standort Graz

In Tabelle 9 und 10 werden nun alle Kunststoffsysteme mit der auf den solaren Deckungsgrad des Referenzsystems (REF) angepassten Kollektorfläche, die Flächen

der Referenzsysteme selbst und auch der jeweilige solare Deckungsgrad gezeigt. Dabei ist bei der Simulation so vorgegangen worden, dass der solare Deckungsgrad, den es für das WW-Kunststoffsystem zu erreichen gilt, vom solaren Deckungsgrad des Referenzsystems um nicht mehr als +0,3 % abweicht. Die Unterschiede der WW-Kunststoffsysteme an ein und demselben Standort liegen nie höher als  $\Delta SD = 0,2 \%$ . Für die Kombi-Kunststoffsysteme liegen die Abweichungen des solaren Deckungsgrades von der Kollektorfläche des Referenzsystems ebenfalls bei +0,3 %. Die Abweichungen der Kombi-Kunststoffsysteme untereinander betragen am selben Standort nicht mehr wie  $\Delta SD = 0,25 \%$ .

Tabelle 9: Solare Deckungsgrade und Kollektorflächen aller WW-Systeme an allen Standorten

	Solarer Deckungsgrad [%]	Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]				
		REF	KS_DB	KS_RK	KS_HL_DB	KS_HL_G
<b>Antalya</b>	90,6	4,4	5,4	5,3	5,4	5,3
<b>Graz</b>	70	6	8,6	8,5	8,6	8,5
<b>Jacksonville</b>	71,3	5,4	6,3	6,2	6,3	6,2
<b>Ottawa</b>	63,4	6	6,7	6,7	6,7	6,7
<b>Peking</b>	85,6	3,6	3,9	3,9	3,9	3,9
<b>Phoenix</b>	75,5	5,4	6,3	6,2	6,3	6,2

Aus Tabelle 9 ist zu sehen, dass das Kunststoffsystem mit Drain-Back-Tank (KS-DB) und das Kunststoffsystem mit Hinterlüftung und Drain-Back-Tank (KS\_HL\_DB) die gleichen Kollektorflächen besitzen. Dasselbe gilt für das Kunststoffsystem mit Rückkühlung (KS\_RK) und jenes mit Hinterlüftung (KS\_HL\_G). Die gleiche Kollektorfläche zwischen KS\_DB und KS\_HL\_DB erklärt sich damit, dass sich beide Kollektorkennlinien bis 90 °C gleichen (siehe Abbildung 6-10) und zusätzlich die Betriebstemperatur beider Systeme mit 80 °C beschränkt ist, womit beide Simulationen zu denselben Ergebnissen führen.

Es zeigt sich auch, dass die Kollektorflächen der geschlossenen Kunststoffsystemen (KS\_RK und KS\_HL\_G) gegenüber den offenen Systemen (KS\_DB und KS\_HL\_DB) etwas kleiner ausgelegt werden können (z.B. Graz: um 0,1 m<sup>2</sup> oder 1,6%), um den gleichen solaren Deckungsgrad zu erreichen, da in den Phasen in denen das Drain-Back-System stagniert, die Kunststoffsysteme mit Kühlmechanismus trotzdem in der

Lage sind, Wärme einzuspeisen. Mit Erhöhung der Kollektorgröße der geschlossenen Kunststoffsysteme, bleibt der Unterschied (solarer Deckungsgrad) zu den offenen KS-System aber gleich. Zu sehen in Tabelle 10, wo der Flächenunterschied für Graz ebenfalls bei ca 1,6 % liegt. Beim Vergleich von KS-RK mit KS\_HL\_G sind zwar Unterschiede vorhanden, diese sind aber gering (bei gleicher Fläche:  $\Delta SD \approx 0,03 \%$ ). Die Flächenvergrößerung des Kunststoffkollektors (von KS\_RK) in Antalya liegt im Vergleich zum Referenzkollektor bei ca 20,5 %. Da der Referenzkollektor in Graz die besten Kollektorkennwerte innerhalb der 6 verschiedenen Standorte besitzt, ist hier der Unterschied zum Kunststoffkollektor am größten und liegt bei den erwähnten 41 %. Jacksonville und Phoenix kommen jeweils auf 15 %. Der Flächenunterschied in Ottawa liegt bei über 11 %. In Peking ist der Unterschied am geringsten und beträgt rund 8 %. Die unterschiedlichen solaren Deckungsgrade an den verschiedenen Standorten sind einerseits auf die gewählten Rahmenbedingungen (siehe Tabelle 5) und andererseits auf die klimatischen Unterschiede (Globalstrahlung) zurückzuführen. Die höchste solare Deckung wird so in Antalya erreicht und liegt bei 90 %.

Tabelle 10: Solare Deckungsgrade und Kollektorflächen aller Kombi-Systeme an allen Standorten (Graz, Ottawa, Peking)

	Solarer Deckungsgrad [%]	Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]				
		REF	KS_DB	KS_RK	KS_HL_DB	KS_HL_G
<b>Graz</b>	47,5	16	24,8	24,4	24,8	24,4
<b>Ottawa</b>	43,5	18	21,4	21	21,4	21
<b>Peking</b>	37,8	16	17,5	17,2	17,5	17,2

Tabelle 10 gibt nun die notwendige Kollektorflächenerhöhung der Kombi-Kunststoffsysteme zur Erreichung des solaren Deckungsgrades des Referenzsystems (REF) wieder. Vor allem der große Unterschied am Standort Graz zwischen REF und den Kunststoffsystemen sticht hervor und beträgt mehr als 50 % der Referenzkollektorfläche (16 m<sup>2</sup>), was grafisch auch in Abbildung 6-18 dargestellt wurde. Blau strichliert die Veränderung des solaren Deckungsgrades des Referenzsystems über die Kollektorfläche im Vergleich zu KS\_DB (orange strichlierte Linie). Die Kollektorfläche von KS\_DB muss somit auf 24,8 m<sup>2</sup> erhöht werden. Gründe dafür sind einerseits der hocheffiziente Referenzkollektor in Graz und andererseits die stetig geringer werdende Steigung des SD-Verlaufs von KS\_DB im Vergleich zum

Referenzsystem, wodurch die prozentuelle Flächenvergrößerung zwischen den beiden Systemen mit steigender Referenzkollektorfläche immer mehr ansteigt. In Ottawa und besonders in Peking sind die Unterschiede geringer. Diese liegen bei ca. 19 bzw. 9,5 %.

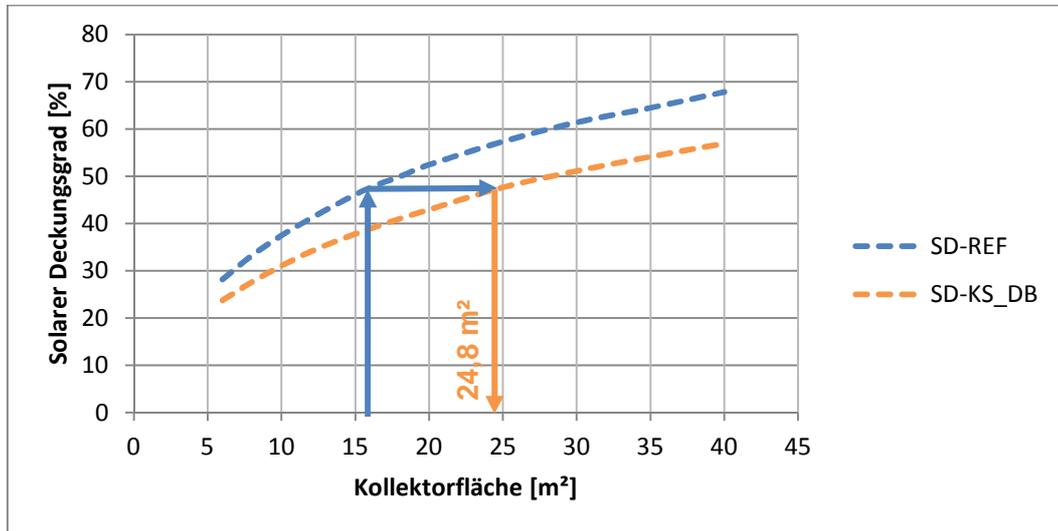


Abbildung 6-18: Kollektorflächenvergleich der Kombi-Anlagen zwischen Referenzsystem und Kunststoffsystemen mit Drain-Back-Tank am Standort Graz

## 7 WÄRMEGESTEHUNGSKOSTEN

In diesem Kapitel werden die Wärmegestehungskosten für die Referenzsysteme und die Kunststoffsysteme behandelt.

Unter den Wärmegestehungskosten versteht man die Kosten, die bei jeder erzeugten Wärmeeinheit (kWh) über die gesamte Lebensdauer der Anlage anfallen (einschließlich der Investitionskosten).

Die für die Berechnung der Wärmegestehungskosten herangezogene Formel (Kost et al, 2013) ist:

$$WGK = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1+i)^t}} \quad (\text{Gl. 7-1})$$

$WGK$	[€/kWh]	Wärmegestehungskosten
$A_t$	[€]	jährliche Betriebskosten in €
$I_0$	[€]	Investitionssumme in €
$Q_t$	[kWh]	solarer Nutzwärmeertrag
$i$	[-]	Realzinssatz
$n$	[-]	wirtschaftliche Nutzungsdauer
$t$	[-]	Jahr der Nutzungsperiode

Gleichung 7-1 basiert auf der Kapitalwertmethode (Bauer, 2012). Alle Kosten und auch Erträge die während der gesamten Lebensdauer der Anlage anfallen, werden auf einen Zeitpunkt (hier:  $t=0$ , Jahr in dem die gesamte Investitionssumme  $I_0$  bezahlt wird) abgezinst. Als Zinsfaktor ( $i$ ) dient hier der Realzinssatz, der die Inflation und den gewählten kalkulatorischen Zinssatz berücksichtigt und sich aus Gleichung 7-2 berechnen lässt.

$$\text{Realzinssatz} = \frac{\text{kalkulatorischer Zinssatz} - \text{Inflation}}{1 + \text{Inflation}} \quad (\text{Gl. 7-2})$$

Die solare Nutzwärme, darunter ist die vom Kollektor an das Fluid abgegebene Wärmemenge zu verstehen, wird ebenfalls abgezinst, da sie verkauft werden könnte und somit als Ertrag gesehen wird.

In Tabelle 11 sind die für die Berechnung der Wärmegestehungskosten verwendeten Parameter zusammengefasst.

Tabelle 11: Parameter bei der Berechnung der Wärmegestehungskosten

<b>Subventionsfaktor</b>	<b>Inflation</b>	<b>Kapitalverzinsung</b>
0,00 %	2,00 %	3,00 %
<b>Lebensdauer (n)</b>	<b>Realzinssatz (i)</b>	<b>Wartungskostenfaktor</b>
25	1,96 %	1,00 %
<b>Systemkosten pro m<sup>2</sup> (WW-System)</b>	<b>Systemkosten pro m<sup>2</sup> (Kombi-System)</b>	
847,8 €/m <sup>2</sup>	788,5 €/m <sup>2</sup>	

Die Systemkosten für WW- und Kombi-Anlagen beruhen auf der Kostenanalyse aus Kapitel 4.1 (siehe Abbildung 4-3). Subventionen der Anlagen wurden nicht berücksichtigt.

Über die Systemkosten pro m<sup>2</sup> aus Tabelle 11 kann mit der jeweiligen Kollektorfläche unter Berücksichtigung von Speichergröße und Frostschutzvolumen die Investitionssumme  $I_0$  der Anlage berechnet werden (siehe hierzu auch Abbildung 7-8) Mittels des Wartungskostenfaktors werden die jährlichen Betriebskosten  $A_t$  berechnet. Diese entsprechen dabei 1 % der Investitionssumme. Da die Stromkosten nur einen geringen Einfluss 0,4-0,6 Eurocent/kWh auf die Gesamtkosten haben, wurden sie nicht berücksichtigt (siehe VDI 6002 Blatt I: 2004-09). Mit den heutzutage verwendeten Energieeffizienzpumpen und der seit 1. Jänner 2013 in Kraft getretenen europäische Ökodesign-Richtlinie sollte der Einfluss noch kleiner sein.

## 7.1 Wärmegestehungskosten ohne kunststoffspezifische Kostenreduktionen

Bei der Berechnung der Wärmegestehungskosten ist bei allen Referenzsystemen wie auch bei den Kunststoffsystemen von den aus der Kostenanalyse in Österreich ermittelten Systemkosten pro m<sup>2</sup> ausgegangen worden. Die Kostenunterschiede der

Kunststoffsysteme werden erst im Kapitel 7.2 berücksichtigt, um zuvor die Auswirkungen der geringeren Effizienz von Kunststoffkollektoren zu ermitteln. Die Unterschiede der WGK zwischen Referenz- und Kunststoffsystem ergeben sich unter diesen Randbedingungen durch die schlechtere Kollektorkennlinie des Kunststoffsystems (geringeres  $Q_t$ ) und die größere Kollektorfläche und Speichergöße des Kunststoffsystems (höheres  $I_0$ ).

Da sich die durchschnittliche Speichergöße aus der Kostenanalyse (450 l) allerdings von den Speichergößen der Referenzsysteme (siehe Tabelle 5) unterscheidet, wird der Speicherpreis zuvor durch einen aus der Kostenanalyse und diversen Solaranlagenanbieterkatalogen bestimmten Faktor (WW: 90 €/50 l, Kombi: 70 €/50 l) an das jeweilige Referenzsystem angepasst. Der aus der Kostenanalyse ermittelte durchschnittliche Speicherpreis beträgt ca. 1000 €. Somit beträgt der Preis für den Speicher des Referenzsystems in Graz (300 l) 730 €.

Bei den nachfolgenden Abbildungen wird der Preis des Kollektors und auch die Speichergöße (und somit der Speicherpreis) über die Kollektorfläche variiert. Ausgehend vom jeweiligen Referenzsystem wird das Speichervolumen pro m<sup>2</sup> um 50 l erhöht bzw. verringert. Das benötigte Frostschutzvolumen im Solarkreislauf wird ebenfalls durch die Kollektorfläche beeinflusst. Die Änderung des Frostschutzpreises durch die Verwendung eines Kunststoffkollektors (größeres Volumen) wird aber erst in Kapitel 7.2 berücksichtigt. Alle anderen Komponentenpreise (auch Ausdehnungsgefäß) werden als konstant angenommen.

In Abbildung 7-1 sind die Wärmegestehungskosten (durchgezogenen Linien) und auch der solare Deckungsgrad (strichlierte Linien) der WW-Systeme am Standort Graz dargestellt. Da sich der solare Deckungsgrad und in weiterer Folge auch die WGK der Kunststoffsysteme wegen ähnlicher Wirkungsgradkennlinie und Systemkosten kaum voneinander unterscheiden, werden nur die Kosten des Referenzsystems mit KS\_HL\_DB verglichen. Für das Referenzsystem (blau) ergeben sich damit WGK von 10 Eurocent/kWh bei einer Kollektorfläche von 6 m<sup>2</sup> und einer Speichergöße von 300 l. Beim Kunststoffsystem (grün) fallen bei gleichem solarem Deckungsgrad WGK von knapp 11,7 Eurocent/kWh an, die auf den schlechteren Wirkungsgrad des Kollektors, die höhere Kollektorfläche (8,5 m<sup>2</sup>) und das größere Speichervolumen (425 l) zurückzuführen sind. Erwähnenswert ist auch, dass es sich hier ziemlich genau um das Minimum der WGK des KS-Systems unter den gegebenen Randbedingungen handelt.

## Wärmegestehungskosten

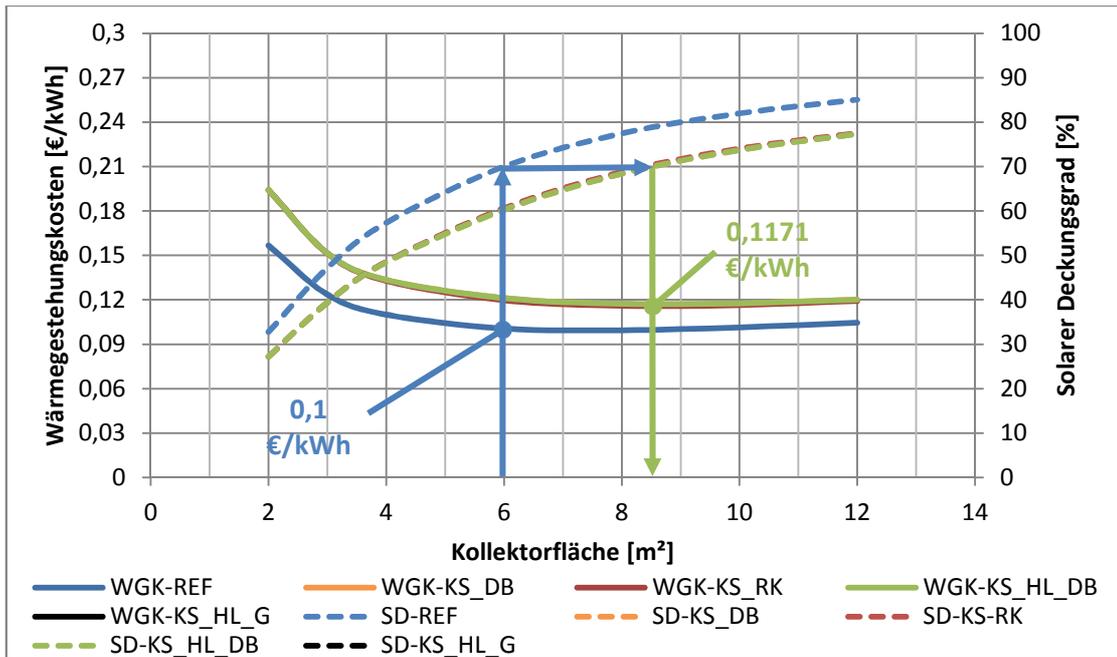


Abbildung 7-1: Wärmegestehungskosten der WW-Systeme am Standort Graz

Abbildung 7-2 zeigt die WGK der Kombi-Systeme in Graz mit dem dazugehörigen solaren Deckungsgrad. Wie bereits am Ende von Kapitel 6.6 erwähnt, führen jeweils Drain-Back-Systeme als auch KS\_RK und KS\_HL\_G bei gleicher Fläche zum gleichen solaren Deckungsgrad und wegen der derzeit gleich angenommen Systemkosten damit auch zu den gleichen WGK. Da die maximale Kollektorbetriebstemperatur der offenen Drain-Back-Systeme mit 80 °C begrenzt ist, jedoch die geschlossenen überhitzungsgeschützten Systeme auf höherem Temperaturniveau arbeiten können, wird auch der Speicher dementsprechend auf höhere Temperaturen beladen, was sich in der Differenz des solaren Deckungsgrad widerspiegelt. Für die Drain-Back-Systeme ergeben sich somit WGK von 16,5 Eurocent/kWh bei einer Kollektorfläche von 24,8 m² und für die geschlossenen Systeme mit Überhitzungsschutz ein etwas niedrigerer Wert von 16,3 Eurocent/kWh bei einer Fläche von 24,4 m². Die WGK der Referenzanlage fallen mit 13,4 Eurocent/kWh bei einer Fläche von 16 m² deutlich geringer aus.

## Wärmegestehungskosten

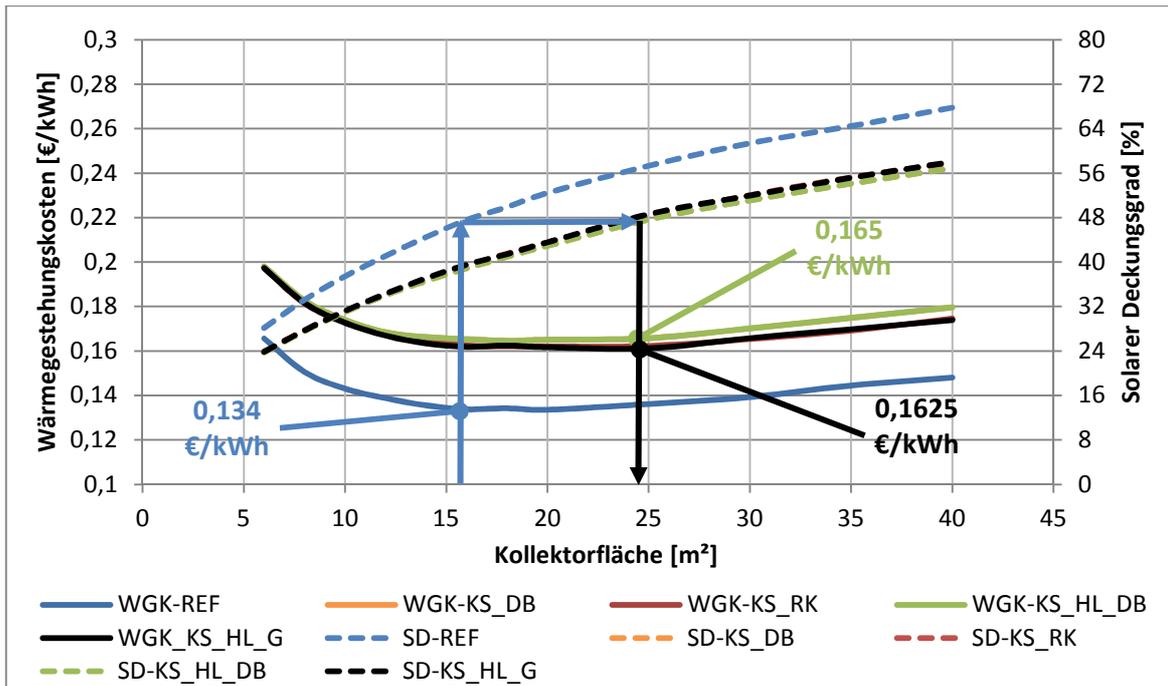


Abbildung 7-2: Wärmegestehungskosten der Kombi-Systeme am Standort Graz

In Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4 sind die WGK aller WW-Systeme bzw. Kombi-Systeme an allen Standorten zusammengefasst. Dabei besitzen die Systeme jedes Standortes jeweils denselben solaren Deckungsgrad (im Rahmen der in Kapitel 6.6 beschriebenen Abweichungen). Wie aus Abbildung 7-3 hervorgeht, sind die Differenzen bei den WGK, zwischen WW-Referenz- und WW-Kunststoffsystemen in Graz am größten (bedingt durch die sehr gute Kennlinie des Referenzkollektors). An den restlichen Standorten zeigen sich geringere Abweichungen. Grundsätzlich sind die WGK von KS\_DB und KS\_HL\_DB höher als bei KS\_RK und KS\_HL\_G.

## Wärmegestehungskosten

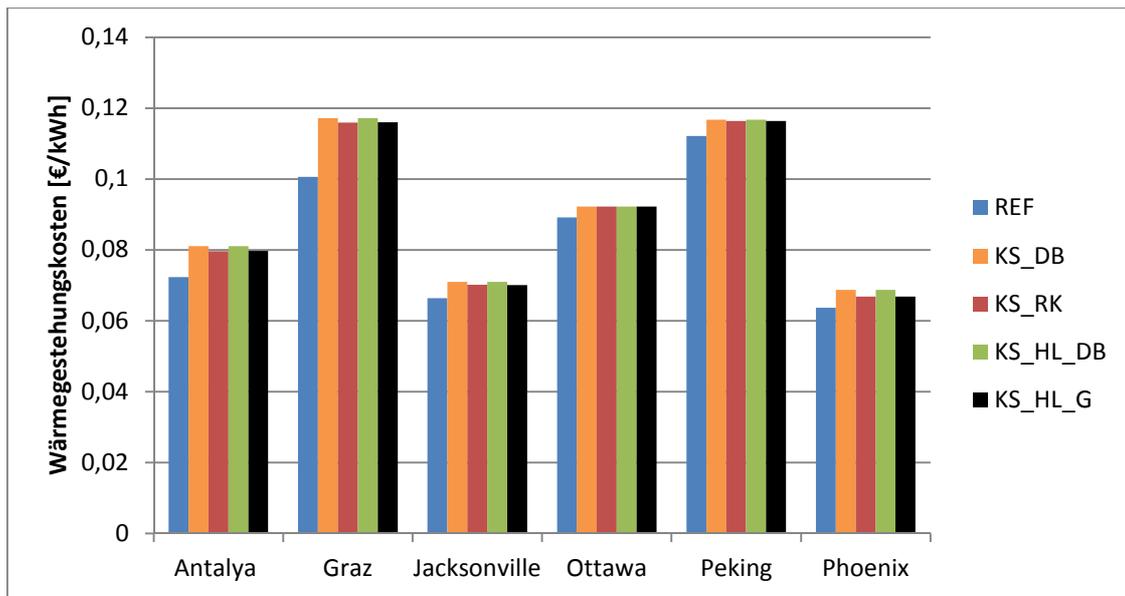


Abbildung 7-3: Wärmegestehungskosten aller WW-Anlagen bei gleichem solaren Deckungsgrad wie das standortübliche Referenzsystem

Wie in Abbildung 7-3 zeigen sich auch bei den Kombi-Systemen in Abbildung 7-4 die größten Unterschiede zwischen Referenz- und Kunststoffsystemen in Graz.

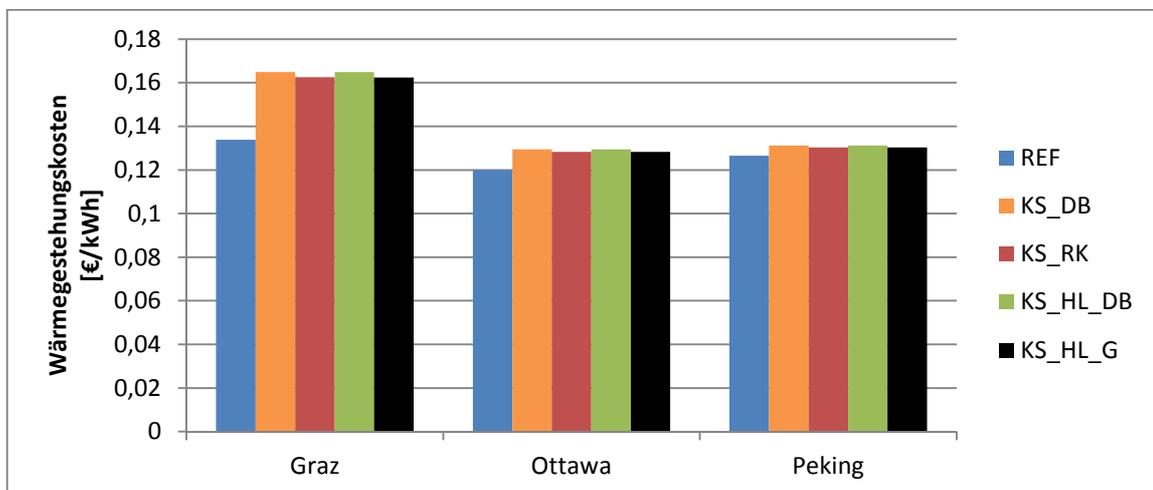


Abbildung 7-4: Wärmegestehungskosten aller Kombi-Anlagen bei gleichem solaren Deckungsgrad wie das standortübliche Referenzsystem,

Da im Projekt SolPol 4/5 im Vergleich zu konventionellen, gepumpten, solarthermischen Systemen eine Kostenreduktion bei Kunststoff/Hybridsystemen von bis zu 50 % angestrebt wird, sei in Abbildung 7-5 der Einfluss der Kostenreduktion auf das Kunststoffsystem mit Rückkühlung dargestellt. Die Kostenreduktion bezieht sich dabei auf die Investitionssumme  $I_0$  der Referenzsysteme. Im Diagramm sind jeweils Kostensenkungen von 10, 30 und 50 % dargestellt. Das Referenzsystem (blau) besitzt

## Wärmegestehungskosten

bei einer Kollektorfläche von 6 m<sup>2</sup> WGK von 10 Eurocent/kWh. KS\_RK (rot) kommt bei einer Kollektorfläche von 8,5 m<sup>2</sup> und der damit einhergehenden gleichen solaren Deckung wie das Referenzsystem auf WGK von 11,7 Eurocent/kWh. Bereits bei einer Reduktion der Kosten um knapp 13 % hätte das Kunststoffsystem bei gleichem solaren Deckungsgrad dieselben WGK wie das Referenzsystem. Bei einer Kostenreduktion von 30 % würden die WGK auf 8,17 Eurocent/kWh sinken. Beim Erreichen von 50 % ergeben sich die Kosten zu 5,8 Eurocent/kWh, womit die WGK im Vergleich zum Referenzsystem um 42 % gesenkt werden könnten.

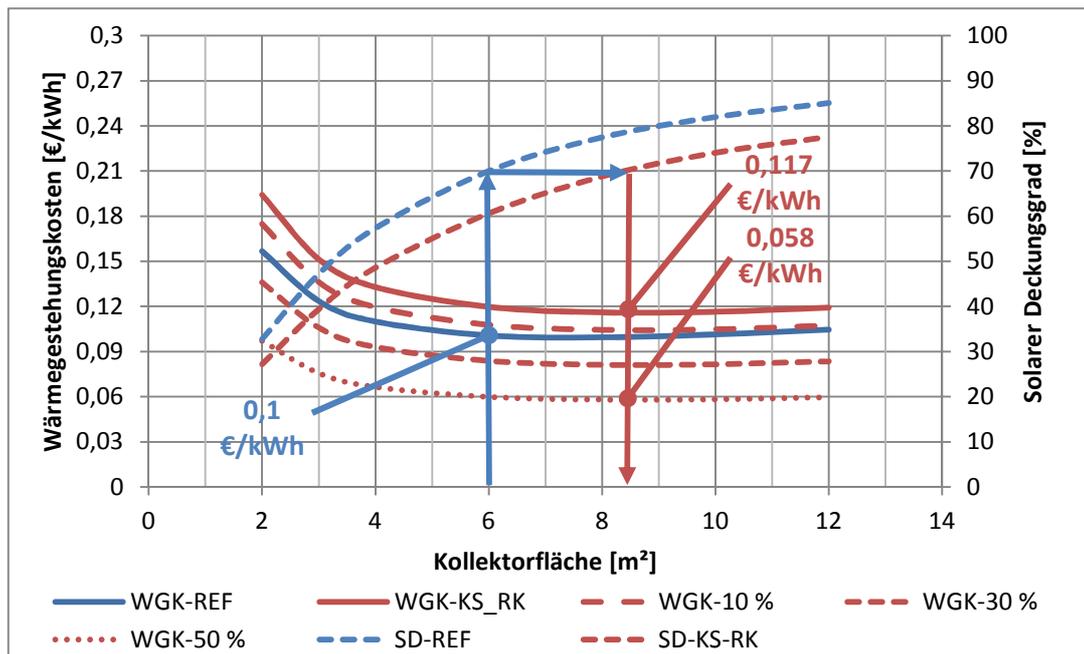


Abbildung 7-5: Einfluss der Kostenreduktion auf die WGK des WW-Kunststoffsystems mit Rückkühlung im Vergleich zum Referenzsystems in Graz

Analog dazu zeigt Abbildung 7-6 die Kostenreduktion für die Kombi-Anlage mit Rückkühlung in Graz. Bei einer Kollektorfläche von 16 m<sup>2</sup> liegen die WGK des Referenzsystems bei 13,4 Eurocent/kWh. KS\_RK liegt ohne Kostensenkung bei einer Fläche von 24,4 m<sup>2</sup> mit 16,5 Eurocent/kWh deutlich darüber. Um auf dieselben WGK wie das Referenzsystem zu kommen, beträgt die notwendige Gesamtkostenreduktion ca. 18 %. Eine Kostensenkung von 30 % führt zu einem Preis von 11,5 Eurocent/kWh. Sollte eine Kostenreduktion von 50 % möglich sein, betragen die WGK des Kunststoffsystems 8,1 Eurocent/kWh, womit die WGK des Kunststoffsystems um 39,5 % geringer sind als jene des Referenzsystems.

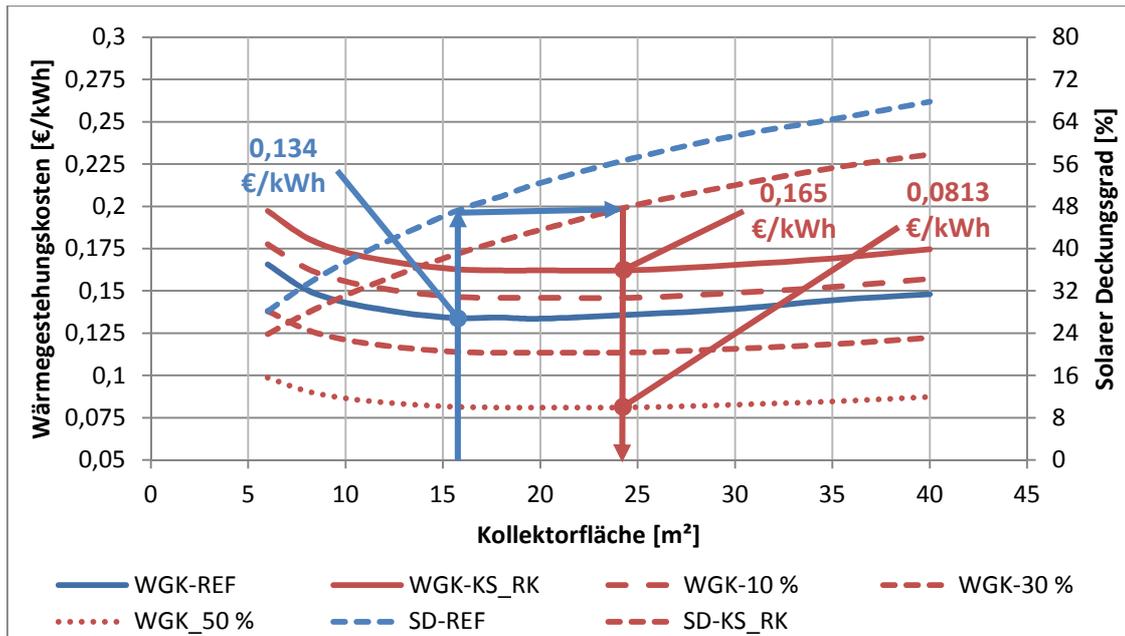


Abbildung 7-6: Einfluss der Kostenreduktion auf die WGK des Kombi-Kunststoffsystem mit Rückkühlung im Vergleich zum Referenzsystems in Graz

## 7.2 Wärmegestehungskosten mit kunststoffspezifischen Kostenreduktionen

In diesem Kapitel sollen mögliche kunststoffspezifische Kostenreduktionspotentiale und deren Auswirkungen auf den Wärmegestehungspreis aufgezeigt werden. Hierbei wurden im ersten Schritt für die in Kapitel 4 erarbeiteten Komponentengruppen Reduktionspotentiale durch ein Expertengespräch mit Sunlumo, die ebenfalls in SolPol-4/5 involviert ist, ermittelt und in weiterer Folge die Ergebnisse tabellarisch zusammengefasst. Die Reduktionspotentiale ergeben sich aus dem Vergleich zwischen Komponentenpreisen der Kostenanalyse aus Kapitel 4 und den von Sunlumo angestrebten Preisen. Nachfolgend wird auf die Reduktionspotentiale kurz eingegangen:

Anhand der prozentuellen Kostenstruktur der Referenzsysteme mit 7,4 m<sup>2</sup> und 18,1 m<sup>2</sup> Kollektorfläche (siehe Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2) ist zu erkennen, dass das Kollektorfeld rund 1/3 der Gesamtkosten ausmacht. Im EU-Projekt „SCOOP Solar Collectors made of Polymers“ wurden die Herstellkosten von Kunststoffkollektoren aus dem Hochleistungskunststoff PPS (rot) im Vergleich zu herkömmlichen Metallkollektoren (blau) in Abhängigkeit von der jährlichen produzierten Einheit ermittelt (siehe Abbildung 7-7). Aus dieser Analyse geht hervor, dass die Herstellkosten mit größer werdender Stückzahl um bis zu 30 reduziert werden können. Massenproduktion

ist auch für die restlichen Komponenten ein wichtiges Kriterium, um die Kosten zu senken. Aufgrund des Expertengesprächs und dem Know-how aus dem Projektkonsortium wurde in dieser Arbeit eine mögliche Kostenreduktion für die Kollektoren von 67 % angenommen. Diese ergibt sich durch die Verwendung von günstigeren Kunststoffen (Standardkunststoffe und technische Kunststoffe) und optimierten Verarbeitungsverfahren. Hierbei wurde ebenfalls angenommen, dass es keine Kostenunterschiede bei den Kunststoff-Kollektorkonzepten gibt.

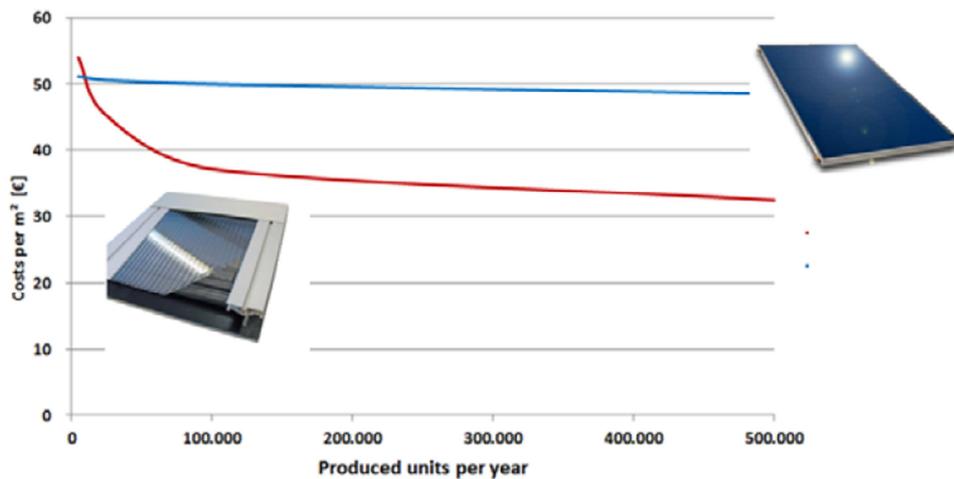


Abbildung 7-7: Vergleich Herstellungskosten von Metall- (blau) und Kunststoffkollektoren (rot) in Abhängigkeit von einer jährlichen Produktionsmenge (Poschanig et al, 2014)

Betrachtet man die Montage im Detail können die Installationskosten nach (Hafner 2012) um bis zu 35 % reduziert werden. Diese 35 % setzen sich aus mehreren Faktoren zusammen. Durch den Einsatz von 2 Personen die zusammen 1 Tag benötigen, reduziert sich die Gesamtzeit inkl. Anfahrtszeit usw. um 10 % im Vergleich zu einer Einzelperson die 2 Tage benötigt. Durch ein gut geschultes Personal können weitere 20 % an den Montagekosten reduziert werden, wenn die Systeme ordentlich installiert wurden, ohne dass es zu einem zusätzlichen Wartungsaufwand kommt und die Systeme von Beginn an ordnungsgemäß funktionieren. Eine 5 prozentige Kostenreduktion kann durch ein einfaches und schnell montierbares „Plug und Play“-Konzept erfolgen. Eine zusätzliche Kostenreduktion kann durch kunststoffspezifische Lösungen (geringeres Gewicht, usw.) erreicht werden. Dementsprechend wurde bei der Montage von einem Kostenreduktionspotential von 54 % ausgegangen.

Bei den Speichern können die Wärmegestehungskosten auf zwei Arten reduziert werden. Einerseits durch günstige Kunststofflösungen (offen/drucklos) und andererseits

durch eine Reduktion der Wärmeverluste und eine dadurch hervorgerufene Steigerung der Systemeffizienz. Die Wärmeverluste der Speicher wurden in dieser Arbeit nicht weiter analysiert. Aus dem Gespräch mit Sunlumo ergab sich ein Kostenreduktionspotential von 52 % für Kunststofflösungen.

Durch den Einsatz von Kunststoffen und die Beschränkung auf wesentliche Teile, ist bei der Rücklaufgruppe ein Einsparungspotential von bis zu 85 % möglich und geht auf das noch laufende Projekt SolStream zurück. Die Kosten für das Ausdehnungsgefäß können um 59 % reduziert werden, da bei den Systemen mit Kühlmechanismus keine Dampfgefahr besteht und somit kein Dampf volumen aufgenommen werden muss (Verkleinerung des Ausdehnungsgefäßes). Obwohl die offenen Drain-Back-Systeme ohne Ausdehnungsgefäß auskommen, wird dieser Kostenvorteil durch den zusätzlich benötigten Drain-Back-Tank wieder ausgeglichen (wird wie im Fall von Aventa der Speicher als Drain-Back-Tank ausgeführt, entfallen die Kosten aber). Das größte Einsparungspotential wird mit 87 % bei den Rohrleitungen erreicht. Dieser Wert beruht auf nicht veröffentlichten Forschungsergebnissen des SolPipe-Projekts, das sich mit kostenoptimierten Kunststoffrohrleitungen beschäftigt.

Die Kosten für den Brauchwassermischer bleiben gleich. Beim Frostschutz wird keine Kostenreduktion erreicht. Die Kosten erhöhen sich, da der Flüssigkeitsinhalt des Kunststoffkollektors ( $4,19 \text{ l/m}^2$ ) größer ist als der des Referenzkollektors ( $0,8 \text{ l/m}^2$ ).

Die möglichen Kostenreduktionen jeder Komponentengruppe in Bezug auf die Größe des durchschnittlichen WW--Systems aus der Kostenanalyse sind nochmals in Tabelle 12 zusammengefasst. Gewichtet man die Kostenreduktionen mit dem prozentuellen Anteil der Komponenten an den Gesamtkosten (siehe Abbildung 4-1), ergibt sich dadurch eine Kosteneinsparung von über 64 Prozent.

## Wärmegestehungskosten

Tabelle 12:mögliche Kostenreduktion der Kunststoffsysteme für WW- und Kombianlagen

	<b>Kostenreduktion des Kunststoffsystems [%]</b>
Kollektorfeld	67
Speicher	52
Rücklaufgruppe	85
ADG	59
Rohrleitungen	87
Montage	54
Brauchwassermischer	0
Frostschutz	0
Gesamt	64,2

Um die Ermittlung der Wärmegestehungskosten besser nachzuvollziehen, soll Abbildung 7-8 dienen. Im Diagramm sind jeweils die Gesamtkosten des WW-Systems aus der Kostenanalyse, des Referenzsystems und jenes des Kunststoffsystems in Graz, als auch die Kosten der jeweiligen Komponenten dargestellt. Der Unterschied zwischen den Gesamtkosten des konventionellen Systems (aus der Kostenanalyse) und des Referenzsystems ergibt sich durch die Anpassung der Speichergröße (von 450 l auf 300 l) und der Kollektorfläche (von 7,4 m<sup>2</sup> auf 6 m<sup>2</sup>). Der Frostschutzpreis verändert sich nur in geringem Maße für die Metallsysteme. Alle anderen Komponentenpreise bleiben gleich. Die erreichbare Kostenreduktion zwischen Referenzsystem und Kunststoffsystem beträgt 55,4 %. Dieser Wert weicht von den in Tabelle 12 genannten 64,2 % ab, da die Kollektorfläche (8,5 m<sup>2</sup>), der Speicher (425 l) und auch das Frostschutzvolumen größer sind als jene des Referenzsystems. Zu beachten sei auch die recht starke Steigung des Frostschutzpreises für das Kunststoffsystem im Vergleich zum Referenzsystem, da sich das spezifische Kollektorvolumen von 0,8 auf 4,19 l/m<sup>2</sup> erhöht. Dieser Effekt zeigt sich bei den Kombi-Systemen noch deutlicher, da größere Kollektorflächen eingesetzt werden. Der aus der Kostenanalyse ermittelte Frostschutzpreis beträgt 4,85 €/l.

## Wärmegestehungskosten

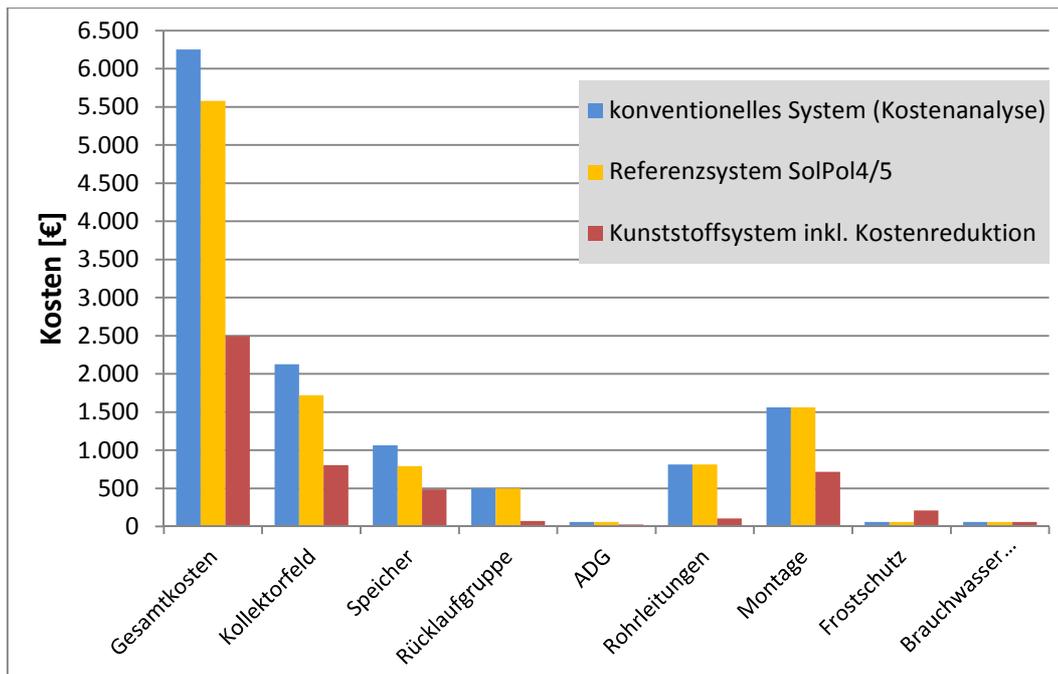


Abbildung 7-8: Kosten des durchschnittlichen WW-Systems aus der Kostenanalyse, Kosten des Referenzsystems und des Kunststoffsystems mit RK in Graz

Da sich die Referenzsysteme teilweise durch Kollektor- und Speichergroße unterscheiden, ist die erreichbare Kostenreduktion auch dementsprechend verschieden (siehe Tabelle 13).

Da an den anderen Referenzstandorten eine geringere Kollektorflächenerhöhung notwendig ist (um denselben solaren Deckungsgrad zu erreichen) können auch an diesen Standorten größere Kostenreduktionen erreicht werden. In Tabelle 12 sind diese Potentiale zusammengefasst. Man erkennt dass beispielsweise in Peking nahezu die vollen 64,2 % erreicht werden, da hier der Flächenunterschied bei den Warmwassersystemen nur bei 0,3 m<sup>2</sup> liegt. Hierbei sei nochmals darauf hingewiesen, dass sich die angenommenen Systemkosten (bis auf die Anpassungen für Kollektor, Speicher und Frostschutzvolumen) nicht durch den Standort unterscheiden. Vor allem in China sind Low-Cost-Systeme erhältlich, bei denen eine derartig hohe Kostenreduktion nicht erreicht werden kann. Jedoch wird bei den typischen chinesischen Systemen auch von einer Lebenszeit von 10 Jahren ausgegangen, (Mauthner et al, 2015) wodurch sich die WGK erhöhen würden.

Tabelle 13: Kostenreduktion des Kunststoffsystems mit RK im Vergleich zum Referenzsystem

<b>Kostenreduktion</b>	<b>Antalya</b> [%]	<b>Graz</b> [%]	<b>Jacksonville</b> [%]	<b>Ottawa</b> [%]	<b>Peking</b> [%]	<b>Phoenix</b> [%]
WW	59,9	55,4	60,2	60,1	62,34	60,2
Kombi	-	52,8	-	58,7	60,8	-

Abschließend ist in Abbildung 7-9 und 7-10 der Einfluss der Kostenreduktion auf die WGK der Kunststoffsysteme im Vergleich zum Referenzsystem am jeweiligen Standort für die WW- bzw. Kombi-Systeme grafisch dargestellt. In Antalya erreicht das WW-Referenzsystem WGK von 7,20 Eurocent/kWh. Die mögliche Kostenreduktion beläuft sich hier auf ca. 60 %. In Graz werden für die WW-Kunststoffsysteme ca. 4,45 Eurocent/kWh erreicht und stehen den 10 Eurocent/kWh des Referenzsystems gegenüber. In Jacksonville als auch in Phoenix können die WGK um ca. 60 % reduziert werden, wobei Phoenix aufgrund der starkgen Globalstrahlung die niedrigsten Werte aller 6 Standorte mit knapp 2,6 Eurocent/kWh aufweist. Das Kostenreduktionspotential von Ottawa liegt ebenfalls bei 60 % woraus WGK von 3,5 Eurocent/kWh für die Kunststoffsysteme folgen. Das Referenzsystem in Peking kommt zwar auf die höchsten WGK (11,2 Eurocent/kWh), da der Kunststoffkollektor allerdings kaum schlechter als der chinesische ist, kann das in Tabelle 12 ermittelte Gesamtkostenreduktionspotential nahezu ausgeschöpft werden, wodurch die WGK der Kunststoffsysteme (4,27 Eurocent/kWh) noch unter jene von Graz sinken.

Die in Abbildung 7-10 gezeigten WGK der Kombi-Kunststoffsysteme in Graz kommen durchschnittlich auf 6,35 Eurocent/kWh, was einer Kostenreduktion von 52,8 % entspricht. Die Kunststoffsysteme in Peking erreichen knapp 5 Eurocent/kWh. Ottawa liegt nur leicht darunter.

## Wärmegestehungskosten

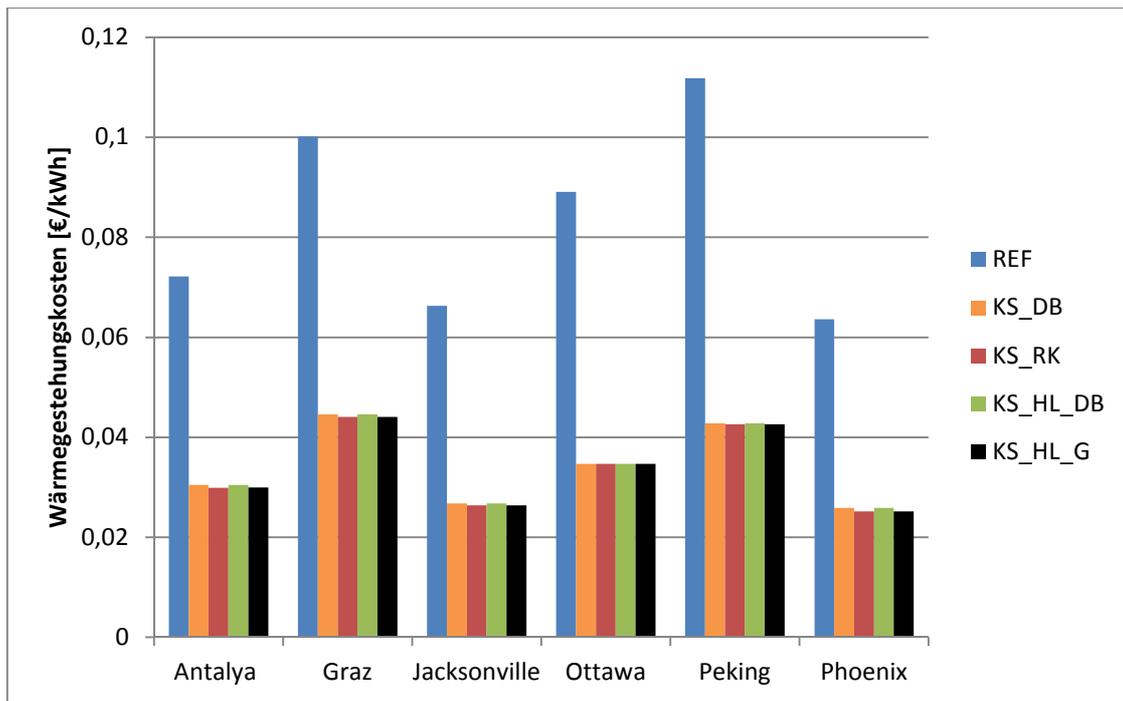


Abbildung 7-9: Wärmegestehungskosten der WW-Systeme unter Berücksichtigung der Kostenreduktion aus Tabelle 12

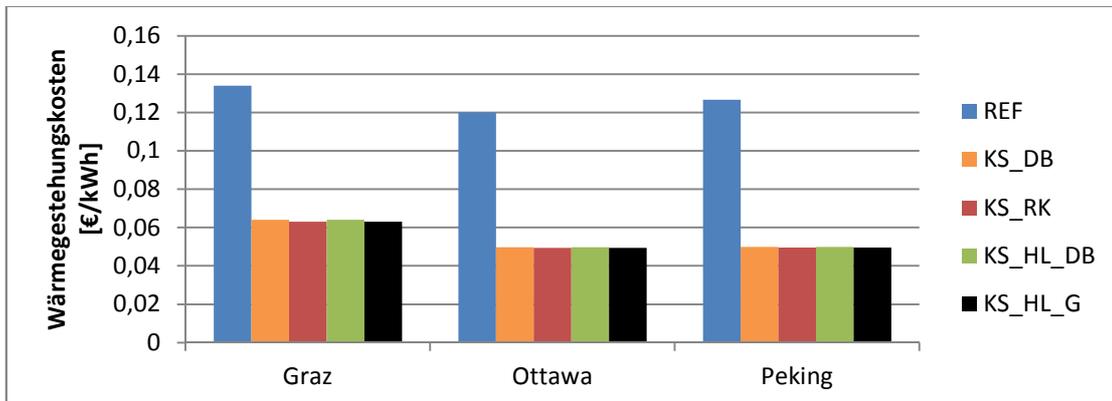


Abbildung 7-10: Wärmegestehungskosten der Kombi-Systeme unter Berücksichtigung der Kostenreduktion aus

## 8 TEMPERATURBELASTUNGEN

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Temperaturbelastungen des WW- und Kombi-Systems am Standort Graz beispielhaft dargestellt. Die restlichen Simulationsergebnisse für jeden Standort sind in Tabellenform im Anhang zu finden. Zum besseren Verständnis wird in Abbildung 8-1 das WW-System nochmals dargestellt und um die Beschriftung der Komponenten ergänzt, deren Temperaturverläufe in den nachfolgenden Diagrammen abgebildet werden. Bei den Kombi-Systemen werden die Temperaturen an denselben Stellen simuliert, womit Abbildung 8-1 als Referenz herangezogen werden kann.

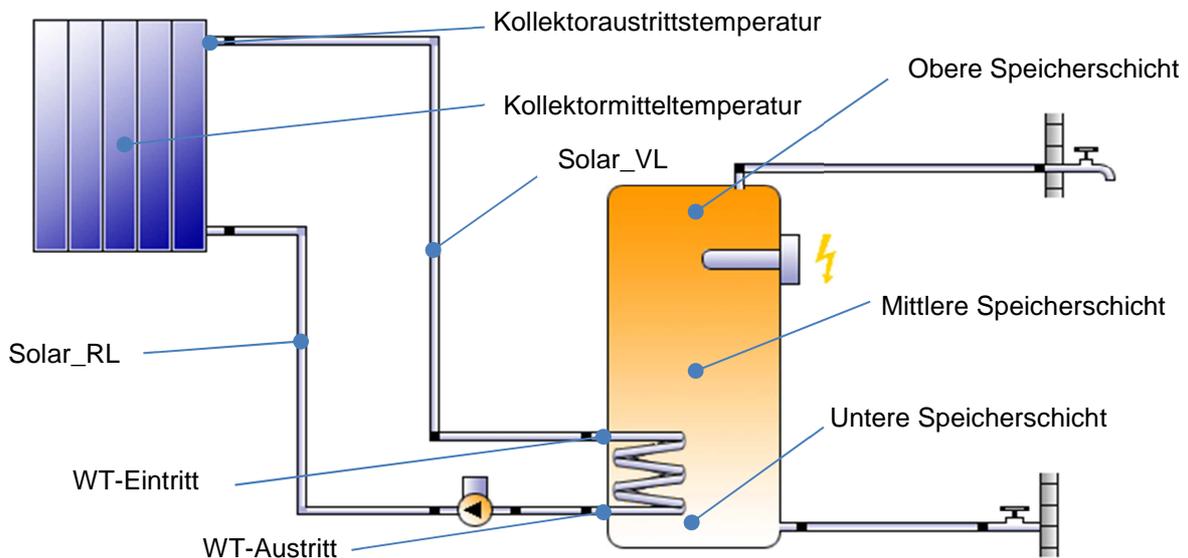


Abbildung 8-1: Temperaturen der WW-Anlage

Die Kollektormitteltemperatur ( $T\text{-Koll}_m$ ) ergibt sich aus dem Mittelwert zwischen Kollektoreintritts- und -austrittstemperatur ( $T\text{-Koll}_a$ ). Der solare Vorlauf (Solar\_VL) und Rücklauf (Solar\_RL) geben die Durchschnittstemperatur in der jeweiligen Rohrleitung an. Da es in SHW keine fixe Anzahl an Speicherschichten gibt, ist mit der unteren Speicherschicht ( $T\text{-Sp}_u$ ) immer die Schicht mit der kleinsten Temperatur gemeint, in deren Höhe sich der untere Wärmetauscheranschluss befindet. Die mittlere Speicherschicht ( $T\text{-Sp}_m$ ) gibt jene Temperatur wieder, die bei der Hälfte der Speicherhöhe herrscht. Die obere Speicherschicht ( $T\text{-Sp}_o$ ) ist diejenige Schicht, in der die höchste Speichertemperatur auftritt.  $T\text{-WT}_{\text{ein}}$  und  $T\text{-WT}_{\text{aus}}$  geben jeweils die

Temperatur mit der das Wärmeträgermedium in den Wärmetauscher ein- und ausströmt wieder.

### **8.1 Temperaturbelastungen des Referenzsystems zur WW-Bereitung in Graz**

Alle Systemtemperaturen sind zusammen in logarithmischer Darstellung in Abbildung 8-2 zu sehen. Hierzu wurden die Temperaturen in verschiedenen Klassen mit einer Intervallgröße von 5 K eingeteilt und deren Häufigkeit (Stunden im Jahr, in denen Temperaturen des Intervall auftreten) ermittelt. Bis auf den Kollektor werden innerhalb der Anlage keine Temperaturen höher als 80 °C erreicht, was anhand der maximalen Temperatur des Vorlaufs (T-Solar\_VL) zu sehen ist. Durch die Wärmeabfuhr an den Speicher ist maximale Temperatur im Rücklauf dementsprechend geringer (T-Solar\_RL). Das gilt nicht nur für Graz sondern auch für die simulierten WW-Systeme an allen anderen Standorten. Für den Einsatz von Standardpolymeren stellen die hier erreichbaren Temperaturen also kein Problem dar. Anders verhält es sich beim Kollektor. Wie anhand der roten Linie (Kollektormitteltemperatur) gut zu erkennen ist, ist ein Überhitzungsschutz für Kunststoffkollektoren unbedingt nötig, um Standardpolymere oder technische Kunststoffe einsetzen zu können, da hier wie bereits erwähnt Temperaturen von bis zu 187 °C erreicht werden können. Auch bei schlechteren Kollektorkennwerten in Kombination mit geringer Globalstrahlung werden bereits in Ottawa (siehe Abbildung 5-2) Temperaturen an die 140 °C erreicht.

Da am Kollektorausstritt von einem minimalen Druck von 1,5 bar ausgegangen wird, folgt daraus eine Siedetemperatur von 127,5 °C. Der für die Dampfbildung kritische Bereich liegt also bei über 125 °C. In Graz kommt man hier auf 144 h kumuliert über ein Jahr.

## Temperaturbelastungen

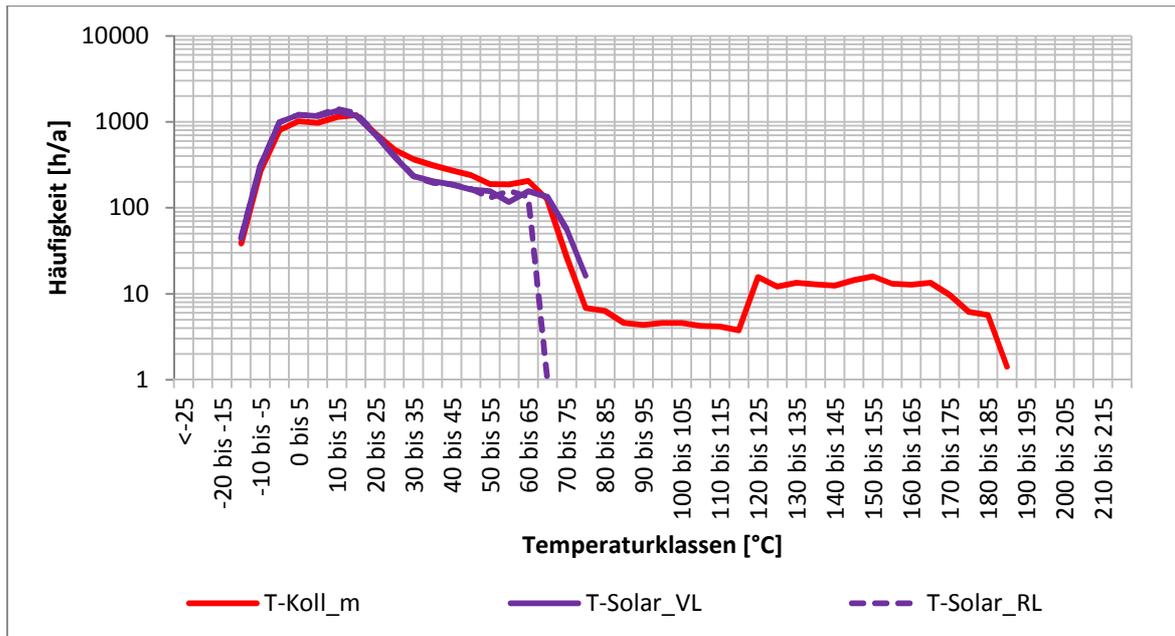


Abbildung 8-2: Häufigkeiten der Systemtemperaturen der WW-Referenzsystems in Graz

Abbildung 8-3 zeigt die Temperaturhäufigkeiten des WW-Referenz-Speichers am Standort Graz, die über das Jahr verteilt auftreten. Über die Hälfte des Jahres (4900 h) herrscht in der unteren Speicherschicht eine Temperatur zwischen 10 und 15 °C, da die durchschnittliche Kaltwassertemperatur rund 13 °C beträgt. Die Stundenhäufigkeit der mittleren Speicherschicht zeigt ein über die Temperaturklassen relativ gleichmäßig verteiltes Profil, wobei zwischen 55 und 60 °C die größte Häufigkeit auftritt. Die Temperaturen in der oberen Speicherschicht liegen durch die elektrische Nachheizung (E-Patrone) aufgrund der Regelung nahezu immer über 50 °C, was der Solltemperatur des Warmwasserverbrauchs in Graz entspricht und erreichen ihr Maximum bei knapp 66 °C. Die Temperaturhäufigkeiten des Wärmetauscherein- und -austritts, die in den nachfolgenden drei Diagrammen gezeigt werden, beziehen sich nur auf Stunden, in denen die Anlage (der Solarkreislauf) in Betrieb ist. Diese belaufen sich in Graz auf 1915 h. Zum Vergleich: die Betriebsstunden der Kunststoffsysteme betragen durchschnittlich 1575 h pro Jahr.

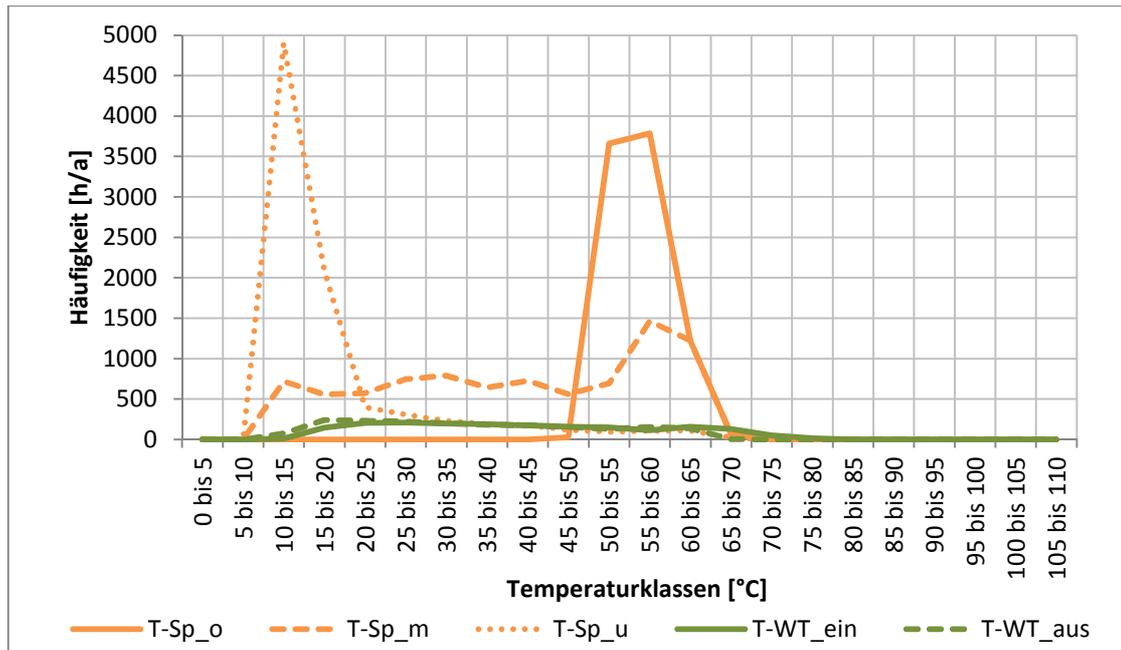


Abbildung 8-3: Häufigkeiten der Temperaturen des WW-Referenzspeichers in Graz

## 8.2 Temperaturbelastungen der KS-Systeme zur WW-Bereitung in Graz

In Abbildung 8-4 werden nun die Häufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen des Referenzsystems mit denen der Kunststoffsysteme verglichen. Das Kunststoffsystem ohne Überhitzungsschutz (KS\_DB) erreicht nahezu die in Abbildung 6-10 ermittelte Stagnationstemperatur. Dies ergibt bei den klimatischen Rahmenbedingungen in Graz rund 127,5 °C. Bei den beiden Systemen mit Hinterlüftung als Überhitzungsschutz können die Temperaturen auf rund 100 °C reduziert werden. Der Kunststoffkollektor mit Rückkühlung erreicht sein Temperaturmaximum bei knapp 95 °C, wodurch kostengünstige Standardkunststoffe eingesetzt werden können. Zwischen -15 und 70 °C (Nacht- und Betriebszeiten, keine Stagnation) sind sich die Temperaturhäufigkeiten aller Systeme in Graz sehr ähnlich.

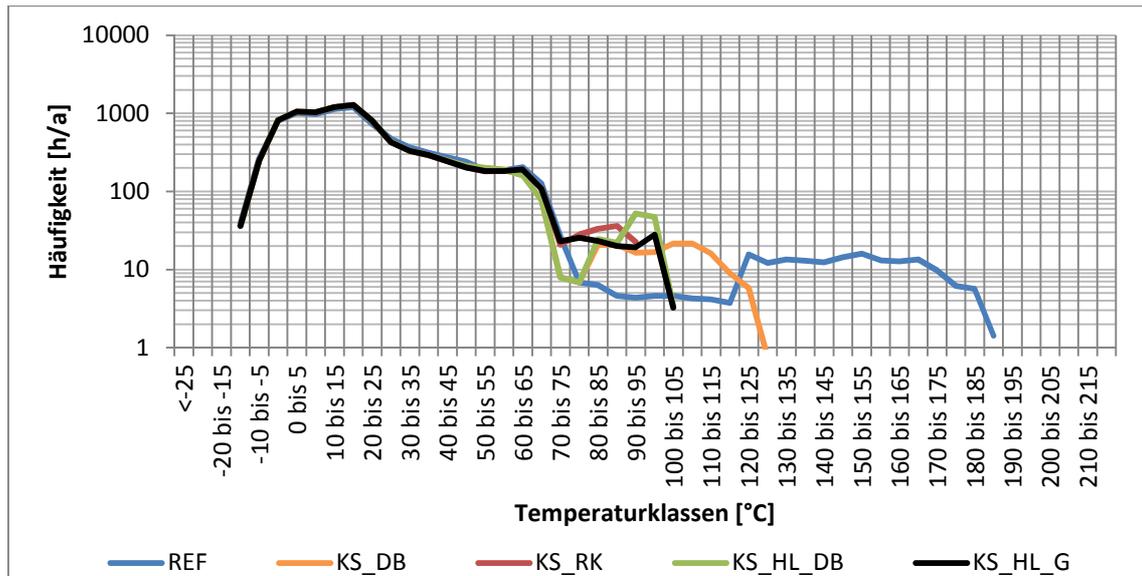


Abbildung 8-4: Vergleich der Kollektormitteltemperaturhäufigkeiten der verschiedenen WW-Systeme am Standort Graz

### 8.3 Temperaturbelastungen des Referenz-Kombi-Systems in Graz

Durch schrittweises Abziehen der Stundenanzahl der jeweiligen Temperaturklasse (beginnend mit der Klasse in Abbildung 8-5 links außen) von einer Jahresstundenanzahl= 8760 h, erhält man die Summenhäufigkeiten einiger Systemtemperaturen der Kombi-Anlage. Zu sehen in logarithmischer Darstellung.

Im Vorlauf des Solarkreislaufs werden hier Temperaturen von bis zu 109 °C erreicht. Ca. 53 h im Jahr liegt die Temperatur über 90 °C. Mittels Rückkühlung und Hinterlüftung können diese Temperaturen aber auf unter 95 °C gehalten werden und die Temperaturen über 80 °C auf weniger als 100 h im Jahr begrenzt werden.

Aufgrund der Wärmeübergabe im Plattenwärmetauscher an den Speicher ist die Temperatur im Rücklauf dementsprechend geringer. Der Kollektor selbst erreicht eine Maximaltemperatur von über 190 °C. Die höheren Temperaturhäufigkeiten am Kollektorausstritt (T-Koll\_a) gegenüber der Kollektormitteltemperatur (T-Koll\_m) zwischen 20 und 110 °C, begründen sich damit, dass der Kollektor nur innerhalb dieses Temperaturintervalls betrieben wird und im Betriebszustand die Temperatur am Kollektorausstritt immer höher als die Kollektormitteltemperatur ist.

## Temperaturbelastungen

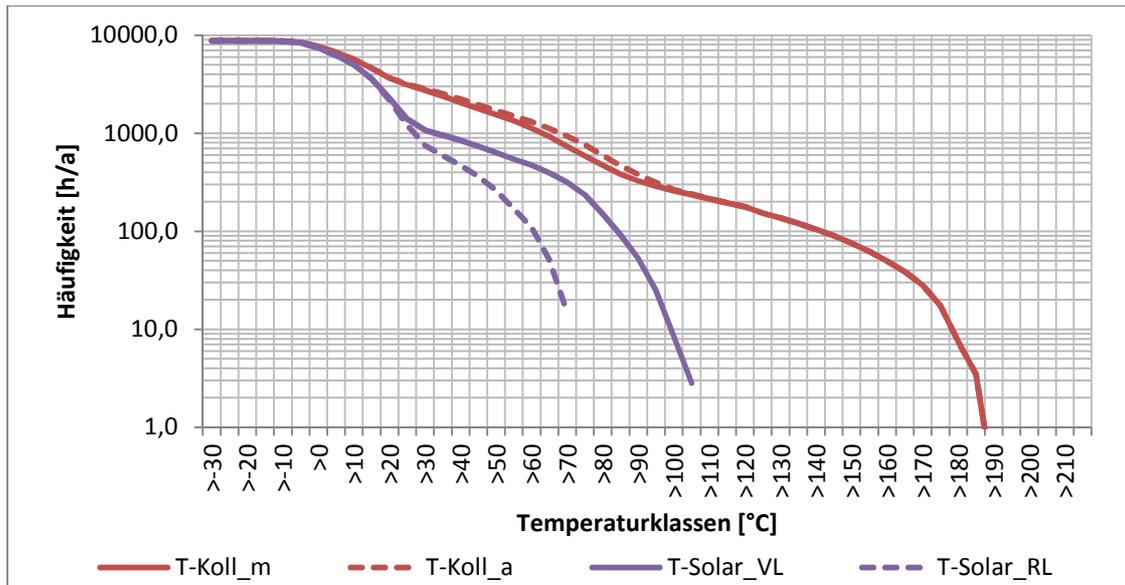


Abbildung 8-5: Häufigkeiten einiger Systemtemperaturen der Kombi-Referenzanlage in Graz

Die Temperaturhäufigkeiten im Speicher der Kombi-Systeme verschieben sich auf höhere Temperaturklassen, da die Regelungseinstellungen (maximale erlaubte Temperatur am Wärmetauscherfühler) des Solarkreislaufs höher liegen als die des WW-Systems. Es werden im Speicher selbst- zu sehen anhand von T-Sp\_o in Abbildung 8-6 am Beispiel des Kombi-Systems in Graz- Temperaturen über 100 °C erreicht. Erkennbar ist hier wieder die Nachheizung, die den oberen Teil des Speichers auf Temperatur hält (über 50 °C), um die Warmwasserversorgung zu garantieren. Erkennbar ist auch, dass knapp 5000 h im Jahr die Temperaturen in der obersten Schicht im Speicher über 60°C liegen. Da die Nachheizung bei Temperaturen über 55°C ausschaltet, kann die zusätzliche Temperaturerhöhung der solarthermischen Anlage zugerechnet werden. Die Temperatur in der mittleren Speicherschicht wird knapp 4000 h im Jahr auf über 50 °C gehalten. 1685 h im Jahr liegt die Wärmetauschereintrittstemperatur über der Solltemperatur des Warmwassers. Aufgrund der Wärmeabfuhr an den Speicher verschieben sich Temperaturhäufigkeiten des Wärmetauscheraustritts im Vergleich zum Eintritt auf niedrigere Temperaturklassen

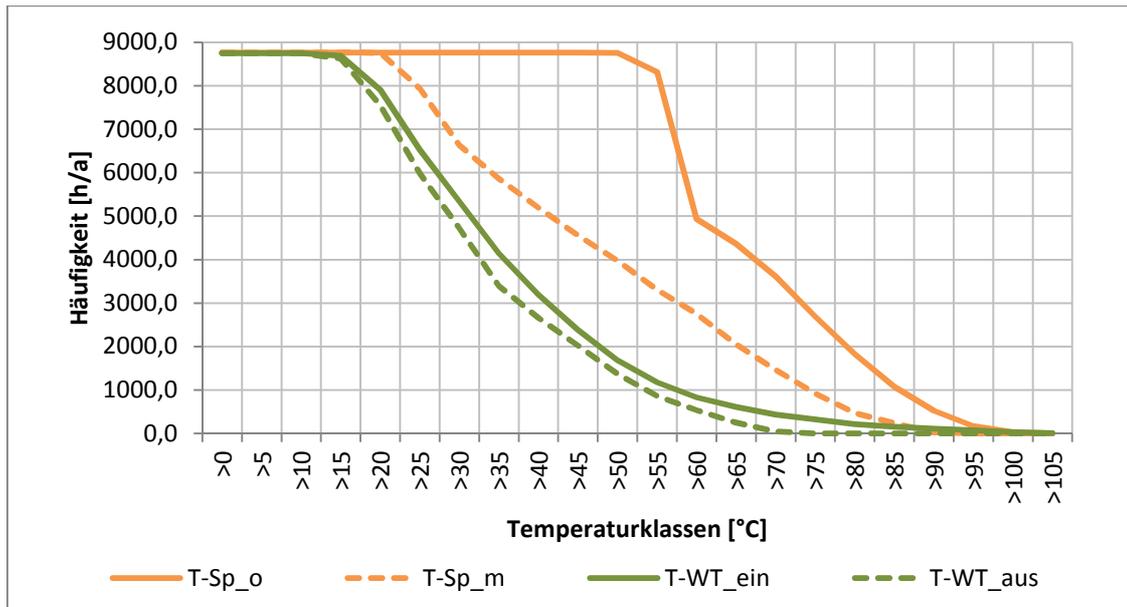


Abbildung 8-6: Summenhäufigkeiten der Temperaturen im Speicher des Kombi-Referenzsystems in Graz

### 8.4 Temperaturbelastungen der KS-Kombi-Systeme in Graz

In Abbildung 8-7 sind die Häufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen aller Kombi-Systeme in Graz vergleichend dargestellt. Der Referenzkollektor erreicht aufgrund seiner hoch selektiven Beschichtung Temperaturen von rund 190 °C. Das Kunststoffsystem mit Drain-Back-Tank (KS\_DB) ohne Überhitzungsschutz erreicht wie bei den WW-Systemen eine Temperatur von ca. 127,5 °C. Durch Rückkühlung werden die Stagnationstemperaturen (in der Simulation) auf 95 °C beschränkt. Die hinterlüfteten Systeme bleiben unter 105 °C.

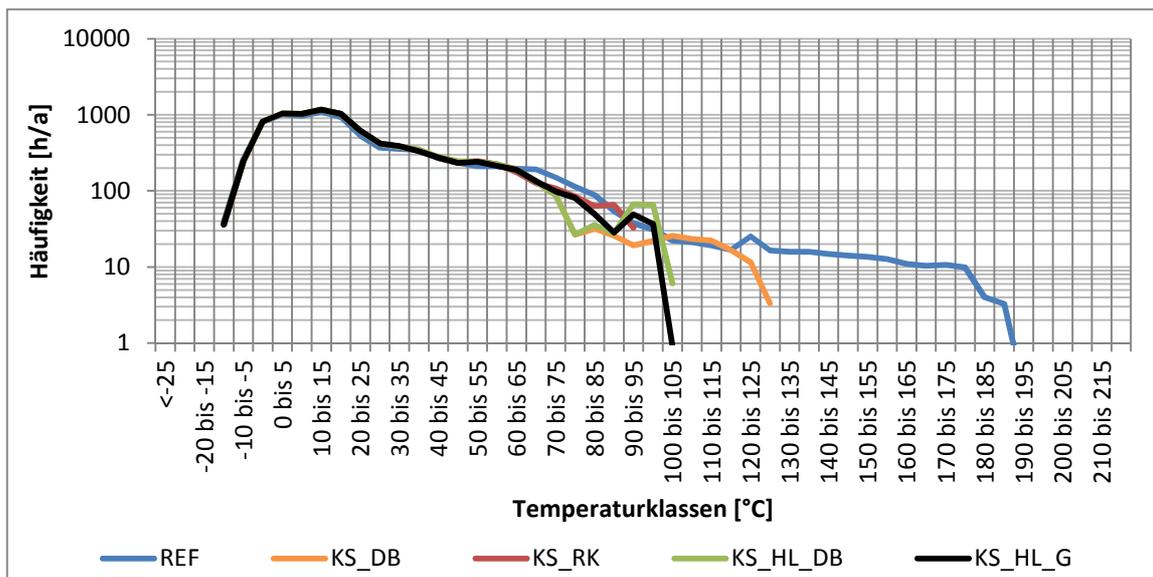


Abbildung 8-7: Vergleich der Häufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen aller Kombi-Systeme in Graz

## 9 DRUCKBELASTUNGEN

In diesem Kapitel werden die Druckbelastungen am Beispiel Graz diskutiert, analysiert und abschließend werden die Maximal- und Minimaldrücke aller Systeme in einer Tabelle am Ende zusammengefasst. Zur Berechnung der Drücke wurde nicht auf das Druckberechnungsprogramm SHW\_T\_P\_Statistik zurückgegriffen. Je nach System (REF, KS\_DB,...) wurde in Excel eine eigene Funktion dafür erstellt. Grund dafür ist, dass die in Abbildung 2-8 gezeigte Phase 3 in SHW\_T\_P\_Statistik nicht berechnet wird. Zusätzlich zu den in Kapitel 6.4 beschriebenen offenen Drain-Back Systemen wird der Druck auch für geschlossene Drain-Back-Systeme ermittelt. Die Temperaturbelastungen sind in diesem Fall gleich wie jene der offenen DB-Anlagen, da davon ausgegangen wird, dass die Systeme nach dem Füllvorgang bei Umgebungsdruck verschlossen werden, um so einen Verlust des Wärmeträgermediums durch Verdampfung/Verdunstung zu vermeiden. Die Regelungsparameter werden nicht verändert. Die zusätzlichen Systeme sind nachfolgend aufgelistet:

- KS\_DB\_G: Kunststoffkollektor (KS) mit Drain-Back-Tank (DB), geschlossenes System (G)
- KS\_HL\_DB\_G: Kunststoffkollektor (KS) mit Hinterlüftung (HL) und Drain-Back-Tank (DB), geschlossenes System (G)

### 9.1 Druckbelastungen geschlossener Systeme

#### Nicht entleerende Systeme

Die Funktion, die zur Berechnung des Druckes eingesetzt wird, kann den Druck in der Höhe des Ausdehnungsgefäßes und im Kollektor berechnen. Zur Berechnung dienen die Simulationsergebnisse aus SHW (Kollektorbetriebstemperatur, Pumpenlaufzeit, Strahlung, Umgebungstemperatur), der Eingabedatensatz der das System beschreibt (Kollektorfläche, Kollektorvolumen, Rohrdurchmesser, Rohrlänge) sowie weitere zusätzliche Parameter die in Tabelle 14 zusammengefasst wurden. Die Funktion benötigt auch die Größe des Ausdehnungsgefäßes ( $V_{ADG}$ ), die mittels folgender Formel berechnet werden kann (Hausner et al, 2003):

$$V_{ADG} = \frac{V_G \cdot \text{Ausdehnung} + \text{Dampfvolumen} + V_V}{\text{Nutzefekt}} \quad (\text{Gl. 9-1})$$

Mit  $V_G$  ist das Volumen des gesamten Solarkreislaufs gemeint. Dieser beinhaltet das Kollektorzvolumen, das Volumen der Rohrleitungen und auch das Wärmetauschervolumen.

Das Dampfvolumen berechnet sich grundsätzlich aus dem Kollektorzvolumen und dem Volumen der Rohrleitungen, die unter Dampf stehen. Mit Hilfe des Dampffaktors, der auf 1,1 (Erfahrungswert) festgelegt wurde, ist es allerdings möglich, allein mit dem gegebenen Kollektorzvolumen, das gesamte sich bildende Dampfvolumen abzuschätzen. Das Dampfvolumen berechnet sich somit durch:

$$\text{Dampfvolumen} = \text{Kollektorzvolumen} \cdot \text{Dampffaktor} \quad (\text{Gl. 9-2})$$

$V_V$  (Flüssigkeitsvorlage) ist der Flüssigkeitsinhalt im Ausdehnungsgefäß und wird durch Umformen der Gleichung 9-3:

$$\text{Kollektorzvolumen} \cdot (T_k - T_{Max}) = V_V \cdot (T_{Max} - T_V) \quad (\text{Gl. 9-3})$$

berechnet durch:

$$V_V = \text{Kollektorzvolumen} \cdot \frac{(T_k - T_{Max})}{(T_{Max} - T_V)} \quad (\text{Gl. 9-4})$$

Gleichung 9-3 basiert auf einer Mischungsrechnung (Richmannsche Mischungsregel) und gibt deshalb die Größe des Flüssigkeitsinhaltes im Ausdehnungsgefäß an, um das heißere vom Kollektor kommende Flüssigkeitsvolumen so auszugleichen, dass die Membran des Ausdehnungsgefäßes keinen Schaden nimmt.

$T_k$  gibt die höchste Temperatur an, mit der die Flüssigkeit bei Stagnation zum Ausdehnungsgefäß strömt.  $T_{Max}$  ist die maximal zulässige Belastungstemperatur der Membran des Ausdehnungsgefäßes und wird vom Hersteller angegeben.  $T_V$  steht für die maximal erreichbare Temperatur der Flüssigkeitsvorlage im ADG und wird mit 50 °C angenommen.

Die Ausdehnung berechnet sich durch Gleichung 9-5:

$$\text{Ausdehnung} = \frac{V_F - V_{füll}}{V_{füll}} \quad (\text{Gl. 9-5})$$

Die Formel beschreibt wie stark sich das Flüssigkeitsvolumens des Solarkreislaufs ( $V_F$ ) im Vergleich zum Volumen ( $V_{f\ddot{u}ll}$ ) bei Fülltemperatur (20 °C) ändert. In Verbindung mit Gleichung 9-1 wird für  $V_F$  das Volumen bei Stagnationtemperatur eingesetzt.

Durch Ersetzen von  $V_F$  und  $V_{f\ddot{u}ll}$  durch  $\frac{m}{\rho_F}$  bzw.  $\frac{m}{\rho_{f\ddot{u}ll}}$  (die Masse  $m$  bleibt vor und nach dem Erwärmen des Wärmeträgermediums gleich), kann die Masse aus dem entstehenden Bruch gekürzt werden und Gleichung 9-5 ergibt sich zu:

$$\text{Ausdehnung} = \frac{\rho_{f\ddot{u}ll}}{\rho_F} - 1 \quad (\text{Gl. 9-6})$$

Die Dichte bei Fülltemperatur ( $\rho_{f\ddot{u}ll}$ ) und die Dichte von  $\rho_F$  bei der jeweiligen Temperatur werden über eine Datenbank ermittelt.

Der Nutzeffekt gibt an, wie viel Volumen des Ausdehnungsgefäßes genutzt werden kann, ohne dass die Membran Schaden erleidet und sollte unter dem Wert von 0,5 liegen (Hausner et al, 2003):

$$\text{Nutzeffekt} = \frac{p_e + 1 - \frac{p_0 + 1}{0,9}}{p_e + 1} \quad (\text{Gl. 9-7})$$

$p_e$  gibt den am Sicherheitsventil eingestellten maximal zulässigen Druck an.  $p_0$  steht für den Vordruck im Ausdehnungsgefäß. Der Faktor  $\frac{1}{0,9}$  berücksichtigt die Änderung des Gefäßvordrucks im Ausdehnungsgefäß durch die Temperaturänderung im Gasraum aufgrund der heißen Flüssigkeit, die am ADG anliegt.

Schlussendlich wird der für  $V_{ADG}$  in Gleichung 9-1 berechnete Wert dann auf die nächsthöhere kommerziell erhältliche Gefäßgröße aufgerundet.

Die Funktion zur Berechnung des Druckes ermittelt im ersten Schritt anhand der Simulationsergebnisse von SHW, ob sich das System in Stagnation befindet. Hierzu wird der Pumpenstatus und die Temperatur im Solarkreislauf analysiert. Wenn die Pumpe ausgeschaltet ist (Pumpenstatus = 0%) und die Temperatur des Kollektors über der Siedetemperatur liegt, wird Stagnation angenommen. Dieser Schritt ist nur für das Referenzsystem relevant, da sich die Kollektortemperaturen der Kunststoffsysteme durch Rückkühlung und Hinterlüftung so stark verringern, dass die Siedetemperatur des Wärmeträgermediums bei dem voreingestellten Druck, nicht überschritten wird. Befindet

sich die Anlage in Stagnation, wird je nach Entleerungsverhalten des Kollektors (siehe auch Abbildung 2-8), die spezifische Dampfleistung des Systems berechnet, die die Dampfreichweite (unter Dampf stehende Rohrleitungslänge) und dadurch den Druck im System beeinflusst.

Die spez. Dampfleistung ist abhängig vom Entleerungsverhalten, der Globalstrahlung, der Außentemperatur und den Druckverhältnissen im System. (Hausner et al, 2003)

$$\text{spez. Dampfleistung} = F(I_G, T_a, p_0) \quad (\text{Gl. 9-8})$$

$T_a$  steht hierbei für die Umgebungstemperatur,  $p_0$  für den Gefäßvordruck

Zur Berechnung der spez. Dampfleistung werden je nach Entleerungsverhalten folgende drei Gleichungen herangezogen:

$$\begin{aligned} \text{spez. Dampfleistung} &= 0,18 \cdot I_G + 1,8 \cdot T_a - 24 \cdot (p_0 + 1) - 93 \\ &\quad (\text{schlecht entleerend}) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 9-9})$$

$$\begin{aligned} \text{spez. Dampfleistung} &= 0,1 \cdot I_G + 1,2 \cdot T_a - 11 \cdot (p_0 + 1) - 71 \\ &\quad (\text{gut entleerend}) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 9-10})$$

$$\begin{aligned} \text{spez. Dampfleistung} &= 0,04 \cdot I_G + 1 \cdot T_a - 2,7 \cdot (p_0 + 1) - 46 \\ &\quad (\text{sehr gut entleerend}) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 9-11})$$

Die Gleichungen beruhen auf einer Regressionsanalyse des Projekts „Entwicklung von thermischen Solarsystemen mit unproblematischem Stagnationsverhalten“ (Hausner et al, 2003). Die Werte in den Gleichungen sind Mittelwerte von real gemessenen Kollektoren mit unterschiedlichem Entleerungsverhalten. Mittels der spez. Dampfleistung, der Kollektorfläche und einer angenommenen Verlustleistung der Rohrleitungen von 25 W/m kann daraus die Rohrlänge unter Dampf (RuD) ermittelt werden.

$$RuD = \frac{\text{spez. Dampfleistung} \cdot \text{Kollektorfläche}}{\text{Rohrverlustleistung}} \quad (\text{Gl. 9-12})$$

In weiterer Folge kann das Dampfvolumen in den Rohrleitungen bestimmt werden und zusammen mit dem Dampfvolumen im Kollektor ergibt sich das gesamte Dampfvolumen der Anlage.

Die nachfolgenden Gleichungen werden zur Berechnung des Drucks in Höhe des Ausdehnungsgefäßes verwendet:

Gleichung 9-13 entsteht durch das Gleichsetzen zweier Gasgleichungen, da die Masse, die Gaskonstante und näherungsweise auch die Temperatur im Ausdehnungsgefäß vor und nach dem Anlegen des Anlagendrucks gleichbleiben.

Der linke Term beschreibt den Druck und das Volumen des Ausdehnungsgefäßes, wenn nur der Gefäßvordruck ( $p_0$ ) wirkt, d.h. sich die Anlage im ungefüllten Zustand befindet. Die rechte Seite beschreibt den Zustand des ADG bei gefülltem System, während der Anlagenfülldruck ( $p_{füll}$ ) auf das Gefäß wirkt und damit Flüssigkeit in das ADG gedrückt wird ( $V_V$ ). Somit ergibt sich das neue Volumen auf der Gasseite des ADG zu  $V_{ADG} - V_V$  und passt sich dem Anlagenfülldruck an. Um mit Absolutdrücken rechnen zu können, wird  $p_0$  als auch  $p_{füll}$  mit eins addiert.

$$V_{ADG} * (p_0 + 1) = (V_{ADG} - V_V) * (p_{füll} + 1) \quad (\text{Gl. 9-13})$$

Durch Umformen ergibt sich  $V_V$  zu:

$$V_V = V_{ADG} \cdot \left(1 - \frac{p_0+1}{p_{füll}+1}\right) \quad (\text{Gl. 9-14})$$

Durch Umformen von Gleichung 9-1 ergibt sich:

$$\text{Nutzeffekt} = \frac{V_G \cdot \text{Ausdehnung} + V_V + \text{Dampfvolumen}}{V_{ADG}} \quad (\text{Gl. 9-15})$$

Mit Hilfe des Nutzeffekts und durch Umformung der Gleichung 9-7, Ersetzen von 0,9 mit 1 und  $p_e$  mit  $p_{ADG}$ , ergibt sich dann in Gleichung 9-16 der Druck in Höhe des Ausdehnungsgefäßes ( $p_{ADG}$ ).

$$p_{ADG} = \frac{\text{Nutzeffekt} + p_0}{1 - \text{Nutzeffekt}} \quad (\text{Gl. 9-16})$$

Der Druck des Kollektors ( $p_k$ ) wird bei Dampfbildung über Gleichung 9-17 ermittelt.

$$p_k = p_{ADG} - \frac{Bauhöhe_{ADGKoll} - \frac{RuD}{2}}{10} \quad (\text{Gl. 9-17})$$

Unter  $Bauhöhe_{ADGKoll}$  ist die Höhendifferenz zwischen Ausdehnungsgefäß und Kollektor zu verstehen. Da der Dampf ausgehend vom Kollektor auch in die Rohrleitungen (Vor- und Rücklauf) vordringt, muss  $RuD$  noch mit 2 dividiert (= Länge des Vorlaufs unter Dampf, entspricht somit jener Höhe bis zu der der Dampf vordringt) und von  $Bauhöhe_{ADGKoll}$  abgezogen werden, um die Höhe der Flüssigkeitssäule zu erhalten, die auf das ADG wirkt. Zur Vereinfachung wurde der Neigungswinkel des Kollektors nicht berücksichtigt. Die Änderung des statischen Drucks pro Höhenmeter geht mit dem Faktor  $\frac{1}{10}$  in die Rechnung ein. Tritt keine Dampfbildung auf, wird der Kollektordruck ermittelt mit:

$$p_k = p_{ADG} - \frac{Bauhöhe_{ADGKoll}}{10} \quad (\text{Gl. 9-18})$$

Tabelle 14 zeigt die Parameter, die zur Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes und zur Berechnung des Drucks in Graz verwendet wurden. Bei Werten die durch einen Schrägstrich getrennt sind, beschreibt der Wert links die WW-Systeme und der Wert rechts die Kombi-Systeme.

Der Fülldruck ( $p_{füll}$ , mit etwas Reserve nach oben) für die Systeme mit Kühlmechanismus wurde jeweils so gewählt, dass die Siedetemperatur des Wärmeträgermediums ( $T_{stag}$ ) nicht überschritten wird.

## Druckbelastungen

Tabelle 14: Eingabeparameter von REF, KS\_RK und KS\_HL\_G in Graz

	REF	KS_RK	KS_HL_G
$p_{füll}$ [bar]	2,5	1,5	2
$p_0$ [bar]	2	1	1,5
$p_e$ [bar]	5,4	2,7	2,7
Volumen des ADG [l]	25/80	12/33	18/50
Volumen des Solarkreislaufs [l]	16/26	46,7/115,3	46,7/115,3
$Bauhöhe_{ADGKoll}$ [m]	10	10	10
Rohrleitungslänge [m]	20	20	20
Rohrdurchmesser (innen) [mm]	16/13	16/13	16/13
Volumen WT [l]	7,2	7,2	7,2
Kollektorstärke [l/m <sup>2</sup> ]	0,8	4,19	4,19
Dampfvolumen [l]	5,28	0	0
$T_K$ [°C]	130	90	90
$T_{Max}$ [°C]	90	90	90
$T_V$ [°C]	50	50	50
n [-]	0,09	0,09	0,09
Entleerungsverhalten	Sehr gut, Gut, Schlecht	Sehr gut	Sehr gut
$T_{füll}$ [°C]	20	20	20
$T_{Stag}$ [°C]	130	111	120
Medium	Propylenglykollgemisch [40%]		

Abbildung 9-1 zeigt den Druck im Kollektor ( $p_{Kol}$ ) des Referenzsystems zur Warmwasserbereitung jeweils bei unterschiedlichem Entleerungsverhalten des Kollektors. Je nach Entleerungsverhalten (sehr gut (sg), gut (g) oder schlecht (s)) wird die Dauer von Phase 3 auf 5, 15 oder 25 Minuten festgelegt (siehe hierzu auch Abbildung 9-1), da sie davon abhängt, wie gut der Kollektor entleert werden kann und in weiterer Folge wie viel Restflüssigkeit im Kollektor zurückbleibt, die nach und nach verdampft.

Um 7:00 Uhr wird die Pumpe des Solarkreislaufs eingeschaltet. Der Druck steigt durch die Flüssigkeitsausdehnung des Wärmeträgermediums im Solarkreislauf in geringem Maße an. Um 11:00 Uhr ist der Speicher voll beladen und die Pumpe wird abgeschaltet. Der Druck steigt nun schneller an, da keine Wärme mehr an den Speicher abgegeben wird. Um 11:30 Uhr erreicht die Kollektormitteltemperatur mehr als 130 °C, womit die Siedetemperatur des Wärmeträgermediums bei vorhandenem Druck überschritten wird. Es kommt zur Dampfbildung wodurch die Flüssigkeit im Kollektor in das Ausdehnungsgefäß gedrückt wird und der Druck rapide ansteigt. Je nach Entleerungsverhalten des Systems bleibt eine gewisse Menge an Restflüssigkeit im Kollektor zurück. Die Restflüssigkeit verdampft nach und nach, wodurch der Druck weiter steigt. Wie lange das System diesen hohen Drücken ausgesetzt ist, hängt vom Entleerungsverhalten ab und wird bei der Druckberechnung mit einer Dauer von 5 (sg), 15 (g) oder 25 (s) Minuten berücksichtigt. Wie die Länge der Phase ist auch der auftretende Maximaldruck verschieden. Während beim sehr gut entleerenden Kollektor, die Druckspitze mit 3,3 bar relativ gering ist, wird beim schlecht entleerenden System ein Druck von über 4,8 bar erreicht. Ist ein Großteil der im Kollektor zurückgebliebenen Flüssigkeit verdampft, beginnt auch der Druck wieder zu sinken und das Flüssigkeitsniveau steigt bis zur Kollektorunterkante. Um 15:00 Uhr sinkt die Kollektormitteltemperatur durch die schwächer werdende Strahlung wieder unter die Siedetemperatur, der restliche Dampf im Kollektor kondensiert und der Druck fällt weiter ab. Durch das Einschalten der Pumpe um 15:45 Uhr und die damit verbundene Wärmeabfuhr an den Speicher, sinkt der Druck auf das Ursprungsniveau (Fülldruck) ab.

## Druckbelastungen

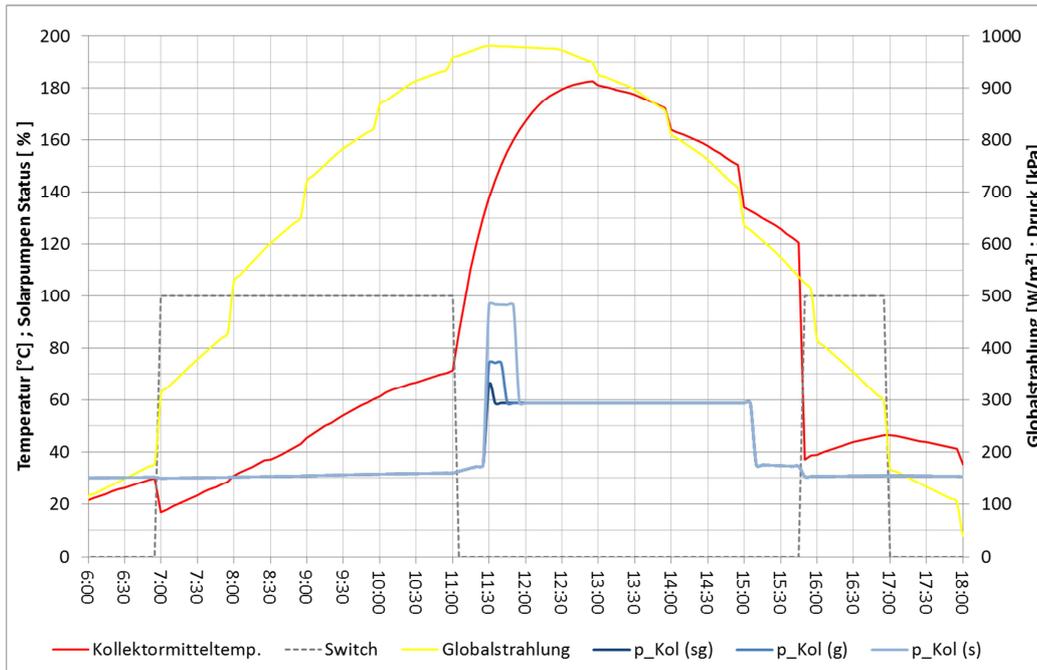


Abbildung 9-1: Tagesverlauf mit Druckentwicklung im Kollektor des WW-Referenzsystems in Graz

In Abbildung 9-2 ist der Druckverlauf eines WW-Kunststoffsystems mit Überhitzungsschutz beispielhaft in Form der Rückkühlung am Standort Graz dargestellt. Der Druck steigt wie auch vorhin mit stärker werdender Globalstrahlung langsam an. Mit dem Abschalten der Pumpe um 11:30 Uhr setzt bald darauf die Rückkühlung (wie in Abbildung 6-13 und 6-14 beschrieben) ein. Der Zickzack-Verlauf der Kollektormitteltemperatur spiegelt sich auch im Druck (grüne Linie) wider. Da die Temperatur des Kollektors durch die Rückkühlung auf unter 95 °C gehalten wird, wird die Siedetemperatur des Wärmeträgermediums nicht überschritten. Dementsprechend kommt es zu keiner Dampfbildung und der Druck kann auch bei kleiner werdendem ADG, auf ein Niveau das für Kunststoffkollektoren zulässig ist, reduziert werden.

# Druckbelastungen

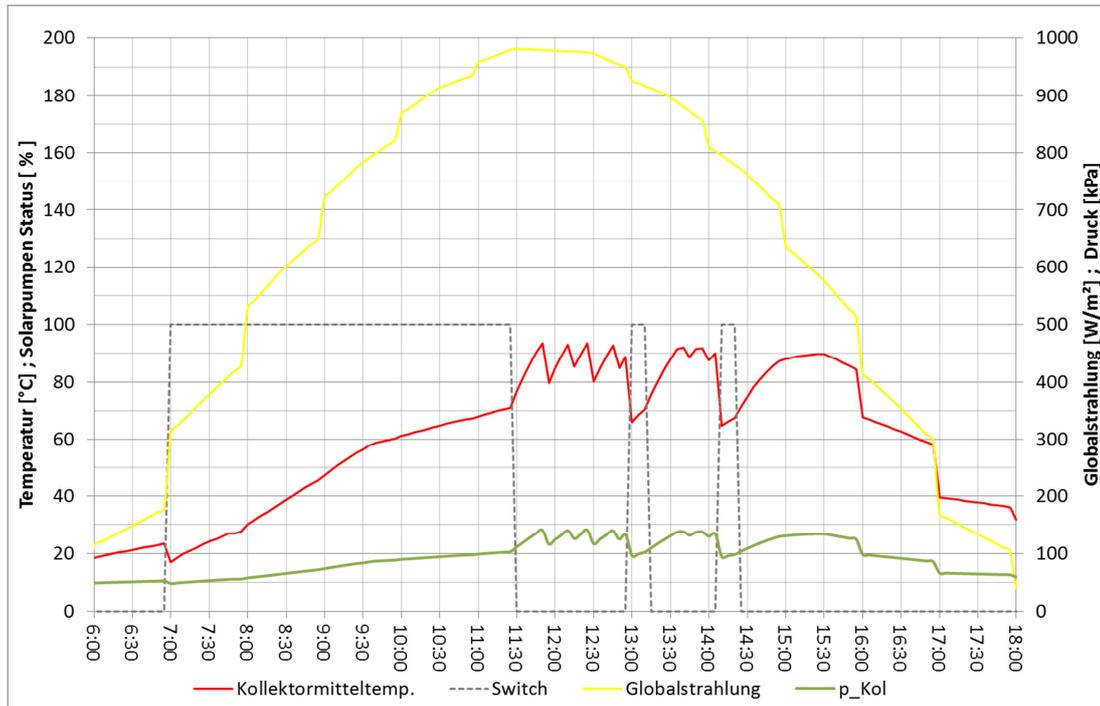


Abbildung 9-2. Tagesverlauf mit Druckentwicklung im Kollektor des WW-Kunststoffsystems mit Rückkühlung (KS\_RK) in Graz

### Entleerende Systeme

Der Druck wird hier ebenfalls über eine eigene Funktion berechnet. Verwendet werden hierzu die Simulationsergebnisse, Eingabeparameter aus Tabelle 15 und Daten aus der SHW-Eingabedatei. Bevor die Funktion gestartet wird, wird zuvor noch die Größe des Drain-Back-Tanks festgelegt. Die minimale Größe des Drain-Back-Tanks muss das gesamte Kollektorstromvolumen sowie das Volumen der Rohrleitungen (Vor- und Rücklauf) vom Kollektor bis auf das Niveau des Drain-Back-Tanks aufnehmen, damit sich das System „vollständig“ entleeren kann. Dadurch entsteht ein Luftpolster im Solarkreislauf, das die Volumsänderungen des Wärmeträgermediums aufnimmt und den Druck nur in geringem Maße ansteigen lässt.

Das Luftvolumen, das sich während des Betriebes im Drain-Back-Tank befindet ( $V_B$ ) errechnet sich folgendermaßen:

$$V_B = V_0 - (V_G - V_0) \cdot \text{Ausdehnung} \quad (\text{Gl. 9-19})$$

$V_0$  ist hier das Luftvolumen des Drain-Back-Tanks im entleerten Zustand, oder anders gesagt, der Luftpolster im DB-Tank beim erstmaligen Befüllen der Anlage ( $T_{\text{füll}} = 20 \text{ °C}$ ).  $V_G$  steht für das Volumen des gesamten Solarkreislaufs.  $(V_G - V_0) \cdot \text{Ausdehnung}$  beschreibt die Zunahme des gesamten sich im Solarkreislauf befindlichen Flüssigkeitsvolumens durch Temperaturerhöhung. *Ausdehnung* berechnet sich wie in Gleichung 9-6. Die Volumserhöhung muss vom Drain-Back-Tank aufgenommen werden, wodurch sich das Luftvolumen im Drain-Back-Tank verringert. Bei dem verringerten Luftvolumen handelt es sich folglich um  $V_B$ .

Im Betrieb wird der Druck im DB-Tank ( $p_{DBT}$ ) über Gleichung 9-20 berechnet, die durch das Gleichsetzen der Gasgleichung im Bezug auf den Zustand im DB-Tank bei Fülltemperatur ( $T_{\text{füll}}$ ) und im Betrieb ( $T_B$ ) hervorgeht.

$$p_{DBT} = p_{\text{füll}} \cdot V_0 \cdot \frac{T_B + 273,15}{V_B \cdot (T_{\text{füll}} + 273,15)} \quad (\text{Gl. 9-20})$$

$p_{\text{füll}}$  ist hier der Druck des DB-Behälters, nach dem erstmaligen Befüllen der Anlage. Bei Stillstand (Stagnation) wird zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass sich das Flüssigkeitsvolumen im Solarkreislauf nicht verändert, wodurch die Drucksteigerung isochor berechnet wird.

$$p_{DBT} = p_{Füll} \cdot \frac{T_B + 273,15}{(T_{Füll} + 273,15)} \quad (\text{Gl. 9-21})$$

Der Druck im Kollektor berechnet sich schlussendlich durch:

$$p_K = p_{DBT} - \frac{L_{RLDB}}{2} \cdot \frac{1}{10} \quad (\text{Gl. 9-22})$$

Mit  $L_{RLDB}$  ist die Rohrlänge von Vor- und Rücklauf zwischen Kollektor und Drain-Back-Tank gemeint.

Der Faktor  $\frac{1}{10}$  dient wieder zur Berechnung der statischen Höhe. Bei Stillstand entspricht der Druck im Kollektor ( $p_K$ ) dem Druck im DB-Tank.

Tabelle 15: Eingabeparameter für KS\_DB\_G und KS\_HL\_DB\_G in Graz

	<b>KS_DB_G und KS_HL_DB_G</b>
<b><math>p_{füll}</math> [bar abs.]</b>	1
<b><math>T_{füll}</math> [°C]</b>	20
<b><math>L_{RLDB}</math> [m]</b>	8
<b>Rohrleitungslänge [m]</b>	20
<b>Rohrdurchmesser (innen) [mm]</b>	16
<b>Volumen des WT [l]</b>	7,2
<b>Volumen des DB-Tanks [l]</b>	37,7/105,8
<b><math>V_{RLDB}</math> [l]</b>	1,6
<b>Kollektorvolumen [l]</b>	36,1/104,2
<b>Kollektorfläche [m²]</b>	8,6/24,8
<b>Medium</b>	Propylenglykolegemisch [40 %]

Der Druckverlauf im Kollektor ist für das geschlossene WW-Kunststoffsystem mit Drain-Back-Tank am Standort Graz in Abbildung 9-3 zu sehen. Da das System bei 20 °C und einem Druck von 1 bar abs verschlossen wurde, werden auch kaum Drücke höher als 1,5 bar abs erreicht. Im Diagramm zum Zeitpunkt 13:30 Uhr zu sehen. Der Druckabfall

im Betrieb (7:00 und 16:00 Uhr) geht auf den Höhenunterschied zwischen Kollektor und DB-Tank und der daraus entstehenden Saugwirkung der Vorlaufleitung zurück.

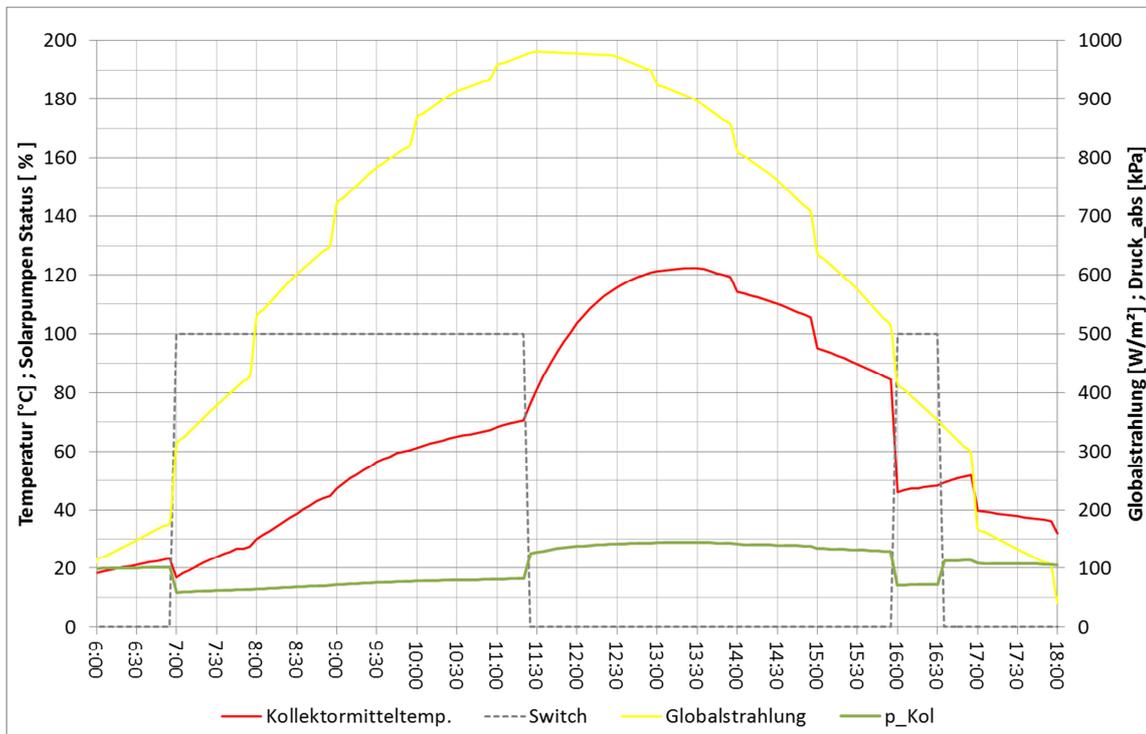


Abbildung 9-3. Tagesverlauf mit Druckentwicklung im Kollektor des geschlossenen WW-Kunststoffsystems mit Drain-Back-Tank (KS\_DB\_G) in Graz

## 9.2 Druckbelastungen offener Systeme

Für die Druckberechnung der offenen Systeme wurde keine eigene Funktion erstellt.

Der Druck wird über den Schaltzustand der Pumpe ermittelt. Im Stillstand herrscht aufgrund des offenen Systems der Umgebungsdruck (1 bar abs). Beim Einschalten muss die Pumpe die statische Höhe zwischen Kollektoreintritt und –austritt überwinden, wodurch der Druck über 1 bar abs ansteigt. In Graz, bei einem Neigungswinkel des Kollektors von 47 ° und einer Kollektorlänge von 1,8 m, entspricht das einem Druck von ca. 1,13 bar abs in Bezug auf die Kollektorunterkante. Der Druckanstieg ist in Abbildung 9-4 anhand des WW-Kunststoffsystems mit Drain-Back-Tank bei 7:00 und 16:00 Uhr zu sehen. Während des Betriebes fällt der Druck auf 0,6 bar ab, was wie im geschlossenen Drain-Back-System auf den Höhenunterschied von 4 m zwischen Kollektor und dem Niveau des Drain-Back-Tanks zurückzuführen ist.



Abbildung 9-4: Tagesverlauf mit Druckentwicklung im Kollektor des offenen WW-Kunststoffsystems mit Drain-Back-Tank (KS\_DB) in Graz

### 9.3 Zusammenfassung der Druckbelastungen aller Systeme in Graz

In Abbildung 9-5 werden die Druckhäufigkeiten im Kollektor beispielhaft anhand der WW-Systeme in Graz gegenübergestellt. Anhand der Druckklassen kann die Bandbreite der auftretenden Drücke für die spezifischen System abgelesen werden. Wie zu erkennen ist, treten im Referenzkollektor die höchsten Drücke im direkten Vergleich zu den Kunststoffsystemen auf. Das ist nicht nur auf den höheren Fülldruck (2,5 bar) zurückzuführen, sondern auch darauf, dass es im Referenzsystem während der Stagnation zur Dampfbildung kommen kann.

Bei den Kunststoffsystemen wird dies durch Überhitzungsschutz und/oder die Ausführung als Drain-Back-System verhindert.

Die Lücke der Druckhäufigkeiten des Referenzsystems im Bereich zwischen 1,9 und 2,9 bar ergibt sich durch das Berechnungsmodell, indem der Übergang zwischen System ohne Dampf und mit Dampf sprunghaft berechnet wird. Real würden in diesem Bereich sehr wohl Drücke auftreten. Die Häufigkeit wäre aber relativ gering, da die Dampfbildung sehr rapide abläuft und dieser Druckbereich somit sehr schnell durchlaufen wird. Wie in Abbildung 9-5 zu sehen, werden bei schlechtem Entleerungsverhalten des Referenzsystems Druckspitzen von bis zu 5,3 bar erreicht.

## Druckbelastungen

Bei sehr gutem Entleerungsverhalten können diese auf 3,3 bar bei gleicher Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes reduziert werden, was einem Unterschied von 2 bar entspricht. Das Kunststoffsystem mit Rückkühlung kommt auf nicht mehr als 1,45 bar im Kollektor. Das Druckmaximum von KS\_HL\_G liegt bei 1,75 bar. Die Unterschiede ergeben sich durch den höheren Fülldruck des KS-Systems mit Hinterlüftung (siehe auch Tabelle 14) und die höheren Temperaturen, die durch die geringere Kühlleistung erreicht werden.

Vergleicht man die Minimaldrücke der geschlossenen, nicht entleerenden Systeme im Diagramm, erkennt man, dass diese unter dem Fülldrücken liegen. Am Beispiel des Kollektors für KS\_HL\_G liegt dieser 470 h im Jahr unter dem Fülldruck von 1 bar. Grund dafür ist, dass die Anlage bei 20 °C befüllt wurde. Das Wärmeträgermedium kühlt aber z.B. über Nacht unter die Fülltemperatur aus, wodurch auch der Druck entsprechend abnimmt. Die geringsten Drücke treten in den Drain-Back-Systemen auf.

Im Vergleich zu den offenen DB-Systemen liegt das Druckmaximum bei den geschlossenen Systemen etwas höher.

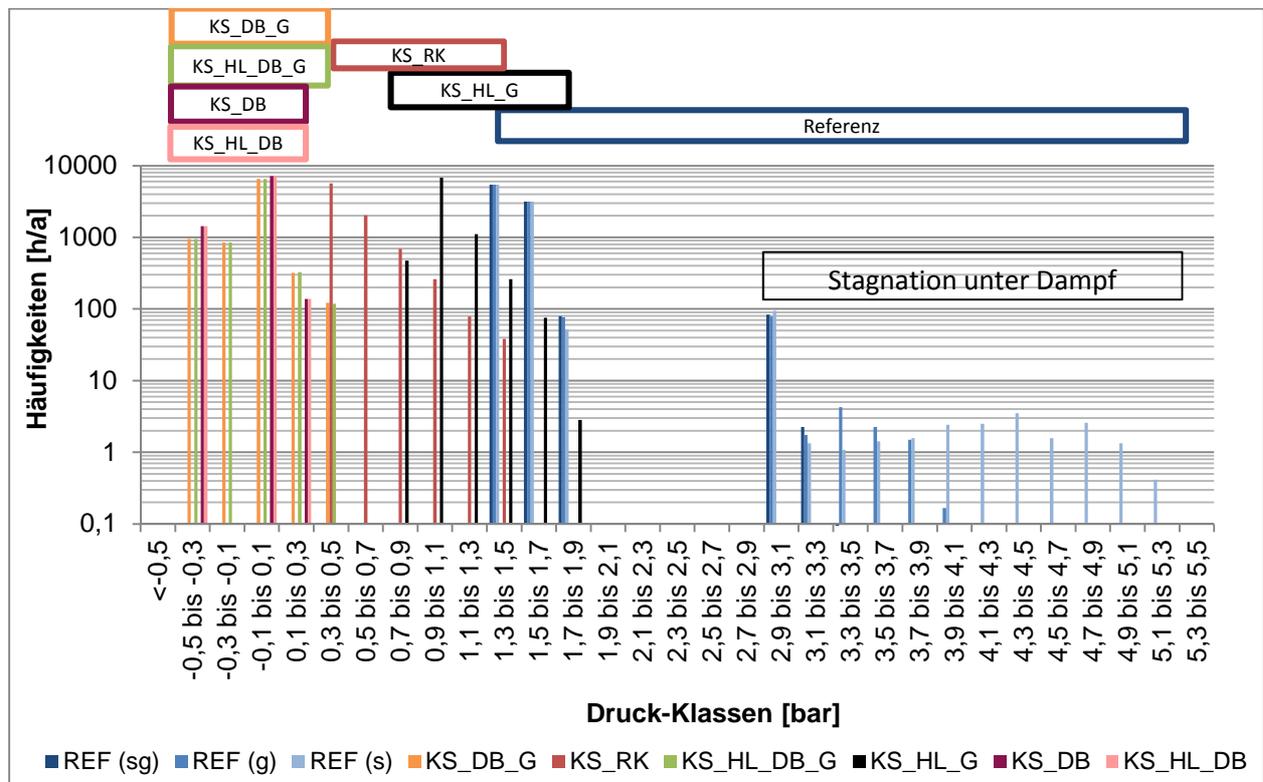


Abbildung 9-5: Druckhäufigkeiten der WW-Systeme in Graz

## Druckbelastungen

In Tabelle 16 und 17 sind die minimalen und maximalen Drücke im Kollektor für die WW- bzw. Kombi-Systeme in Graz bei verschiedenen Temperaturintervallen beispielhaft zusammengefasst. Zusätzlich ist auch für jedes Temperaturintervall die jeweilige Temperaturhäufigkeit angeführt.

Die Drücke der restlichen Standorte sind im Anhang zu finden.

Tabelle 16: Druckbelastungen des WW-Systems im Kollektor am Standort Graz

			Häufigkeiten [h/a]								Druck min [bar abs.]								
											Druck max [bar abs.]								
			<0 [°C]	0 bis 75 [°C]	75 bis 100 [°C]	100 bis 125 [°C]	125 bis 150 [°C]	150 bis 175 [°C]	175 bis 200 [°C]	>200 [°C]									
Graz	Referenzsystem	Schlecht entleerend	1102,3	2,47 2,47	7455,0	2,47 2,60	26,7	2,60 2,67	32,4	2,67 2,74	65,3	2,74 6,29	3,94 6,30	13,3	3,94 3,94	0,0	- -		
		Gut entleerend	1102,3	2,47 2,47	7455,0	2,47 2,60	26,7	2,60 2,67	32,4	2,67 2,74	65,3	2,74 4,93	2,75 4,71	13,3	3,94 3,94	0,0	- -		
		Sehr gut entleerend	1102,3	2,47 2,47	7455,0	2,47 2,60	26,7	2,60 2,67	32,4	2,67 2,74	65,3	2,74 4,34	2,75 3,94	13,3	3,94 3,94	0,0	- -		
		Kunststoffsystem	Drain-Back ohne ÜS	offen	1099,4	1,00 1,00	7504,6	0,60 1,13	81,3	0,60 1,00	74,0	1,00 1,00	0,8	1,00 1,45	- -	0,0	- -	0,0	- -
				geschlossen	1099,4	0,88 0,92	7504,6	0,57 1,24	81,3	1,24 1,36	74,0	1,36 1,45	0,8	1,45 1,46	- -	0,0	- -	0,0	- -
			mit Rückkühlung	geschlossen	1099,5	1,35 1,39	7540,5	1,39 2,09	120,0	2,09 2,42	0,0	1,00 1,00	0,0	- -	- -	0,0	- -	0,0	- -
	Drain-Back mit Hinterlüftung		offen	1099,4	1,00 1,00	7504,6	0,60 1,13	152,6	0,60 1,00	3,4	1,00 1,00	0,0	- -	- -	0,0	- -	0,0	- -	
			geschlossen	1099,4	0,88 0,92	7504,6	0,57 1,24	152,6	1,24 1,36	3,4	1,36 1,37	0,0	- -	- -	0,0	- -	0,0	- -	
	mit Hinterlüftung		geschlossen	1099,5	1,88 1,91	7541,2	1,91 2,41	116,1	2,42 2,70	3,3	2,70 2,73	0,0	- -	- -	0,0	- -	0,0	- -	

Tabelle 17: Druckbelastungen des Kombi-Systems im Kollektor am Standort Graz

			Häufigkeiten [h/a]								Druck min [bar abs.]								
											Druck max [bar abs.]								
			<0 [°C]	0 bis 75 [°C]	75 bis 100 [°C]	100 bis 125 [°C]	125 bis 150 [°C]	150 bis 175 [°C]	175 bis 200 [°C]	>200 [°C]									
Graz	Referenzsystem	Schlecht entleerend	1097,3	2,48 2,49	7079,0	2,49 2,55	325,8	2,55 2,58	104,9	2,58 2,62	77,2	2,62 4,58	3,49 4,57	17,4	3,49 3,49	0,0	- -		
		Gut entleerend	1097,3	2,48 2,49	7079,0	2,49 2,55	325,8	2,55 2,58	104,9	2,58 2,62	77,2	2,62 3,96	2,62 3,96	17,4	3,49 3,49	0,0	- -		
		Sehr gut entleerend	1097,3	2,48 2,49	7079,0	2,49 2,55	325,8	2,55 2,58	104,9	2,58 2,62	77,2	2,62 3,68	2,62 3,49	17,4	3,49 3,49	0,0	- -		
		Kunststoffsystem	Drain-Back ohne ÜS	offen	1097,3	1,00 1,00	7434,3	0,60 1,13	125,8	0,60 1,00	99,3	1,00 1,00	3,3	1,00 1,00	- -	0,0	- -	0,0	- -
				geschlossen	1097,3	0,88 0,92	7434,3	0,58 1,24	125,8	0,84 1,35	99,3	1,35 1,44	3,3	1,44 1,47	- -	0,0	- -	0,0	- -
			mit Rückkühlung	geschlossen	1097,2	1,36 1,40	7416,4	1,40 2,01	246,4	2,01 2,38	0,0	2,40 2,40	0,0	- -	- -	0,0	- -	0,0	- -
	Drain-Back mit Hinterlüftung		offen	1097,3	1,00 1,00	7434,3	0,60 1,13	222,4	0,60 1,00	6,1	1,00 1,00	0,0	- -	- -	0,0	- -	0,0	- -	
			geschlossen	1097,3	0,88 0,92	7434,3	0,58 1,24	222,4	0,84 1,35	6,1	1,35 1,37	0,0	- -	- -	0,0	- -	0,0	- -	
	mit Hinterlüftung		geschlossen	1097,2	1,89 1,92	7417,2	1,92 2,36	244,8	2,36 2,60	0,9	2,60 2,63	0,0	- -	- -	0,0	- -	0,0	- -	

## 10 ZUSAMMENFASSUNG

Derzeit am Markt verfügbare Kollektoren werden in einem aufwändigen mehrstufigen Prozess und unter Verwendung unterschiedlichster Halbzeuge und Werkstoffe hergestellt. Alternative kostengünstige Polymerwerkstoffe haben großes Potential die Ziele der Solarindustrie wie ressourcenschonende Massenproduktion und Kosteneffizienz zu erreichen.

Seit einigen Jahren wird nun im Projekt SolPol daran gearbeitet, solarthermische Systeme mit hohem Kunststoffanteil zu entwickeln, um die potentiellen Kosten- und Designvorteile daraus zu nutzen und die Herstellung und Verbreitung solarthermischer Systeme weiter voranzutreiben.

In dieser Arbeit wurden die Temperaturbelastungen, Druckbelastungen und Wärmegestehungskosten für solarthermische, gepumpte Systeme in Kunststoffbauweise untersucht und mit jenen von metallischen kommerziellen Systemen verglichen.

Hierzu wurden 6 Referenzsysteme an verschiedenen Standorten definiert, die mit bis zu 6 verschiedenen Kunststoffsystemkonzepten verglichen werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Wärmegestehungskosten:

- Einen wesentlichen Einfluss auf die Wärmegestehungskosten hat die Systemeffizienz der solarthermischen Anlage in der auch die Effizienz des Kollektors eine wichtige Rolle spielt. Derzeitige am Markt verfügbare Kunststoffkollektoren kommen nicht an die Wirkungsgrade von hochselektiv beschichteten Metallkollektoren heran. Durch die schlechtere Kollektorkennlinie der Kunststoffkollektoren ist es daher notwendig, die Kollektorfläche dementsprechend anzupassen, um den gleichen solaren Deckungsgrad wie das Referenzsystem am jeweiligen Standort zu erreichen. In Graz, wo der Unterschied der Kollektoreffizienz am stärksten ist, ergab sich für WW-System eine Steigerung der Kollektorfläche von ca. 42 %. Beim Kombi-System liegt die Mehrfläche bei durchschnittlich 54 % zum Referenzsystem. Im direkten Vergleich zwischen den Kunststoffsystemen sind nur geringe Unterschiede feststellbar. Mit größer werdender Kollektorfläche treten diese aber stärker hervor. Zusätzlich sollte auch die Speichergröße angepasst werden, um den solaren Deckungsgrad

des Referenzsystems bei geringerer Fläche zu erreichen, da die Kostenreduktion der Fläche stärker wiegt, als die Kostenerhöhung des Speichers.

- Prinzipiell kann in Drain-Back-Systemen Wasser als Wärmeträgermedium eingesetzt werden. Dies würde die Wärmegestehungskosten weiter reduzieren. Hierbei ist auf eine entsprechende Installation (stetig fallende Rohrleitungen), sowie auf die Integration des Drain-Back-Tanks im frostsicheren Bereich (falls notwendig) zu achten.
- Da die Langzeitbeständigkeit von Kunststoffen für solarthermische Anwendungen noch nicht ausreichend bewiesen ist, könnte eine mögliche geringere Lebensdauer als jene, die bei der Berechnung angenommenen wurde (25 Jahre), die WGK für Kunststoffsysteme weiter erhöhen.
- Da die Kollektorfläche und die Speichergröße der Kunststoffsysteme erhöht werden müssen, ist eine Kostenreduktion notwendig, um die gleichen WGK zu erreichen wie das jeweilige Referenzsystem. Die für Graz ermittelten notwendigen Kostenreduktionen (ohne Berücksichtigung der Änderung des Frostschutzvolumens) betragen für die WW-Systeme in Kunststoffbauweise 13 % und für die Kombi-Systeme 18 % bei der angenommenen Effizienz des Kunststoffkollektors.
- Mit dem in der Arbeit ermittelten, möglichen Kosteneinsparungspotential, ergibt sich für das WW-Kunststoffsystem in Graz eine Kostenreduktion von 55,4 % in Bezug auf das Referenzsystem. Für das Kunststoffsystem ergeben sich somit WGK von ca. 4,45 Eurocent/kWh, während das Referenzsystem bei 10 Eurocent/kWh liegt.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Temperaturbelastungen:

- Da der Kunststoffkollektor ohne Überhitzungsschutz Temperaturen von knapp 143 °C erreichen kann (Phoenix), ist der Einsatz technischer Kunststoffe nötig. Will man allerdings auf Standardpolymere zurückgreifen, die weitaus kostengünstiger sind, ist es notwendig, den Kollektor entsprechend vor unzulässig hohen Temperaturbelastungen zu schützen. Hierzu wurden zwei Überhitzungsschutzmaßnahmen (Hinterlüftung, Rückkühlung) näher analysiert.
- Für globalstrahlungsärmere Standorte erweist sich die Temperaturreduktion des Hinterlüftungsmechanismus (Graz, Ottawa, Peking: <103 °C) als akzeptabel. Bei größerer Globalstrahlung (Phoenix) beträgt die Kollektormaximaltemperatur bis

zu 117 °C, womit auch hier bereits auf technische Kunststoffe zurückgegriffen werden muss. Eine weitere Temperatursenkung ist jedoch durch eine Anpassung der Kollektorgeometrie (z.B.: verringerte Rückwanddämmung) oder durch eine zusätzliche Belüftung des Kollektors auf der Vorderseite des Absorber durchaus denkbar.

- Da die Rückkühlung im Vergleich zu Hinterlüftung sehr groß ausgelegt werden kann, können die Temperaturen auch an Orten mit über das Jahr gesehen hoher Einstrahlung und hoher Umgebungstemperatur, auf unter 95 °C gehalten werden. Somit ist hier der Einsatz von Standardpolymeren möglich. Bei der Auslegung des Kollektors ist allerdings zu beachten, dass sich die Größe des Rückkühlers auch in den WGK niederschlägt. Die Verschaltung von größeren Kollektorfeldern mit Rückkühler stellt ebenfalls noch eine große Herausforderung dar, die im Laufe des Projektes näher untersucht wird.
- Die Maximaltemperaturen, die bei den Komponenten (abgesehen von den Kollektortemperaturen) der WW-Systeme auftreten, sind über alle Standorte hinweg recht ähnlich. Größere Unterschiede ergeben sich nur bei den Kombi-Systemen. Die maximale Temperatur im WW-Speicher liegt bei ca. 66 °C. Bei den Pufferspeichern werden weitaus höhere Temperaturen erreicht, wobei das Maximum bei knapp 103 °C liegt. Ottawa und Peking liegen aber deutlich darunter (95 bzw. 90 °C). Der Einsatz von Standardpolymeren sollte aber auch hier möglich sein. Gegebenenfalls müsste die Regelung des Solarkreislaufes angepasst werden.
- Die Temperaturen in den Rohrleitungen, erreichen für die WW-Systeme keine kritischen Werte. Die maximale Vorlauftemperatur liegt hier in Phoenix bei unter 80°C. Die Maximaltemperatur der Kombi-Systeme in Kunststoffbauweise liegt bei 99 °C (Ottawa). Kommerziell erhältliche Kunststofflösungen, wie das von Aventa vorgeschlagene „Uponor Pex“-Rohrsystem, stoßen hier allerdings an ihre Grenzen.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckbelastungen:

- Durch die Auslegung der Kunststoffsysteme als offenes System mit Drain-Back-Tank, können die Druckbelastungen auf ein Minimum reduziert werden, da der Maximaldruck nicht viel höher als der Umgebungsdruck liegt. Durch die Falleitung wird jedoch die Siedetemperatur heruntersetzt, was in der

Regelung beachtet werden muss. Die Höhendifferenz zwischen Kollektor und Drain-Back-Tank sollte nicht zu groß sein, da sich die maximal zulässige Betriebstemperatur zu weit senkt und dadurch ein effizienter Betrieb nicht mehr gewährleistet werden kann.

- Geschlossene Systeme mit Drain-Back-Tank (Anlagenfülldruck = Umgebungsdruck) erreichen Drücke von knapp 1,5 bar, haben aber gegenüber offenen Systemen den Vorteil, dass kein Wärmeträgermedium durch Verdampfen bzw. Verdunsten an die Umgebung verloren geht. Durch Rückkühlung und Hinterlüftung können die Kunststoffsysteme ebenfalls als geschlossene Systeme ausgeführt werden, da die Gefahr der Dampfbildung bei richtiger Wahl des Anlagenfülldrucks nicht gegeben ist. Der maximale Druck im Kollektor sollte nur nicht die Belastungsgrenze von 2 bar überschreiten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Temperatur- und Druckanforderungen an die solarthermischen Komponenten durch kunststoffgerechte Ausführung erreicht werden können. Die in dieser Arbeit ermittelten Temperatur- und Druckbelastungen der Kunststoffsysteme bilden die Datenbasis für die weitere Materialentwicklung (beschleunigte Alterungstests), die zusammen mit den ermittelten ökonomischen Kennwerten (Wärmegestehungskosten) der Kunststoffsysteme die Grundlage für weiterführenden Arbeiten im SolPol-Projekt sind.

## LITERATUR

Bauer, U., 2012, Betriebswirtschaftslehre, TU Graz

Botpaev, R., Vajen, K., Drainback systems: market overview, 2014, Gleisdorf Solar 2014

Brandstetter, F., Fink, C., Hackstock, R., Lazslo, G., Riva, R., Steffens, R., 2004, Ausbildungsskriptum-Solarwärme, 1. Auflage, Arsenal Research, Wien

Brunold, S., Vogelsanger, P., Marty, H., 2007, Beurteilung der Möglichkeiten von thermochromen Schichten als potentielle Überhitzungsschutzmaßnahme für solarthermische Kollektoren, Bundesamt für Energie, Schweiz

Duffie, J.A., Beckmann, W.A., 2013, Solar Engineering of Thermal Processes, 4. Edition, John Wiley & Sons, Hoboken

Fink, C., Hausner, R., 2002, Stagnation behaviour of solar thermal systems, Gleisdorf: AEE Institut für nachhaltige Technologien

Fink, C., Hausner, R., 2003, Selbstentleerende Kollektorsysteme zur Vermeidung von Stagnationsproblemen in großen solarthermischen Anlagen-SolarDrain, Gleisdorf: AEE Institut für nachhaltige Technologien

Hafner, B., 2012, Cost Reduction along the Value Chain: Which Perspective in the Research and Product Development?, RHC Conference, Kopenhagen, Dänemark

Harrison, S.J., Cruickshank, C.A., 2012, A Review of Strategies for the Control of High Temperature Stagnation in Solar Collectors and Systems, SHC 2012, San Francisco, USA

Harrison, S.J., Lin, Q., Mesquita, L.C.S, 2004. Integral Stagnation Temperature Control for Solar Collectors, SESCOI 2004 Conference, Waterloo, Ontario, Canada

Hausner, R., 2011, Solarthermische Kunststoffkollektoren mit integriertem Überhitzungsschutz, Gleisdorf: AEE Institut für nachhaltige Technologien

Hausner, R., Fink, C., Wagner, W., Riva, R., 2003, Entwicklung von thermischen Solarsystemen mit unproblematischem Stagnationsverhalten, Gleisdorf: AEE Institut für nachhaltige Technologien

Hendron, R., Burch, J., 2007, Development of Standardized Domestic Hot Water Event Schedules for Residential Buildings, Energy Sustainability 2007, USA

Hintringer, C., Richtfeld, A., Hauer, N., Streicher, W., 2013, Entwicklung eines eigentemperatursicheren Kunststoffkollektors, Otti 2013, Regensburg, Deutschland

Kost, C., Mayer, J.N., Thomsen, J., Hartmann, N., Senkpiel, C., Phillips, S., Nold, S., Lude, S., Schlegl, T., 2013, Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien, Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, Freiburg, Deutschland

Köhl, M., Meir, M.G., Papillon, P., Wallner, G.M., Saile, S., 2012, Polymeric Materials for Solar Thermal Applications, 1. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim

Lang, R.W., Wallner, G.M., Fischer, J., Fink, C., Streicher, W., 2014, Solarthermische Systeme aus Polymerwerkstoffen: Das Großforschungsvorhaben SolPol-1/2, Otti 2014, Regensburg, Deutschland

Lee, E.J., 2014, Preliminary Investigation into solar-thermal Combi-System Performance, Kanada: Queen's University

Mauthner, F., Weiss, W., Spörk-Dür, M., 2015, Solar Heat World Wide, Gleisdorf: AEE Institut für nachhaltige Technologien

Poschanig, H., Lutschouning, K., Rekstad, J., Lüftinger, T., Meir, M., Preiß, D., 2014, Report on different implementation scenarios and scale up effects, , Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, Freiburg, Deutschland (unveröffentlicht)

Ramschak, T., 2012, Polymermaterialien in solarthermischen Systemen- Leistungsanforderungen und Belastungen, Gleisdorf: AEE Institut für nachhaltige Technologien

Ramschak, T., Hausner, R., Fink C., 2015, Temperaturbegrenzung für Kunststoffkollektoren durch Durchlüftung, Gleisdorf: AEE Institut für nachhaltige Technologien

Schildberger, A., 2008, Diplomarbeit: Thermische Eigenschaften von Solarkollektoren, Fachhochschulstudiengänge Burgenland GmbH

Streicher, W., Heimrath, R., Heinz, A., 2014, Solarenergienutzung, Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz

Streicher, W., Schnedl, K., Thür, A., Puschnig, P., 2011, Programmbeschreibung von SHW, Universität Innsbruck

Thür, A., Hintringer, C., Richtfeld, A., Streicher, W., Kaiser, A., Hausner, R., Fink, C., Koller, W., Riepl, R., 2013, Status Quo der Entwicklung eines überhitzungsgeschützten Kunststoffkollektors, Erneuerbare Energie ee1-13, Gleisdorf

Vela Solaris, 2014 Benutzerdokumentation Polysun, Vela Solaris AG

VDI 6002 Blatt 1, 2004, Solare Trinkwassererwärmung- Allgemeine Grundlagen. Systemtechnik und Anwendung im Wohnungsbau

Wallner, G.M., Resch, K., Hausner, R., 2006, Solarthermische Kunststoffkollektoren mit integriertem Überhitzungsschutz, Solar 2006, Gleisdorf

## ANHANG

```

EINGABEDATEN FÜR DIE SOLARSIMULATION
*****
STANDORT:          Format für Klimadatensatz: xxxyyyyy.zzz      ProjektID
Anlage_type2      PolyExp1.dat                                0001
*****
SIMULATIONSTECHNISCHE DATEN:
AnfMonNr  EndMonNr  SchrJeStu  MaxSchich  MinStedif  Breitengr  dt_Iter
1         12        12         10         0.6        47.        0.3
*****
KOLLEKTOR:        Beispiel
Fläche      Neigung  Azimut     c0(KonvF)  c1(=kwrt)  c2         AbsMasse  wärmKapA  1th/2ruk
6.0         47.     0.0        0.8        3.2        0.01       13.45     394.       0
KolMaStrw  KolMaStrH KolMaStrG  Anteil%    winkelfak  FlüsInhal  FlüsDicht  wärmKapF  winkfak30
0.0666     0.       0.         100.       0.92       0.0008     1021.     3810.     0.99
RoLänge    RoDurchm  wandstärk  DämmDicke  Leitwert   Rohrdicht  WärmKapRo
10.         0.018   0.0010    0.02       0.045     8900.     394.
10.         0.018   0.0010    0.02       0.045     8900.     394.     WT-Koll
*****
WARMWASSERSPEICHER: Beispiel
Volumen     Höhe      DämmDicke  Leitwert   VertLwrt   Zufluss    Abfluss1   Abfluss2
0.300       1.800    0.030     0.03       1.47       0.000      1.800      1.800
EBHwt1     EBHTeF1  BauHwt1   Flächwt1  kwertwt1  wtArt1     (int:)
Zuflwt1    EBHTeF1  Abflwt1   Flächwt1  kwertwt1  wtArt1     SekMaStr1 (ext:)
0.210      0.225   0.300     1.8        500.       int        0.0
EBHwt2     EBHTeF2  BauHwt2   Flächwt2  kwertwt2  wtArt2     (int:)
Zuflwt2    EBHTeF2  Abflwt2   Flächwt2  kwertwt2  wtArt2     SekMaStr2 (ext:)
0.         0.532   0.0       0.0        0.         int        0.0
EBHEPat    EBHTeFE  LeistEPat  Zuflwt1o  EbHTeF1a  Abflwt1o
1.440      1.575   2000.     0.         0.         0.
*****
PUFFERSPEICHER:  Beispiel
Volumen     Höhe      DämmDicke  Leitwert   VertLwrt   Zufluss    Abflus11   Abflus12
1.00        2.00     0.1        0.030     1.225     0.7        1.670      1.670
EBHwt1     EBHTeF1  BauHwt1   Flächwt1  kwertwt1  wtArt1     (int:)
Zuflwt1    EBHTeF1  Abflwt1   Flächwt1  kwertwt1  wtArt1     SekMaStr   (ext:)
1.0         0.110   0.060     1.25      4000.     ext        0.068
Zuflwt2    EBHTeF2  Abflwt2   Zufluss2  Abfluss21  Abfluss22  Ver1SpHz%
2.000      1.660   1.500     0.060     2.000     2.000     10.0
EBHEPat    EBHTeFE  LeistEPat  Zuflwt1o  EbHTeF1a  Abflwt1o
0.0         1.583   0.0       1.9        1.583     0.
*****
STEUERUNG:        Beispiel
Kollektor:
TempDiffw  TempDiffh  HysTemDif  Vorrang    nlauf      nwart      2wWSpe     TmaxWTlow  Tkolmax
6.         0.         4.         w          0.         0.         n          0.         120.
warmwasserspeicher:
Tmaxwt1    HyTmaxwt1  Tmaxwt2    HyTmaxwt2  TmaxEP     HysTmaxEP  SphSpw     Fernw
65.        5.         0.         0.         55.        5.         n          n
Pufferspeicher:
Tmaxwt1    HyTmaxwt1  Tmaxwt2    HyTmaxwt2  TmaxEP     HysTmaxEP  dtsphspw   TmaxWT1o
0.         0.         0.         0.         0.         0.         0.         0.
*****

```

Abbildung 0-1: Eingabedatensatz für das WW-Referenzsystem in Graz (1)

## Anhang

```

*****
WARMWASSERVERBRAUCH:Beispiel
täglVerbr wasserTem GruwasTem Verbrart FW-spreiz dTGruwa Fwknick
200. 50. 13.2 k 20. 1.9 97.
stündliche Tagesverteilung prozentuell am Gesamtverbrauch:
0-1Uhr 1-2Uhr 2-3 Uhr 3-4Uhr 4-5Uhr 5-6Uhr 6-7Uhr 7-8 Uhr
0.0 0.0 0.0 2.0 2.0 2.0 6.0 6.0
8-9Uhr 9-10Uhr 10-11Uhr 11-12Uhr 12-13Uhr 13-14Uhr 14-15Uhr 15-16Uhr
6.0 6.0 2.0 2.0 6.0 6.0 6.0 2.0
16-17Uhr 17-18Uhr 18-19Uhr 19-20Uhr 20-21Uhr 21-22Uhr 22-23Uhr 23-24Uhr
2.0 12.0 12.0 12.0 2.0 2.0 2.0 2.0
täg. untersch. Verbr in % des o. ang. täglVerbr. ;1 Tag des Jahres
Mon Die Mit Don Fre Sam Son Nr. 1.1
100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 4
monatlich unterschiedlicher Verbrauch in Prozent des oben angeführten täglVerbr
Jan Feb Mär Apr Mai Jun Jul Aug Sep Okt Nov Dez
100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100.
*****
GEBÄUDEund HEIZUNG: Beispiel
HeizLeist vorlTemp RücklTemp AuslegTem RaumTemp HeibegTem InwärmLei Unbehtz
4705. 35. 30. -12. 20. 15. 540. 0.
TagAUS1 Tag EIN1 TagAUS2 Tag EIN2 N-abTemp N-abEINH N-abaUSH HzExp
0 0 0 0 17. 22 5 1.1
FnstGlFl Neig Azimut gwert FnstGlFl Neig Azimut gwert
16.8 90. 0. 0.8 3.6 90. -90. 0.8
6.24 90. 180. 0.8 0. 90. 0. 0.
9. 90. 90. 0.8 0. 90. 0. 0.
*****
KESSEL: Beispiel
Leistung KesselArt MinTemp KeMasStrw KeMasStrH KeMasStrG Ateil%w
10000. f 50. 0.0 0.25 0.0 0.0
*****
Ausgabe von Testdaten
1.Tag letzt.Tag :
1. 365.
*****
Nachrechnung von Messung File:
1.Tag 1.Stunde Letzt.Tag letzt.Stu KESHZmes HZverMes WwverMes KePubwMe
0 0 0 0 0 0 0 0
*****
Warmwasserzirkulation: Beispiel
Zir ZirUrlaub ZirEin1 ZirAus1 ZirEin2 ZirAus2 ZirEin3 ZirAus3
0 0 0 0 0 0 0 0
ZirdT ZirMaStr ZirHin
0. 0. 0.

```

Abbildung 0-2: Eingabedatensatz für das WW-Referenzsystem in Graz(2)

## Anhang

```

EINGABEDATEN FÜR DIE SOLARSIMULATION
*****
STANDORT:          Format für Klimadatensatz: xxxyyyyy.zzz      ProjektID
Kombi_Graz        PolyExp1.dat                                0001
*****
SIMULATIONSTECHNISCHE DATEN:
AnfMonNr  EndMonNr  SchrJestu  MaxSchich  MinSTeDif  Breitengr  dt_Iter
1          12        12         10         0.6        47.        0.3
*****
KOLLEKTOR:        Beispiel
Fläche      Neigung   Azimut     c0(KonvF)  c1(=kwrt)  c2         AbsMasse   wärmKapA   1th/2rük
16.0       47.       0.0        0.8        3.2        0.01      13.45     394.       0
KolMaStrw  KolMaStrH KolMaStrG  Anteil%w   winkelfak  FlüsInhal  FlüsDicht  wärmKapF   winkfak30
0.0        0.0666   0.0        0.0        0.92      0.0008    1021.     3810.     0.99
RoLänge    RoDurchm  wandstärk  DämmDicke  Leitwert   Rohrdicht  wärmKapRo
10.        0.015    0.0010    0.02       0.045     8900.     394.      WT-Koll
10.        0.015    0.0010    0.02       0.045     8900.     394.      Koll-wT
*****
WARMWASSERSPEICHER: Beispiel
Volumen    Höhe      DämmDicke  Leitwert   VertLwrt   Zufluss    Abfluss1   Abfluss2
0.300     1.800    0.030     0.03       1.026     0.000     1.800     1.800
EBHwt1    EBHTeF1  BauHhwt1  Flächwt1  kwertwt1  wtArt1    (int:)
Zuflwt1   EBHTeF1  Abflwt1  Flächwt1  kwertwt1  wtArt1    (ext:)
0.360     0.225    0.300     1.8        500.0     int       0.3
EBHwt2    EBHTeF2  BauHhwt2  Flächwt2  kwertwt2  WTArt2    (int:)
Zuflwt2   EBHTeF2  Abflwt2  Flächwt2  kwertwt2  WTArt2    (ext:)
0.        0.        0.        2.0       4000.     ext       0.6
EBHEPat   EBHTeFE  LeistEPat  Zuflwt10  EbHTeF1a  Abflwt10
1.440     1.575    2000.     0.0        0.0       0.0
*****
PUFFERSPEICHER:  Beispiel
Volumen    Höhe      DämmDicke  Leitwert   VertLwrt   Zufluss    Abflus11   Abflus12
1.00      2.00     0.1        0.030     1.225     0.7       1.600     1.600
EBHwt1    EBHTeF1  BauHhwt1  Flächwt1  kwertwt1  wtArt1    (int:)
Zuflwt1   EBHTeF1  Abflwt1  Flächwt1  kwertwt1  wtArt1    (ext:)
1.0       0.250    0.060     1.25      4000.     ext       0.0666
Zuflwt2   EBHTeF2  Abflwt2  Zufluss2  Abfluss21  Abfluss22  Ver1sPhz%
2.000     1.583    1.300     0.060     2.000     2.000     10.0
EBHEPat   EBHTeFE  LeistEPat  Zuflwt10  EbHTeF1a  Abflwt10
0.0       1.583    0.0       1.9       1.583     0.
*****
STEUERUNG:        Beispiel
Kollektor:
TempDiffw  TempDiffh  HysTemDif  Vorrang    nlauf      nwart      2wWSpe     TmaxWT1ow  Tkolmax
0.         6.         4.         h          0.         0.         n          0.         120.
warmwasserspeicher:
Tmaxwt1    HyTmaxwt1  Tmaxwt2    HyTmaxwt2  TmaxEP     HysTmaxEP  sphSpw     Fernw
0.         0.         0.         0.         0.         0.         d          n
Pufferspeicher:
Tmaxwt1    HyTmaxwt1  Tmaxwt2    HyTmaxwt2  TmaxEP     HysTmaxEP  dt sphspw  TmaxWT1oh
75.        5.         55.        5.         0.         0.         0.         100.
*****

```

Abbildung 0-3: Eingabedatensatz für das Kombi-Referenzsystem in Graz (1)

## Anhang

```

*****
WARMWASSERVERBRAUCH:Beispiel
täglVerbr wasserTem GruwasTem Verbrart Fw-spreiz dTGruwa Fwknick
200. 50. 13.2 k 20. 1.9 97.
stündliche Tagesverteilung prozentuell am Gesamtverbrauch:
0-1uhr 1-2Uhr 2-3 Uhr 3-4Uhr 4-5Uhr 5-6Uhr 6-7Uhr 7-8 uhr
0.0 0.0 0.0 2.0 2.0 2.0 6.0 6.0
8-9Uhr 9-10Uhr 10-11Uhr 11-12Uhr 12-13Uhr 13-14Uhr 14-15Uhr 15-16Uhr
6.0 6.0 2.0 2.0 6.0 6.0 6.0 2.0
16-17Uhr 17-18Uhr 18-19Uhr 19-20Uhr 20-21Uhr 21-22Uhr 22-23Uhr 23-24Uhr
2.0 12.0 12.0 12.0 2.0 2.0 2.0 2.0
täg. untersch. verbr in % des o. ang. täglVerbr. ;1 Tag des Jahres
Mon Die Mit Don Fre Sam Son Nr. 1.1
100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 4
monatlich unterschiedlicher Verbrauch in Prozent des oben angeführten täglVerbr
Jan Feb Mär Apr Mai Jun Jul Aug Sep Okt Nov Dez
100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100.
*****
GEBÄUDEUND HEIZUNG: Beispiel
HeizLeist VorlTemp RücklTemp AuslegTem RaumTemp HeibegTem InwärmLei Unbeht
4680. 35. 30. -12. 20. 15. 540. 0.
TagAUS1 Tag EIN1 TagAUS2 Tag EIN2 N-abTemp N-abEINH N-abAUSH HzExp
0 0 0 0 17. 22 5 1.1
FnstGlF1 Neig Azimut gwert FnstGlF1 Neig Azimut gwert
16.8 90. 0. 0.8 3.6 90. -90. 0.8
6.24 90. 180. 0.8 0. 90. 0. 0.
9. 90. 90. 0.8 0. 90. 0. 0.
*****
KESSEL: Beispiel
Leistung KesselArt MinTemp KeMasStrV KeMasStrH KeMasStrG Ateil%W
10000. f 50. 0.0 0.25 0.0 0.0
*****
Ausgabe von Testdaten
1.Tag letzt.Tag :
365. 365.
*****
Nachrechnung von Messung File:
1.Tag 1.Stunde Letzt.Tag letzt.Stu KeshZmes HZverMes WwverMes KePubwMe
0 0 0 0 0 0 0 0
*****
warmwasserzirkulation: Beispiel
Zir Zirurlaub ZirEin1 ZirAus1 ZirEin2 ZirAus2 ZirEin3 ZirAus3
0 0 0 0 0 0 0 0
ZirdT ZirMastr ZirHin
0. 0. 0.

```

Abbildung 0-4: Eingabedatensatz für das Kombi-Referenzsystem in Graz (2)

## Anhang

"Graz"							
47.07,15.43,342,1,-30							
dy	h	Ta	<G_Gh>	<G_Dh>	RH	RR	FF
1	1	-3.1	0	0	91	0.0	1.2
1	2	-3.4	0	0	93	0.0	0.7
1	3	-3.7	0	0	94	0.0	1.7
1	4	-3.4	0	0	93	0.0	2.3
1	5	-3.6	0	0	93	0.0	3
1	6	-3.7	0	0	94	0.0	1.4
1	7	-3.5	0	0	92	0.0	1.4
1	8	-3.6	0	0	92	0.0	1.4
1	9	-2.8	34	32	88	0.0	1
1	10	-1.8	117	83	83	0.0	0.8
1	11	-1.2	149	123	79	0.0	0.8
1	12	-1	134	129	78	0.0	1
1	13	-1	100	100	77	0.0	0.7
1	14	-1.6	29	29	79	0.0	0.8
1	15	-2	22	22	80	0.0	0.7
1	16	-2.3	24	24	81	0.0	1.2
1	17	-2.6	0	0	82	0.0	1.2
1	18	-2.9	0	0	82	0.0	1.2
1	19	-3.2	0	0	83	0.0	1.7
1	20	-3.5	0	0	83	0.0	2.3
1	21	-3.8	0	0	84	0.0	2.3
1	22	-4.1	0	0	85	0.0	2.7
1	23	-4.4	0	0	85	0.0	2.3
1	24	-4.8	0	0	86	0.0	3
2	1	-5	0	0	87	0.0	3
2	2	-5.4	0	0	87	0.0	2.3
2	3	-5.7	0	0	88	0.0	2
2	4	-5.5	0	0	87	0.0	2
2	5	-5.7	0	0	87	0.0	1.4
2	6	-5.9	0	0	87	0.0	1.2
2	7	-5.8	0	0	86	0.0	1
2	8	-5.9	0	0	86	0.0	1.4
2	9	-4.7	36	32	81	0.0	1.7
2	10	-5.1	17	17	83	0.0	0.8
2	11	-4.7	65	65	82	0.0	0.7
2	12	-4.2	103	103	81	0.0	1
2	13	-3.4	165	143	79	0.0	1.4
2	14	-2.9	179	126	77	0.0	1.7

Abbildung 0-5: Auszug aus dem Klimadatensatz für Graz

dy [-]	Tag im Jahr
h [-]	Stunde des Tages
Ta [°C]	Außentemperatur
G_Gh [W/m²]	Globalstrahlung auf horizontale Ebene
G_Dh [W/m²]	Diffusstrahlung
RH [%]	Relative Luftfeuchtigkeit
RR [mm]	Niederschlagsmenge
FF [m/s]	Windgeschwindigkeit

## Anhang

---

Abminderung von c0 bzw. c1 über die Kollektortemperatur		
Temp	f*c0	f*c1
-50.	1.0	1.0
50.	1.0	1.0
60.	0.9	1.0
70.	0.8	1.0
85.	0.5	1.0
90.	0.4	1.0
95.	0.3	3.2
100.	0.3	3.2
120.	0.2	3.2
250.	0.2	3.2

Abbildung 0-6: Eingabedatendatei für Rückkühlung

Abminderung von c0 bzw. c1 über die Kollektortemperatur		
Temp	f*c0	f*c1
-50.	1.0	1.0
50.	1.0	1.0
85.	0.5	1.0
90.	0.4	1.0
95.	0.3	1.37
100.	0.3	1.68
105.	0.3	1.7
110.	0.3	1.7
120.	0.2	1.7
250.	0.2	1.7

Abbildung 0-7: Eingabedatendatei für Hinterlüftung

# Anhang

Simulationsprogramm "SHW" Version 08/2014  
zur Simulation von Systemen zur solaren  
Raumheizung, Warmwasserbereitung und Schwimmbad mit Zusatzheizung

Erstellt von  
W. Streicher, D. Siegele, A. Thuer, K. Schnedl, R. Kouba  
Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen, Universität Innsbruck

Datum: 11.11.2015

Uhrzeit: 10:39

## BERECHNUNG SERGEBNIS :

GESAMTANLAGE:		Anlage_type2							
Monat	Global [kwh]	Bedaukol [h]	Nutzkol [kwh]	Zirkver [kwh]	SolSpei [kwh]	KolwiGr [%]	KoNuGr [%]	DeckGr [%]	Tmax_kol [°C]
JAN	357.6	96.7	159.7	29.7	130.0	57.43	44.64	27.55	72.32
FEB	519.9	115.4	223.9	38.7	185.1	57.92	43.06	53.55	153.21
MAR	686.0	150.0	267.2	41.9	225.3	58.26	38.95	61.20	176.84
APR	721.9	180.9	303.5	46.5	257.0	57.31	42.05	76.81	185.45
MAI	853.9	203.4	326.4	44.2	282.2	57.48	38.23	82.38	182.59
JUN	830.5	239.2	336.8	49.1	287.7	55.80	40.55	89.59	177.67
JUL	872.4	219.3	343.1	45.1	298.0	57.38	39.33	90.79	170.02
AUG	839.3	211.4	313.1	40.6	272.5	57.91	37.30	83.62	187.83
SEP	700.9	181.5	270.0	38.8	231.1	57.64	38.52	73.24	186.88
OKT	578.5	131.4	224.9	35.0	189.9	58.31	38.87	58.02	178.87
NOV	345.9	88.0	133.9	21.2	112.7	59.13	38.72	26.58	150.64
DEZ	278.4	73.7	108.1	18.7	89.5	58.95	38.84	15.94	64.96
Jahr	7585.3	1891.0	3010.5	449.6	2560.9	57.60	39.69	62.31	187.83

Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen, Universität Innsbruck

## WARMWASSERBEREITUNGSANLAGE:

Monat	Bedaukol [h]	waspTmax [°C]	waspZi [kwh]	waspverl [kwh]	Kesse1 [kwh]	E1ektr [kwh]	SolSpei [kwh]	Deckwa   [%]
JAN	96.7	64.64	268.6	38.7	0.0	178.3	130.0	33.60
FEB	115.4	66.15	247.9	43.1	0.0	108.8	185.1	56.10
MAR	150.0	66.16	277.9	48.2	0.0	103.3	225.3	62.82
APR	180.9	66.36	269.1	50.0	0.0	60.3	257.0	77.58
MAI	203.4	65.98	274.6	54.0	0.0	47.8	282.2	82.58
JUN	239.2	66.14	259.9	55.4	0.0	26.8	287.7	89.68
JUL	219.3	65.92	261.6	58.5	0.0	23.8	298.0	90.89
AUG	211.4	66.26	255.4	57.2	0.0	41.3	272.5	83.82
SEP	181.5	66.05	243.7	51.2	0.0	63.2	231.1	74.08
OKT	131.4	65.79	251.9	47.4	0.0	101.8	189.9	59.57
NOV	88.0	66.15	247.1	36.1	0.0	170.5	112.7	31.01
DEZ	73.7	61.32	261.5	34.1	0.0	205.5	89.5	21.40
Jahr	1891.0	66.36	3119.2	573.9	0.0	1131.7	2560.9	63.72

(c) Institut fuer waermetechnik, TU Graz

## HEIZENERGIEBEREITUNGSANLAGE:

Monat	Bedaukol [h]	HeiSpTmax [°C]	HeSpent [kwh]	HeiSpverl [kwh]	Kesse1 [kwh]	E1ektr [kwh]	SolSpei [kwh]	DeckHei [%]
JAN	0.0	28.77	-22.5	13.5	0.0	0.0	0.0	100.00
FEB	0.0	28.09	-13.6	11.6	0.0	0.0	0.0	100.00
MAR	0.0	27.53	-11.6	11.2	0.0	0.0	0.0	100.00
APR	0.0	25.37	-8.9	8.6	0.0	0.0	0.0	100.00
MAI	0.0	22.44	-3.1	4.7	0.0	0.0	0.0	100.00
JUN	0.0	21.51	-2.1	2.3	0.0	0.0	0.0	100.00
JUL	0.0	20.49	-2.8	2.2	0.0	0.0	0.0	100.00
AUG	0.0	20.69	-3.0	1.9	0.0	0.0	0.0	100.00
SEP	0.0	22.71	-7.7	5.6	0.0	0.0	0.0	100.00
OKT	0.0	25.22	-9.3	8.5	0.0	0.0	0.0	100.00
NOV	0.0	27.18	-14.9	11.3	0.0	0.0	0.0	100.00
DEZ	0.0	28.49	-17.0	15.0	0.0	0.0	0.0	100.00
Jahr	0.0	28.77	-116.5	96.4	0.0	0.0	0.0	100.00

(c) Institut fuer waermetechnik, TU Graz

## WEITERE DATEN:

Monat	BetrStr [kwh]	wEntTmin [°C]	wa-Zir [kwh]	ww-Deckg [%]	HZ-Deckg [%]	warmwas [kwh]	Heizung [kwh]	Pass+Sp [kwh]
JAN	278.0	49.57	0.00	100.00	0.00	268.6	1473.3	393.3
FEB	386.5	49.55	0.00	100.00	0.00	247.9	1062.1	363.3
MAR	458.5	49.68	0.00	100.00	0.00	277.9	743.3	370.6
APR	529.6	49.73	0.00	100.00	0.00	269.1	371.1	245.4
MAI	567.9	49.83	0.00	100.00	0.00	274.6	84.2	47.5
JUN	603.6	50.00	0.00	100.00	0.00	259.9	14.0	9.2
JUL	597.9	49.80	0.00	100.00	0.00	261.6	2.0	2.7
AUG	540.6	50.00	0.00	100.00	0.00	255.4	1.9	1.3
SEP	468.4	49.93	0.00	100.00	0.00	243.7	134.7	56.3
OKT	385.7	49.57	0.00	100.00	0.00	251.9	400.4	163.1
NOV	226.5	49.63	0.00	100.00	0.00	247.1	868.2	278.3
DEZ	183.4	49.60	0.00	100.00	0.00	261.5	1410.3	347.9
Jahr	5226.8	49.55	0.00	100.00	0.00	3119.2	6565.4	2278.8

Abbildung 0-8: Ausgabedatensatz des WW-Referenzsystems in Graz

# Anhang

Simulationsprogramm "SHW" Version 08/2014  
zur Simulation von Systemen zur solaren  
Raumheizung, warmwasserbereitung und Schwimmbad mit Zusatzheizung

Erstellt von  
W. Streicher, D. Siegele, A. Thuer, K. Schnedl, R. Kouba  
Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen, Universität Innsbruck

Datum: 17.11.2015

Uhrzeit: 08:32

## BERECHNUNGSERGEBNIS:

GESAMTANLAGE:		Kombi_Graz								
Monat	Global [kwh]	BedauKol [h]	NutzKol [kwh]	Zirkver [kwh]	SoSpei [kwh]	KolWiGr [%]	KoNuGr [%]	DeckGr [%]	Tmax_ko1 [°C]	
JAN	953.6	89.2	366.5	28.0	338.5	52.38	38.43	16.39	72.79	
FEB	1386.4	115.9	576.6	41.3	535.3	52.96	41.59	37.92	81.90	
MAR	1829.3	145.2	694.4	48.3	646.1	52.86	37.96	57.21	124.55	
APR	1925.0	129.9	623.9	42.5	581.5	52.59	32.41	85.42	186.16	
MAI	2277.0	83.7	437.7	25.3	412.4	54.89	19.22	94.86	191.03	
JUN	2214.8	70.9	344.5	20.7	323.8	54.11	15.56	96.03	180.17	
JUL	2326.5	62.8	358.9	20.4	338.5	55.69	15.43	99.68	175.01	
AUG	2238.1	65.8	342.8	21.3	321.5	54.46	15.32	95.46	188.76	
SEP	1869.1	81.9	425.1	27.6	397.4	54.02	22.74	88.44	182.51	
OKT	1542.6	93.8	457.7	31.9	425.8	53.33	29.67	65.56	170.81	
NOV	922.5	89.2	341.5	23.4	318.0	53.81	37.01	24.89	81.87	
DEZ	742.5	74.0	252.2	19.3	232.9	52.38	33.96	12.14	74.61	
Jahr	20227.5	1102.4	5221.7	350.1	4871.6	53.52	25.82	44.11	191.03	

Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen, universität Innsbruck

## WARMWASSERBEREITUNGSANLAGE:

Monat	BedauKol [h]	wasPTmax [°C]	waspZi [kwh]	waspverl [kwh]	Heispei [kwh]	Elektr [kwh]	soSpei [kwh]	Deckwa [%]
JAN	0.0	0.00	268.0	0.0	267.5	0.0	0.0	16.39
FEB	0.0	0.00	247.4	0.0	247.1	0.0	0.0	37.92
MAR	0.0	0.00	277.4	0.0	277.2	0.0	0.0	57.21
APR	0.0	0.00	268.6	0.0	268.5	0.0	0.0	85.42
MAI	0.0	0.00	274.2	0.0	274.2	0.0	0.0	94.86
JUN	0.0	0.00	259.6	0.0	259.5	0.0	0.0	96.03
JUL	0.0	0.00	261.3	0.0	261.3	0.0	0.0	99.68
AUG	0.0	0.00	255.2	0.0	255.2	0.0	0.0	95.46
SEP	0.0	0.00	243.5	0.0	243.5	0.0	0.0	88.44
OKT	0.0	0.00	251.6	0.0	251.5	0.0	0.0	65.56
NOV	0.0	0.00	246.6	0.0	246.3	0.0	0.0	24.89
DEZ	0.0	0.00	260.9	0.0	260.3	0.0	0.0	12.14
Jahr	0.0	0.00	3114.4	0.0	3112.0	0.0	0.0	44.11

(c) Institut fuer waermetechnik, TU Graz

## HEIZENERGIEBEREITUNGSANLAGE:

Monat	BedauKol [h]	HeisPTmax [°C]	Heispei [kwh]	HeispeiVerl [kwh]	Kesse1 [kwh]	Elektr [kwh]	soSpei [kwh]	DeckHei [%]
JAN	89.2	70.09	1723.3	32.0	1440.8	0.0	338.5	16.39
FEB	115.9	81.14	1299.5	35.5	806.7	0.0	535.3	37.92
MAR	145.2	91.26	1012.7	43.8	433.3	0.0	646.1	57.21
APR	129.9	99.95	634.6	47.1	92.5	0.0	581.5	85.42
MAI	83.7	95.21	356.6	53.7	18.3	0.0	412.4	94.86
JUN	70.9	94.97	273.2	52.6	10.8	0.0	323.8	96.03
JUL	62.8	96.19	263.2	60.7	0.8	0.0	338.5	99.68
AUG	65.8	102.54	257.0	60.6	11.7	0.0	321.5	95.46
SEP	81.9	102.68	375.0	54.6	43.3	0.0	397.4	88.44
OKT	93.8	102.47	646.0	50.4	222.5	0.0	425.8	65.56
NOV	89.2	81.00	1106.2	32.0	830.8	0.0	318.0	24.89
DEZ	74.0	65.85	1658.9	30.1	1457.5	0.0	232.9	12.14
Jahr	1102.4	102.68	9606.1	553.1	5369.2	0.0	4871.6	44.11

(c) Institut fuer waermetechnik, TU Graz

## WEITERE DATEN:

Monat	BetrStr [kwh]	wEntTmin [°C]	wa-Zir [kwh]	ww-Deckg [%]	HZ-Deckg [%]	warmwas [kwh]	Heizung [kwh]	Pass+Sp [kwh]
JAN	699.6	-20.00	0.00	99.79	99.61	268.6	1461.5	393.0
FEB	1088.8	49.91	0.00	99.80	99.97	247.9	1052.7	363.1
MAR	1313.7	49.91	0.00	99.82	100.00	277.9	735.5	370.4
APR	1186.3	49.91	0.00	99.82	100.00	269.1	366.0	245.3
MAI	797.4	49.91	0.00	99.85	100.00	274.6	82.4	47.9
JUN	636.7	49.91	0.00	99.85	100.00	259.9	13.7	9.3
JUL	644.4	49.92	0.00	99.90	100.00	261.6	1.9	2.8
AUG	629.5	49.92	0.00	99.93	100.00	255.4	1.8	1.3
SEP	786.9	49.92	0.00	99.91	100.00	243.7	131.5	57.3
OKT	858.2	49.92	0.00	99.89	100.00	251.9	394.5	164.2
NOV	634.6	49.92	0.00	99.79	100.00	247.1	859.9	278.4
DEZ	481.4	49.91	0.00	99.79	99.96	261.5	1399.1	347.6
Jahr	9757.4	-20.00	0.00	99.85	99.90	3119.2	6500.7	2280.6

Abbildung 0-9: Ausgabedatensatz des Kombi-Referenzsystems in Graz

# Anhang



Precisely Right.



Page 1/2

Annex to Solar Keymark Certificate					Licence Number		011-752586 F							
Summary of EN ISO 9806 Test Results					Issued		2015-10-08							
Collector test standard					EN ISO 9806									
Licence holder					One Sun One World GmbH									
Brand (optional)					Country				Austria					
Street, Number					Web									
Postcode, City					E-mail				onesunoneworld@gmail.com					
					Tel				+43 7262 9396-4019					
Collector Type					Flat plate collector, glazed									
Collector name	Gross area (A <sub>G</sub> ) m <sup>2</sup>	Gross length mm	Gross width mm	Gross height mm	Power output per collector G <sub>b</sub> = 850 W/m <sup>2</sup> ; G <sub>d</sub> = 150 W/m <sup>2</sup> ; u = 3 m/s									
					θ <sub>m</sub> - θ <sub>a</sub>									
					0 K	10 K	30 K	50 K	70 K	80 K				
The Collector	0,95	1.200	790	50	626	548	371	169	0	0				
Power output per m <sup>2</sup> gross area					661	578	392	178	0	0				
Performance parameters test method					Quasi dynamic									
Performance parameters (related to AG)					r <sub>0,b</sub>	c1	c2	c3	c4	c6	K <sub>d</sub>			
Units					-	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	J/(m <sup>2</sup> K)	-	s/m	-			
Test results					0,666	6,370	0,034	0,524	0,042	0	0,987			
Incidence angle modifier test method					Quasi dynamic - outdoor									
Bi-directional incidence angle modifiers					No									
Incidence angle modifier					Angle	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Transversal					K <sub>g,cos</sub>	1,00	0,99	0,99	0,97	0,95	0,91	0,83	0,57	0,00
Longitudinal					K <sub>g,cos</sub>	1,00	0,99	0,99	0,97	0,95	0,91	0,83	0,57	0,00
Fluid for testing					Water									
Flow rate for testing (per gross area, AG)					dm/dt	0,020 kg/(sm <sup>2</sup> )								
Maximum temperature difference for thermal performance calculations					(θ <sub>m</sub> -θ <sub>a</sub> ) <sub>max</sub>	80 K								
Standard stagnation temperature (G = 1000 W/m <sup>2</sup> ; θ <sub>a</sub> = 30 °C)					θ <sub>stg</sub>	115 °C								
Effective thermal capacity (per gross area, AG)					C/m <sup>2</sup>	27,44 kJ/(Ksm <sup>2</sup> )								
Maximum operating temperature					θ <sub>max,op</sub>	110 °C								
Maximum operating pressure					P <sub>max,op</sub>	200 kPa								
Testing laboratory					AIT Austrian Institute of Technology GmbH www.ait.ac.at									
Test report(s)					2.04.01276.1.0-LT		2.04.01276.1.0-QT		Dated		05.10.2015 05.10.2015			
Comments of testing laboratory					AIT Austrian Institute of Technology GmbH Donau-City-Strasse 1   1220 Wien, Austria T +43 (0) 7262 9396-4019 F +43 (0) 7262 9396-4019 www.ait.ac.at									

Abbildung 0-10: Prüfbericht Sunlumo

Nachfolgend sind die Temperaturhäufigkeiten aller Systeme und auch die Maximaltemperaturen der verschiedenen Komponenten für die WW- und Kombi-Systeme an allen Standorten in Tabellenform zusammengefasst.

In den Tabellen 18 und 19 sind die Häufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen an allen Standorten für die WW- bzw. Kombi-Anlagen tabellarisch zu größeren Klassen zusammengefasst.

## Anhang

Tabelle 18: Häufigkeit der Kollektormitteltemperaturen aller WW-Systeme

		<0	0 bis 75	75 bis 100	100 bis 125	125 bis 150	150 bis 175	175 bis 200	>200	max Temp.
		[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[°C]
Antalya	REF	0,0	8275,4	70,8	112,4	217,4	84,0	0,0	0,0	168,9
	KS_DB	0,0	8055,0	336,3	343,0	25,8	0,0	0,0	0,0	132,6
	KS_RK	0,0	8187,8	572,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	94,5
	KS_HL_DB	0,0	8055,3	614,8	89,8	0,0	0,0	0,0	0,0	109,3
	KS_HL_G	0,0	8193,1	535,0	31,9	0,0	0,0	0,0	0,0	107,5
Graz	REF	1102,3	7455,0	26,7	32,4	65,3	65,1	13,3	0,0	187,0
	KS_DB	1099,4	7504,6	81,3	74,0	0,8	0,0	0,0	0,0	126,2
	KS_RK	1099,5	7540,5	120,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	94,0
	KS_HL_DB	1099,4	7504,6	152,6	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	101,8
	KS_HL_G	1099,5	7541,2	116,1	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	102,3
Jacksonville	REF	32,9	8527,5	95,8	76,8	27,1	0,0	0,0	0,0	138,4
	KS_DB	28,3	8446,3	171,3	112,9	1,3	0,0	0,0	0,0	128,0
	KS_RK	28,3	8557,3	174,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	94,3
	KS_HL_DB	28,3	8446,0	272,3	13,4	0,0	0,0	0,0	0,0	105,4
	KS_HL_G	28,3	8556,8	170,0	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	105,6
Ottawa	REF	1940,3	6652,8	95,7	63,7	7,6	0,0	0,0	0,0	142,3
	KS_DB	1898,8	6721,1	106,7	33,4	0,0	0,0	0,0	0,0	123,8
	KS_RK	1898,8	6721,1	140,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	93,8
	KS_HL_DB	1898,8	6721,1	139,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	102,4
	KS_HL_G	1898,8	6721,1	139,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	102,4
Peking	REF	1212,6	7342,8	137,2	67,0	0,5	0,0	0,0	0,0	126,4
	KS_DB	1165,8	7383,1	175,8	35,3	0,0	0,0	0,0	0,0	116,2
	KS_RK	1165,8	7392,1	202,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	93,1
	KS_HL_DB	1165,8	7383,1	211,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	98,6
	KS_HL_G	1165,8	7390,9	203,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	98,2
Phoenix	REF	0,0	8279,0	97,6	136,2	247,1	0,2	0,0	0,0	150,0
	KS_DB	0,0	8064,7	254,7	317,3	123,4	0,0	0,0	0,0	142,6
	KS_RK	0,0	8304,6	455,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,4
	KS_HL_DB	0,0	8064,9	494,0	201,1	0,0	0,0	0,0	0,0	116,9
	KS_HL_G	0,0	8302,8	403,3	53,9	0,0	0,0	0,0	0,0	110,9

Tabelle 19: Häufigkeit der Kollektormitteltemperaturen aller Kombi-Systeme

		<0	0 bis 75	75 bis 100	100 bis 125	125 bis 150	150 bis 175	175 bis 200	>200	max Temp.
		[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[°C]
Graz	REF	1097,3	7079,0	325,8	104,9	77,2	58,4	17,4	0,0	191,0
	KS_DB	1097,3	7434,3	125,8	99,3	3,3	0,0	0,0	0,0	127,6
	KS_RK	1097,2	7416,4	246,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	94,2
	KS_HL_DB	1097,3	7434,3	222,4	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	102,8
	KS_HL_G	1097,2	7417,2	244,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	100,8
Ottawa	REF	1930,4	6392,3	295,9	108,8	32,7	0,0	0,0	0,0	142,5
	KS_DB	1893,2	6544,7	184,1	134,3	3,8	0,0	0,0	0,0	133,3
	KS_RK	1893,3	6558,3	308,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	94,6
	KS_HL_DB	1893,2	6544,7	317,6	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0	105,4
	KS_HL_G	1893,3	6561,9	302,8	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	102,3
Peking	REF	1204,8	6832,6	479,4	231,4	11,8	0,0	0,0	0,0	133,3
	KS_DB	1161,5	7095,1	334,1	169,3	0,0	0,0	0,0	0,0	121,4
	KS_RK	1161,5	7065,8	532,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	93,5
	KS_HL_DB	1161,5	7095,1	503,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	100,1
	KS_HL_G	1161,5	7060,5	538,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,7

Tabelle 20 zeigt die maximal auftretenden Temperaturen der wesentlichen Komponenten für die WW-Systeme an allen 6 Standorten. Dabei wurden die

Kollektormitteltemperaturen, die Temperaturen der Vor- und Rücklaufleitungen sowie die Wärmetauscherein- und -austrittstemperatur und die obere Speichertemperatur analysiert.

Da es sich bei Solar\_VL und Solar\_RL um Durchschnittstemperaturen über die gesamte Rohrlänge handelt, scheint die höchste Temperatur die in den Rohrleitungen erreicht wird, z.B. während der Stagnationsphasen durch das Eindringen des Dampfes in einen Teil der Rohrleitung, in Tabelle 20 und 21 nicht auf. Somit müsste man sich bei der Auslegung der Rohrleitungen an der maximalen Kollektormitteltemperatur orientieren, sofern es zu Dampfbildung kommt. Die in Tabelle 20 gezeigten Temperaturen für die Rohrleitungen sind die maximalen Temperaturen, die während des Betriebs erreicht werden. An keinem Standort werden Temperaturen über 80 °C überschritten. Die Maximaltemperatur der Rücklaufleitung ist dabei im Durchschnitt um 12 °C geringer als die des Vorlaufs. Am größten ist der Unterschied bei den Referenzsystemen. Am kleinsten bei den Drain-Back-Systemen.

Da der Solar\_VL in den Wärmetauschereintritt mündet, ist die Maximaltemperatur von WT\_ein im Vergleich durch die Wärmeverluste entlang der Rohrleitung etwas geringer. Analog verhält es sich mit Solar\_RL und dem Wärmetauscheraustritt, wobei hier die Temperatur von WT\_aus im Vergleich größer ist.

Die maximale Temperatur des Speichers beträgt ca. 66 °C. Nur in Phoenix und Jacksonville werden etwas höhere Temperaturen erreicht.

## Anhang

Tabelle 20: Maximaltemperaturen der Komponenten aller WW-Systeme

		Koll_m	Solar_VL	Solar_RL	WT_ein	WT_aus	Sp_o
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Antalya	REF	168,93	78,21	64,88	77,77	65,09	65,80
	KS_DB	132,59	77,05	65,04	76,77	65,21	65,85
	KS_RK	94,53	77,12	65,04	76,80	65,20	66,00
	KS_HL_DB	109,34	77,05	65,04	76,77	65,21	65,85
	KS_HL_G	107,53	77,28	65,02	76,99	65,20	65,91
Graz	REF	187,00	79,24	65,07	78,88	65,29	65,89
	KS_DB	126,17	76,99	65,81	76,67	65,96	65,61
	KS_RK	93,95	76,88	65,71	76,56	65,87	65,55
	KS_HL_DB	101,80	76,99	65,81	76,67	65,96	65,61
	KS_HL_G	102,27	76,91	65,73	76,60	65,88	65,65
Jacksonville	REF	138,39	78,67	65,04	78,33	65,25	68,10
	KS_DB	128,01	77,60	65,19	77,31	65,33	67,84
	KS_RK	94,25	77,79	65,21	77,48	65,38	67,60
	KS_HL_DB	105,36	77,60	65,19	77,31	65,32	67,84
	KS_HL_G	105,55	77,71	65,18	77,37	65,36	67,69
Ottawa	REF	142,33	77,36	65,24	77,05	65,42	65,69
	KS_DB	123,82	76,94	65,37	76,60	65,53	65,49
	KS_RK	93,76	76,94	65,37	76,60	65,53	65,49
	KS_HL_DB	102,44	76,94	65,37	76,60	65,53	65,49
	KS_HL_G	102,44	76,94	65,37	76,60	65,53	65,49
Peking	REF	126,41	74,70	64,84	74,23	65,11	65,65
	KS_DB	116,19	74,38	64,92	74,11	65,18	66,17
	KS_RK	93,13	74,70	64,95	74,23	65,21	66,48
	KS_HL_DB	98,62	74,38	64,92	74,11	65,18	66,17
	KS_HL_G	98,18	74,85	64,95	74,45	65,21	66,48
Phoenix	REF	150,01	79,42	65,14	79,12	65,26	68,06
	KS_DB	142,62	78,12	65,31	77,84	65,42	67,83
	KS_RK	95,40	78,72	65,25	78,47	65,38	68,34
	KS_HL_DB	116,87	78,12	65,31	77,84	65,42	67,88
	KS_HL_G	110,87	78,66	65,26	78,40	65,38	68,13

Tabelle 21 zeigt die Maximaltemperaturen der Kombi-Systeme an allen 3 Standorten. Die maximal auftretenden Temperaturen der Kombi-Systeme liegen prinzipiell etwas höher als jene der Warmwasser-Systeme. Dies ist vor allem auf die Regelungsparameter und die höheren zulässigen Temperaturen des Pufferspeichers zurückzuführen.

# Anhang

Tabelle 21: Maximaltemperaturen der Komponenten aller Kombi-Systeme

		Koll_m	Solar_VL	Solar_RL	WT_ein	WT_aus	Sp_o
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Graz	REF	191,03	108,48	74,87	108,04	75,10	102,68
	KS_DB	127,56	90,64	71,89	89,34	74,53	78,68
	KS_RK	94,23	96,45	74,83	95,56	74,06	85,19
	KS_HL_DB	102,82	90,64	71,89	90,11	74,13	78,65
	KS_HL_G	100,77	96,82	75,14	94,65	74,12	85,69
Ottawa	REF	142,45	100,23	74,76	99,88	74,96	95,02
	KS_DB	133,29	91,99	74,52	91,67	74,67	82,49
	KS_RK	94,63	98,75	74,60	98,67	74,78	87,76
	KS_HL_DB	105,39	91,99	74,52	91,67	74,67	82,49
	KS_HL_G	102,33	96,84	74,71	96,51	74,89	90,16
Pe king	REF	133,28	93,73	74,83	95,20	75,00	89,97
	KS_DB	121,39	88,28	73,82	87,90	73,99	83,20
	KS_RK	93,54	93,57	74,70	93,72	74,89	88,32
	KS_HL_DB	100,07	88,28	73,82	87,90	73,99	83,20
	KS_HL_G	99,73	93,93	74,92	93,63	75,07	89,82

Tabelle 22: Druckbelastungen der WW-Systeme im Kollektor an den restlichen Standorten (1)

		Häufigkeiten [h/a]						Druck min [bar abs.]								
								Druck max [bar abs.]								
		<0 [°C]	0 bis 75 [°C]	75 bis 100 [°C]	100 bis 125 [°C]	125 bis 150 [°C]	150 bis 175 [°C]	175 bis 200 [°C]	>200 [°C]							
Antalya	Referenzsystem	Schlecht entleerend		0,0	0,00	2,48	2,60	2,65	2,72	2,72	2,72	3,52	-	-	-	
		Gut entleerend		0,0	0,00	2,48	2,60	2,65	2,72	2,72	2,72	2,72	3,52	-	-	-
		Sehr gut entleerend		0,0	0,00	2,48	2,60	2,65	2,72	2,72	2,72	2,72	3,52	-	-	-
	Kunststoffsystem	Drain-Back ohne ÜS	offen	0,0	1,00	0,60	0,60	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-	-
			geschlossen	0,0	0,00	1,11	1,25	1,37	1,46	1,46	1,46	-	-	-	-	-
		mit Rückkühlung	geschlossen	0,0	0,00	1,42	1,89	2,10	1,00	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Drain-Back mit Hinterlüftung	offen	0,0	1,00	0,60	0,60	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-
			geschlossen	0,0	0,00	1,11	0,57	1,25	1,37	1,40	-	-	-	-	-	-
		mit Hinterlüftung	geschlossen	0,0	0,00	1,94	2,28	2,47	2,53	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Jacksonville	Referenzsystem	Schlecht entleerend		32,9	2,47	2,48	2,60	2,66	2,73	2,73	2,73	6,26	-	-	-
			Gut entleerend		32,9	2,47	2,48	2,60	2,66	2,73	2,73	2,73	4,85	-	-	-
			Sehr gut entleerend		32,9	2,47	2,48	2,60	2,66	2,73	2,73	2,73	4,28	-	-	-
Kunststoffsystem		Drain-Back ohne ÜS	offen	28,3	1,00	0,60	0,60	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-	
			geschlossen	28,3	0,91	0,57	1,25	1,37	1,46	1,47	1,47	-	-	-	-	
		mit Rückkühlung	geschlossen	28,3	1,40	1,41	1,94	2,18	1,00	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Drain-Back mit Hinterlüftung	offen	28,3	1,00	0,60	0,60	1,00	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
			geschlossen	28,3	0,91	0,57	1,25	1,37	1,39	-	-	-	-	-	-	
		mit Hinterlüftung	geschlossen	28,3	1,92	1,93	2,32	2,53	2,58	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

# Anhang

Tabelle 23: Druckbelastungen der WW-Systeme im Kollektor an den restlichen Standorten (2)

			Häufigkeiten [h/a]				Druck min [bar abs.]						
			<0 [°C]	0 bis 75 [°C]	75 bis 100 [°C]	100 bis 125 [°C]	Druck max [bar abs.]						
							125 bis 150 [°C]	150 bis 175 [°C]	175 bis 200 [°C]	>200 [°C]			
Ottawa	Referenzsystem	Schlecht entleerend	1940,3	2,46 2,47	2,47 2,60	2,61 2,67	2,67 2,74	2,74 6,21	-	-	-	-	
		Gut entleerend	6652,8	2,46 2,47	2,47 2,60	2,61 2,67	2,67 2,74	2,74 4,90	0,0	-	0,0	0,0	
		Sehr gut entleerend		2,46 2,47	2,47 2,60	2,61 2,67	2,67 2,74	2,74 4,40	-	-	-	-	
	Kunststoffsystem	Drain-Back ohne ÜS	offen	1898,8	1,00 1,00	0,60 1,13	0,60 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	0,0	-	0,0	-
			geschlossen	6721,1	0,83 0,92	0,57 1,25	1,25 1,36	1,36 1,45	1,45	0,0	-	0,0	-
		mit Rückkühlung	geschlossen	1898,8	1,36 1,40	1,40 1,97	1,97 2,22	1,00 1,00	0,0	-	0,0	-	-
		Drain-Back mit Hinterlüftung	offen	1898,8	1,00 1,00	0,60 1,13	0,60 1,00	1,00 1,00	-	-	-	-	-
			geschlossen	6721,1	0,83 0,92	0,57 1,25	1,25 1,36	1,36 1,37	-	-	-	-	-
		mit Hinterlüftung	geschlossen	1898,8	1,89 1,93	1,93 2,34	2,34 2,56	1,0 2,57	2,57 2,59	0,0	-	0,0	-
	Peking	Referenzsystem	Schlecht entleerend	1212,6	2,46 2,47	2,47 2,63	2,63 2,70	2,70 2,79	2,80 2,80	-	-	-	-
			Gut entleerend	7342,8	2,46 2,47	2,47 2,63	2,63 2,70	2,70 2,79	2,80 2,80	0,0	-	0,0	0,0
			Sehr gut entleerend		2,46 2,47	2,47 2,63	2,63 2,70	2,70 2,79	2,80 2,80	-	-	-	-
Kunststoffsystem		Drain-Back ohne ÜS	offen	1165,8	1,00 1,00	0,60 1,12	0,60 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	0,0	-	0,0	-
			geschlossen	7383,1	0,87 0,92	0,57 1,25	1,25 1,37	1,37 1,43	1,43	0,0	-	0,0	-
		mit Rückkühlung	geschlossen	1165,8	1,41 1,43	1,43 1,81	1,81 1,96	1,00 1,00	0,0	-	0,0	-	-
		Drain-Back mit Hinterlüftung	offen	1165,8	1,00 1,00	0,60 1,12	0,60 1,00	1,00 1,00	-	-	-	-	-
			geschlossen	7383,1	0,87 0,92	0,57 1,25	1,25 1,37	1,37 1,37	-	-	-	-	-
		mit Hinterlüftung	geschlossen	1165,8	1,89 1,92	1,92 2,36	2,36 2,58	1,00 2,58	2,58	0,0	-	0,0	-
Phoenix		Referenzsystem	Schlecht entleerend	0,0	0,00 0,00	2,48 2,60	2,60 2,66	2,66 2,73	2,73 6,42	3,77 3,77	-	-	-
			Gut entleerend	8279,0	0,00 0,00	2,48 2,60	2,60 2,66	2,66 2,73	2,73 5,21	3,77 3,77	0,0	-	0,0
			Sehr gut entleerend		0,00 0,00	2,48 2,60	2,60 2,66	2,66 2,73	2,73 4,59	3,77 3,77	-	-	-
	Kunststoffsystem	Drain-Back ohne ÜS	offen	0,0	1,00 1,10	0,60 1,10	0,60 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	0,0	-	0,0	-
			geschlossen	8064,7	0,00 0,00	0,57 1,25	1,25 1,37	1,37 1,46	1,46 1,52	-	-	-	-
		mit Rückkühlung	geschlossen	0,0	0,00 0,00	1,42 1,94	1,94 2,20	1,00 1,00	0,0	-	0,0	-	-
		Drain-Back mit Hinterlüftung	offen	0,0	1,00 1,00	0,60 1,10	0,60 1,00	1,00 1,00	-	-	-	-	-
			geschlossen	8064,9	0,00 0,00	0,57 1,25	1,25 1,37	1,37 1,43	-	-	-	-	-
		mit Hinterlüftung	geschlossen	0,0	0,00 0,00	1,94 2,32	2,32 2,53	2,53 2,64	0,0	-	0,0	-	-

# Anhang

Tabelle 24: Druckbelastungen der Kombi-Systeme im Kollektor am Standort Ottawa und Peking

		Häufigkeiten [h/a]								Druck min [bar abs.]					
		<0 [°C]	0 bis 75 [°C]	75 bis 100 [°C]	100 bis 125 [°C]	125 bis 150 [°C]	150 bis 175 [°C]	175 bis 200 [°C]	>200 [°C]	Druck max [bar abs.]					
Ottawa	Referenzsystem	Schlecht entleerend		1930,4	6392,3	295,9	108,8	32,7	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
		Gut entleerend		2,48 2,49	2,49 2,56	2,56 2,59	2,59 2,62	2,62 4,69	-	-	-	-	-	-	-
		Sehr gut entleerend		2,48 2,49	2,49 2,56	2,56 2,59	2,59 2,62	2,62 3,87	-	-	-	-	-	-	-
	Kunststoffsystem	Drain-Back ohne ÜS	offen	1893,2	6544,7	184,1	134,3	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
			geschlossen	1,00 1,00 0,83 0,92	0,60 1,13 0,58 1,24	0,60 1,00 0,84 1,35	1,00 1,00 1,35 1,44	1,00 1,00 1,44	-	-	-	-	-	-	
		mit Rückkühlung	geschlossen	1893,3	6558,3	308,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
		Drain-Back mit Hinterlüftung	offen	1893,2	6544,7	317,6	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
			geschlossen	1,00 1,00 0,83 0,92	0,60 1,13 0,58 1,24	0,60 1,00 0,84 1,35	1,00 1,00 1,35 1,38	1,00 1,00 1,38	-	-	-	-	-	-	
		mit Hinterlüftung	geschlossen	1893,3	6561,9	302,8	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
				1,90 1,93	1,93 2,31 2,51	2,31 2,51	2,52 2,56	2,52 2,56	-	-	-	-	-	-	
		Peking	Referenzsystem	Schlecht entleerend		1204,8	6832,6	479,4	231,4	11,8	0,0	0,0	0,0	0,0	-
	Gut entleerend			2,48 2,49	2,49 2,55	2,55 2,58	2,58 2,62	2,62 4,34	-	-	-	-	-	-	
Sehr gut entleerend				2,48 2,49	2,49 2,55	2,55 2,58	2,58 2,62	2,62 3,71	-	-	-	-	-	-	
Kunststoffsystem	Drain-Back ohne ÜS		offen	1161,5	7095,1	334,1	169,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	
			geschlossen	1,00 1,00 0,88 0,92	0,60 1,12 0,58 1,24	0,60 1,00 0,84 1,36	1,00 1,00 1,36 1,44	1,00 1,00 1,36 1,44	-	-	-	-	-		
	mit Rückkühlung		geschlossen	1161,5	7065,8	532,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	
	Drain-Back mit Hinterlüftung		offen	1161,5	7095,1	503,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	
			geschlossen	1,00 1,00 0,88 0,92	0,60 1,12 0,58 1,24	0,60 1,00 0,84 1,36	1,00 1,00 1,36 1,36	1,00 1,00 1,36 1,36	-	-	-	-	-		
	mit Hinterlüftung		geschlossen	1161,5	7060,5	538,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	
			1,88 1,91	1,91 2,41 2,41	2,41 2,69	2,69 2,70	2,69 2,70	-	-	-	-	-			

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Vorgänge beim Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre (Brandstetter et al, 2004) .....	13
Abbildung 2-2: Jahressumme der Globalstrahlung auf die horizontale Fläche weltweit ( <a href="http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI">http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI</a> ; 14.07.2015) .....	14
Abbildung 2-3: Hydraulikschema einer solarthermischen Warmwasserbereitungsanlage mit Umwälzpumpe (Brandstetter et al, 2004).....	15
Abbildung 2-4: Hysterese beim Ein- und Ausschalten der Pumpe (Brandstetter et al, 2004) .....	16
Abbildung 2-5: Aufbau eines Flachkollektors ( <a href="http://www.kaufmann-heizung.de/content/52/53/info">http://www.kaufmann-heizung.de/content/52/53/info</a> ; 14.07.2015) .....	17
Abbildung 2-6: Schematischer Aufbau und Energieflüsse eines Sonnenkollektors (Streicher et al, 2014) .....	19
Abbildung 2-7: schematische Darstellung der Wirkungsgradkennlinie .....	20
Abbildung 2-8: Systemdruck während der Stagnation bei unterschiedlichen Entleerungsverhalten (Hausner & Fink, 2003).....	22
Abbildung 3-1: Polymerpyramide (Köhl et al, 2012) .....	23
Abbildung 3-2: Kollektor der Firma Aventa ( <a href="http://www.bine.info/themen/news/kollektoren-guenstig-in-gebaeude-integrieren/">http://www.bine.info/themen/news/kollektoren-guenstig-in-gebaeude-integrieren/</a> , 2.9.2014) .....	25
Abbildung 3-3: Kommerziell erhältlicher Wärmespeicher aus Kunststoff „Sanicube Pex“ von der Firma Rotex ( <a href="http://de.rotex-heating.com/service/techn-unterlagen/archiv/sanicubehybridcube.html?tx_damdownloads_pi1%5Bdownload%5D=1152">http://de.rotex-heating.com/service/techn-unterlagen/archiv/sanicubehybridcube.html?tx_damdownloads_pi1%5Bdownload%5D=1152</a> , 10.9.2015) .....	27
Abbildung 3-4: “Conus 502“, Kunststoffspeicher der Firma Consolar ( <a href="https://www.dbu.de/533bild14431_123_1863_123.html">https://www.dbu.de/533bild14431_123_1863_123.html</a> , 3.9.2015).....	27
Abbildung 4-1: Kostenstruktur von solarthermischen Systemen zur Warmwasserbereitung.....	29
Abbildung 4-2: Kostenstruktur von Kombi-Anlagen .....	30
Abbildung 4-3: Spezifische Systemkosten solarthermischer Anlagen .....	31
Abbildung 4-4: spezifische Kosten des Kollektors .....	32

Abbildung 4-5: Kosten des Speichers.....	33
Abbildung 4-6: Spezifische Kosten der Rohrleitungen.....	34
Abbildung 4-7: WW-System von Aventa ( <a href="http://www.avena.no/eng/content/download/7837/39760/version/1/file/Price_example_DHW-20150820_EN.pdf">http://www.avena.no/eng/content/download/7837/39760/version/1/file/Price_example_DHW-20150820_EN.pdf</a> , 12.1.2016).....	35
Abbildung 4-8: Kombi-System von Aventa ( <a href="http://www.avena.no/eng/Media/Files/Price_example_COMBI_20150820_EN">http://www.avena.no/eng/Media/Files/Price_example_COMBI_20150820_EN</a> , 12.1.2016) .....	36
Abbildung 5-1: Die zehn Länder mit der größten installierten solarthermischen Kollektorleistung im Jahr 2013 (Mauthner et al, 2015) .....	38
Abbildung 5-2: Jahressumme der Globalstrahlung auf die horizontale und geneigte Fläche an den Referenzstandorten .....	40
Abbildung 5-3: Häufigkeitsverteilung der relativen Luftfeuchte an den Referenzstandorten .....	41
Abbildung 5-4: Außenlufttemperatur an den Referenzstandorten.....	42
Abbildung 5-5: Aufbau der WW-Anlage.....	43
Abbildung 5-6: Kennlinien der Referenzkollektoren bei 1000W/m <sup>2</sup> Einstrahlung und 30°C Umgebungstemperatur.....	45
Abbildung 5-7: Aufbau der Kombi-Anlage .....	47
Abbildung 5-8: Warmwasserprofile an den Referenzstandorten.....	49
Abbildung 6-1: Drain-Back-System im Betrieb (links) und im Ruhezustand (rechts) ( <a href="http://www.homepower.com/sites/default/files/articles/ajax/docs/5_Ramlow-DB.jpg">http://www.homepower.com/sites/default/files/articles/ajax/docs/5_Ramlow-DB.jpg</a> , 16.12.2015) .....	53
Abbildung 6-2: Prinzip eines Kollektors mit Rückkühlung (links) und der Versuchsaufbau (rechts) (Lang et al, 2014) .....	54
Abbildung 6-3: Schematische Darstellung der Durchströmung des Kunststoffkollektors mit Rückkühler bei Stagnation (Hintringer et al, 2013) .....	54
Abbildung 6-4: Temperaturentwicklung des Kunststoffkollektors mit Rückkühler bei Stagnation (Thür et al, 2013).....	55
Abbildung 6-5: Kollektor mit Hinterlüftung auf Dach (Harrison und Cruickshank, 2012)	56
Abbildung 6-6: Prinzip der Belüftung eines Kollektors zwischen Absorber und Rückwanddämmung (Harrison und Cruickshank, 2012) .....	56
Abbildung 6-7: Temperaturvergleich eines Metallkollektors mit (blau) und ohne Rückkühlung (rot) (Harrison et al, 2004).....	57

Abbildung 6-8: Kennlinien von Kunststoffkollektoren ohne Belüftung sowie mit unterschiedlichen Durchlüftungsvarianten (Ramschak et al, 2015).....	58
Abbildung 6-9: Temperaturverteilung auf der sonnenzugewandten Absorberfläche bei unterschiedlichen Durchlüftungsvarianten (Ramschak et al, 2015).....	59
Abbildung 6-10: Kennlinien der Kunststoffkollektoren bei 1000 W/m <sup>2</sup> Einstrahlung und 30 °C Umgebungstemperatur.....	63
Abbildung 6-11: Tagesverlauf des WW-Referenzsystems am Standort Graz.....	65
Abbildung 6-12: Tagesverlauf des WW-KS-Systems mit Drain-Back-Tank (KS_DB) am Standort Graz.....	66
Abbildung 6-13: Tagesverlauf des WW-KS-Systems mit Rückkühlung (KS_RK) am Standort Graz.....	67
Abbildung 6-14: Zeitausschnitt aus Abbildung 6-13.....	68
Abbildung 6-15: Tagesverlauf des WW-KS-Systems mit Drain-Back-Tank und Hinterlüftung (KS_HL_DB) am Standort Graz.....	69
Abbildung 6-16: Tagesverlauf des WW-KS-Systems mit Hinterlüftung (KS_HL_G) am Standort Graz.....	70
Abbildung 6-17: Kollektorflächenvergleich der WW-Anlagen zwischen Referenzsystem und Kunststoffsystem mit Rückkühlung am Standort Graz.....	71
Abbildung 6-18: Kollektorflächenvergleich der Kombi-Anlagen zwischen Referenzsystem und Kunststoffsystemen mit Drain-Back-Tank am Standort Graz.....	74
Abbildung 7-1: Wärmegestehungskosten der WW-Systeme am Standort Graz.....	78
Abbildung 7-2: Wärmegestehungskosten der Kombi-Systeme am Standort Graz.....	79
Abbildung 7-3: Wärmegestehungskosten aller WW-Anlagen bei gleichem solaren Deckungsgrad wie das standortübliche Referenzsystem.....	80
Abbildung 7-4: Wärmegestehungskosten aller Kombi-Anlagen bei gleichem solaren Deckungsgrad wie das standortübliche Referenzsystem,.....	80
Abbildung 7-5: Einfluss der Kostenreduktion auf die WGK des WW-Kunststoffsystem mit Rückkühlung im Vergleich zum Referenzsystems in Graz.....	81
Abbildung 7-6: Einfluss der Kostenreduktion auf die WGK des Kombi-Kunststoffsystem mit Rückkühlung im Vergleich zum Referenzsystems in Graz.....	82
Abbildung 7-7: Vergleich Herstellungskosten von Metall- (blau) und Kunststoffkollektoren (rot) in Abhängigkeit von einer jährlichen Produktionsmenge (Poschanig et al, 2014).....	83

Abbildung 7-8: Kosten des durchschnittlichen WW-Systems aus der Kostenanalyse, Kosten des Referenzsystems und des Kunststoffsystems mit RK in Graz .....	86
Abbildung 7-9: Wärmegestehungskosten der WW-Systeme unter Berücksichtigung der Kostenreduktion aus Tabelle 12 .....	88
Abbildung 7-10: Wärmegestehungskosten der Kombi-Systeme unter Berücksichtigung der Kostenreduktion aus.....	88
Abbildung 8-1: Temperaturen der WW-Anlage.....	89
Abbildung 8-2: Häufigkeiten der Systemtemperaturen der WW-Referenzsystems in Graz.....	91
Abbildung 8-3: Häufigkeiten der Temperaturen des WW-Referenzspeichers in Graz ...	92
Abbildung 8-4: Vergleich der Kollektormitteltemperaturhäufigkeiten der verschiedenen WW-Systeme am Standort Graz .....	93
Abbildung 8-5: Häufigkeiten einiger Systemtemperaturen der Kombi-Referenzanlage in Graz.....	94
Abbildung 8-6: Summenhäufigkeiten der Temperaturen im Speicher des Kombi-Referenzsystems in Graz .....	95
Abbildung 8-7: Vergleich der Häufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen aller Kombi-Systeme in Graz.....	95
Abbildung 9-1: Tagesverlauf mit Druckentwicklung im Kollektor des WW-Referenzsystems in Graz .....	104
Abbildung 9-2. Tagesverlauf mit Druckentwicklung im Kollektor des WW-Kunststoffsystems mit Rückkühlung (KS_RK) in Graz .....	105
Abbildung 9-3. Tagesverlauf mit Druckentwicklung im Kollektor des geschlossenen WW-Kunststoffsystems mit Drain-Back-Tank (KS_DB_G) in Graz.....	108
Abbildung 9-4: Tagesverlauf mit Druckentwicklung im Kollektor des offenen WW-Kunststoffsystems mit Drain-Back-Tank (KS_DB) in Graz .....	109
Abbildung 9-5: Druckhäufigkeiten der WW-Systeme in Graz .....	110
Abbildung 0-1: Eingabedatensatz für das WW-Referenzsystem in Graz (1) .....	119
Abbildung 0-2: Eingabedatensatz für das WW-Referenzsystem in Graz(2) .....	120
Abbildung 0-3: Eingabedatensatz für das Kombi-Referenzsystem in Graz (1).....	121
Abbildung 0-4: Eingabedatensatz für das Kombi-Referenzsystem in Graz (2).....	122
Abbildung 0-5: Auszug aus dem Klimadatensatz für Graz.....	123
Abbildung 0-6: Eingabedatendatei für Rückkühlung.....	124
Abbildung 0-7: Eingabedatendatei für Hinterlüftung .....	124

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 0-8: Ausgabedatensatz des WW-Referenzsystems in Graz .....	125
Abbildung 0-9: Ausgabedatensatz des Kombi-Referenzsystems in Graz.....	126
Abbildung 0-10: Prüfbericht Sunlumo .....	127

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Kosten des WW-Systems von Aventa .....	35
Tabelle 2: Kosten des Kombi-Systems von Aventa .....	37
Tabelle 3: Preise der AventaSolar Kollektormodule für unterschiedliche Kollektorlängen .....	37
Tabelle 4: Liste des Kollektorherstellers des jeweiligen Landes .....	45
Tabelle 5: Parameterübersicht der Referenzsysteme.....	50
Tabelle 6: Werte des Korrekturfaktors $f_1$ für Rückkühlung .....	61
Tabelle 7: Werte des Korrekturfaktors $f_1$ für Hinterlüftung .....	62
Tabelle 8: Koeffizienten der Wirkungsgradkennlinie der Kunststoffkollektoren ohne Überhitzungsschutz .....	63
Tabelle 9: Solare Deckungsgrade und Kollektorflächen aller WW-Systeme an allen Standorten.....	72
Tabelle 10: Solare Deckungsgrade und Kollektorflächen aller Kombi-Systeme an allen Standorten (Graz, Ottawa, Peking).....	73
Tabelle 11: Parameter bei der Berechnung der Wärmegestehungskosten .....	76
Tabelle 12:mögliche Kostenreduktion der Kunststoffsysteme für WW- und Kombianlagen.....	85
Tabelle 13: Kostenreduktion des Kunststoffsystems mit RK im Vergleich zum Referenzsystem.....	87
Tabelle 14: Eingabeparameter von REF, KS_RK und KS_HL_G in Graz .....	102
Tabelle 15: Eingabeparameter für KS_DB_G und KS_HL_DB_G in Graz .....	107
Tabelle 16:Druckbelastungen des WW-Systems im Kollektor am Standort Graz.....	111
Tabelle 17: Druckbelastungen des Kombi-Systems im Kollektor am Standort Graz ...	111
Tabelle 18: Häufigkeit der Kollektormitteltemperaturen aller WW-Systeme .....	128
Tabelle 19: Häufigkeit der Kollektormitteltemperaturen aller Kombi-Systeme .....	128
Tabelle 20: Maximaltemperaturen der Komponenten aller WW-Systeme .....	130
Tabelle 21: Maximaltemperaturen der Komponenten aller Kombi-Systeme .....	131
Tabelle 22: Druckbelastungen der WW-Systeme im Kollektor an den restlichen Standorten (1).....	131

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 23: Druckbelastungen der WW-Systeme im Kollektor an den restlichen Standorten (2).....	132
Tabelle 24: Druckbelastungen der Kombi-Systeme im Kollektor am Standort Ottawa und Peking .....	133