

Polymermaterialien in solarthermischen Systemen – Leistungsanforderungen und Belastungen

von

Thomas Ramschak

als Diplomarbeit der Kommission zur Abhaltung der dritten Diplomprüfung der Studienrichtung
Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau an der Technischen Universität Graz über das
Institut für Wärmetechnik vorgelegt.

Betreuer

Ing. Christian Fink – AEE-Intec

Dipl.-Ing. (FH) Dr.techn. Andreas Heinz – Institut für Wärmetechnik

Beurteiler

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rieberer René – Institut für Wärmetechnik

Graz, im November 2012

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Kurzfassung

Titel: Polymermaterialien in solarthermischen Systemen – Leistungsanforderungen und Belastungen

Autor: Ramschak Thomas

Stichwörter: Überhitzungsschutz, Hinterlüftung, Rückkühler, thermotrope Schicht

Der stagnierende Solarthermiemarkt und die langfristig steigenden Rohmaterialpreise erfordern innovative Lösungen um Einsparungspotentiale realisieren zu können und den ersehnten Aufschwung in der Branche zu schaffen. Im Rahmen des Projektes „Solarthermische Systeme aus Polymerwerkstoffen (SolPol)“ werden neuartige Kollektoren und Systemkomponenten aus Kunststoffen entwickelt und zur Marktreife gebracht. Polymerwerkstoffe weisen aber andere thermo-mechanische Belastungsgrenzen als konventionelle Werkstoffe (Metalle, Glas) auf. Um preiswerte Materialien einsetzen zu können ist es daher notwendig, die Leistungsanforderungen an die Systeme - vor allem hinsichtlich Temperatur- und Druckbelastungen - zu kennen.

Im ersten Schritt wurden auf Basis von Recherchen und Expertenbefragungen repräsentative Referenzsysteme an fünf Standorten (Graz, Athen, Pretoria, Fortaleza, Peking) zur solarthermischen Warmwasserbereitung sowie zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung mit marktüblichen Kollektoren (Metall- und Glasbauteile) definiert. Aufbauend auf diese wurden Systeme in Kunststoffausführung ohne (entleerend, Thermosiphon) und mit Überhitzungsschutz (Rückkühlfunktion oder thermotrope Schicht) untersucht. Je nach Anwendung und Konzept wurden die Referenz- und Kunststoffsysteme mit den Simulationsprogrammen Polysun und SHW_2012 einer Jahressimulation unterzogen. Anhand der berechneten Kollektortemperaturen wurden die Druckbelastungen auf Basis eines theoretischen Modells ermittelt. Mit den Ergebnissen wurden Temperatur- und Druckhäufigkeitsverteilungen erstellt und in Matrizen für die konkreten Standorte zusammengefasst. Diese bilden die Grundlage für die Entscheidungsfindung über mögliche einsetzbare Materialien und weiterführende Studien.

In Kunststoff-Systemen ohne Überhitzungsschutz werden je nach Kollektorgüte und den klimatischen Bedingungen maximale Temperaturen im Kollektor von rund 170 °C erreicht. Die notwendige hohe Temperaturbeständigkeit erfordert kostenintensive Hochleistungspolymere. Überhitzungsschutzmodelle wie eine Rückkühlfunktion oder eine thermotrope Schicht können hingegen ein wirksames und geeignetes Mittel darstellen, um preiswertere Standardpolymere (<90 °C Langzeit-Temperaturbeständigkeit) in der Kollektorfertigung einsetzen zu können.

Abstract

Title: Polymeric materials in solar-thermal systems - Performance requirements and loads

Author: Ramschak Thomas

Key words: overheat protection, rear-ventilation, re cooler, thermotropic layers

The stagnating solar-thermal market and the steadily rising commodity prices of raw materials demand creative solutions in order to realize potential savings and to enable the desired recovery in the industry. Within the framework of the SolPol project (“Solar-thermal systems based on Polymeric materials”), innovative collectors and polymeric system components are developed and brought to the market. However, plastic materials show considerable differences in thermal and mechanical properties compared with conventional materials like glass or metals. In order to be able to use low-cost materials, it is therefore necessary to explore the performance requirements of the systems, especially with regard to the temperature and pressure loads.

To this effect, reference solar-thermal systems using conventional metal and glass collectors have been selected for five locations (Graz, Athens, Pretoria, Fortaleza, Peking). Starting from these reference systems, modified polymeric solar-thermal systems with (recooling function, thermo-tropic layer) and without (drain back, thermosyphon) overheat protection have been examined. All systems have been simulated with the software Polysun and SHW_2012 under different conditions for a period of one year. Pressure loads have been derived from the calculated collector temperatures on the basis of a theoretical model. Finally, from the simulation results, temperature and pressure frequency distributions have been determined for the actual locations and displayed in a convenient matrix format, that is intended to simplify the selection process of applicable materials and form the basis for further studies.

Polymeric systems without overheat protection reach a maximum temperature in the collector of about 170 °C depending on the quality of the collector as well as the climate conditions. The necessity of enduring high temperatures requires expensive high-performance polymeric materials. On the other hand, overheat protection models like drain back functions or thermotropic layers represent a suitable and effective means for the implementation of inexpensive standard polymers having long-term temperature resistances of less than 90 °C.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Diplomand im Rahmen eines Forschungsprojektes an der AEE - INTEC. An dieser Stelle möchte ich mich beim Team der AEE - INTEC für die angenehme Arbeitsatmosphäre und für die Möglichkeit diese wissenschaftliche Abschlussarbeit zu verfassen, bedanken.

Besonders möchte ich mich bei meinen wissenschaftlichen Kollegen DI Alexander Kaiser und Ing. Christian Fink bedanken, die mich tatkräftig mit ihrer fachlichen Kompetenz und konstruktiven Kritik richtungsweisend unterstützt und sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gebührt auch meinen universitären Betreuern Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rieberer René und Dipl.-Ing. (FH) Dr.techn. Andreas Heinz, die mich während dieser Arbeit betreut und unterstützt haben.

Ein herzlicher Dank gebührt meiner ganzen Familie insbesondere meinen Eltern, die mich während des gesamten Studiums begleitet, mich finanziell und vor allem mit ihren ständigen Beistand und motivierenden Gesprächen unterstützt haben.

Schließlich möchte ich mich noch bei meiner Freundin Simone bedanken, die mir immer den nötigen Rückhalt gegeben hat, niemals aufhörte an mich zu glauben und manchen Verzicht in Kauf nehmen musste. Herzlichen Dank!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Das Projekt SolPol.....	5
1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	6
1.3	Methodik.....	7
2	Allgemeine Grundlagen.....	8
2.1	Sonnenenergienutzung.....	8
2.2	Sonnenkollektoren.....	9
2.2.1	Aufbau.....	10
2.2.2	Energiebilanz an einem Flachkollektor.....	11
2.2.3	Kollektorwirkungsgradkennlinie.....	13
2.3	Solarthermische Anlagen.....	15
2.3.1	Systeme nach dem Thermosiphon Prinzip.....	15
2.3.2	Zwangsumlaufsysteme.....	18
2.4	Betriebszustände.....	22
2.4.1	Normalbetrieb.....	22
2.4.2	Stillstand.....	22
2.5	Kennzahlen solarthermischer Systeme.....	27
3	Polymerwerkstoffe.....	29
3.1	Polymerwerkstoffe in solarthermischen Anwendungen.....	29
3.2	Aktuell verfügbare Vollkunststoffkollektoren.....	30
3.2.1	ECO-Flare.....	30
3.2.2	Aventa.....	33
4	Referenzsysteme.....	36
4.1	Auswahl der Referenzstandorte.....	36
4.2	Klimadaten an den Referenzstandorten.....	36
4.3	Marktrecherche an den Referenzstandorten.....	38
4.4	Anwendungsgebiete im Überblick.....	40

5	Simulationsumgebungen	45
5.1	Polysun	45
5.2	SHW_2012	46
5.3	SHW_T_P_Stat.....	47
5.4	Simulationsumgebung Solar	48
6	Systeme in kunststoffgerechter Ausführung.....	49
6.1	Rückkühlfunktion.....	49
6.2	Thermotrope Schicht.....	53
6.3	Drain-Back-System	58
6.4	Bestimmung der Kollektorfläche in Kunststoffausführung.....	60
7	Temperaturbelastungen.....	65
7.1	Methodik zur Bestimmung der Temperaturhäufigkeiten	65
7.1.1	Gefüllter Zustand.....	65
7.1.2	Ungefüllter Zustand	65
7.2	Ergebnisse der Temperaturbelastungen	66
7.2.1	Temperaturbelastungen des Referenzsystems zur Warmwasserbereitung am Standort Graz	66
7.2.2	Temperaturbelastungen der Kunststoffsysteme zur Warmwasserbereitung am Standort Graz	70
7.2.3	Vergleich der Temperaturbelastungen von Kunststoffsystemen anhand der Anwendungsgebiete am Standort Graz	71
7.2.4	Temperaturbelastungen des Zweikreis-Thermosiphonsystems zur Warmwasserbereitung am Standort Athen	73
7.2.5	Vergleich der Temperaturbelastungen von Kunststoff-Thermosiphonsystemen zur Warmwasserbereitung an den verschiedenen Referenzstandorten	76
7.2.6	Vergleich der Temperaturbelastungen des Kunststoffkollektors im ungefüllten Zustand an den verschiedenen Referenzstandorten.....	78
7.3	Zusammenfassung der Temperaturbelastungen	79
8	Druckbelastungen.....	81
8.1	Methodik zur Bestimmung der Druckhäufigkeiten	81
8.1.1	Systemdrücke in geschlossenen gepumpten Systemen.....	82

8.1.2	Systemdrücke in entleerenden Systemen(Drain-Back).....	93
8.1.3	Systemdrücke in Thermosiphon-Systemen	96
8.2	Druck-Belastungen im Systemvergleich.....	97
8.3	Zusammenfassung der hydraulischen Parameter und Druckbelastungen.....	101
8.3.1	Hydraulische Parameter der gepumpten Systeme	101
8.3.2	Druckbelastungen der gepumpten Systeme	104
8.3.1	Hydraulische Parameter der Thermosiphon-Systeme	107
8.3.1	Druckbelastungen der Thermosiphon-Systeme.....	107
9	Zusammenfassung und Ausblick	108
	Literaturverzeichnis	112
	Anhang A	114
	Anhang B	115
	Abbildungsverzeichnis.....	120
	Tabellenverzeichnis.....	125

1 Einleitung

Klimaschutz und ein verantwortungsvoller Umgang mit Energie haben in den letzten Jahren einen immer prominenteren Stellenwert in der Gesellschaft und auf politischer Ebene in der Europäischen Union erlangt. Die Klima- und Energiepolitik sind so eng miteinander verbunden, dass an eine getrennte Betrachtung nicht mehr zu denken ist. Neben der Reduktion von klimaschädlichen Stoffen verlangt die bevorstehende Verknappung von endlichen Ressourcen wie Erdöl und Kohle eine Steigerung der Energieeffizienz und eine Änderung in der Energieversorgung.

Auf europäischer Ebene hat man sich im Jahr 2008 auf ein Richtlinien- und Zielpaket für Klimaschutz und Energie geeinigt. Darin sind Vorgaben enthalten, die häufig als „20-20-20-Ziele“ bezeichnet werden. Konkret sollen mittelfristig bis 2020 die Treibhausgasemissionen um mindestens 20 Prozent gegenüber dem Stand von 1990 gesenkt, die Energieeffizienz um 20 Prozent gesteigert sowie der Anteil an erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch in Europa um 20 Prozent gesteigert werden.

Im Jahr 2009 wurde eine EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen veröffentlicht. Mit ihr wurden verbindliche Erneuerbare-Energie-Ziele festgelegt. Um diese Vorgaben zu erreichen, wurden den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union individuelle Ziele zugeteilt (z.B. muss Österreich bis 2020 einen Anteil von 34% erneuerbarer Energie am Gesamtenergieverbrauch aufweisen). Die Mitgliedsstaaten wurden verpflichtet, einen nationalen Aktionsplan für erneuerbare Energien sowie Prognosen über deren Zielerreichung auszuarbeiten. Jeder Staat kann selbst definieren wie er diese Ziele erreichen will. (Green European Foundation, 2010)

Die Abbildung 1-1 zeigt die nationalen Pläne der 27 EU-Mitgliedsstaaten im Bereich solarthermischer Anwendung. An den blauen Balken ist die bereits installierte solarthermische Leistung auf der linken Achse sowie der prozentuelle Anteil im Hinblick auf das Jahr 2020 ersichtlich. Die gelben Balken spiegeln die geplante solarthermische Leistung im Jahr 2020 wider, um die jeweiligen nationalen Pläne zu erreichen. Man kann erkennen, dass der Markt für solarthermische Anwendungen in vielen Staaten wie Estland, Finnland und einigen anderen bis jetzt nur begrenzt an Bedeutung erlangt hat. Diese fokussieren ihre Anstrengungen zur Erreichung der gesetzten Ziele in andere Alternativen. Merkliche Steigerungen sind vor allem in Italien, Deutschland, Frankreich, Spanien und Polen zu sehen. Zypern gefolgt von Griechenland und Österreich werden jedoch weiterhin ihre Spitzenpositionen bezogen auf die installierte Leistung pro Einwohner behalten.

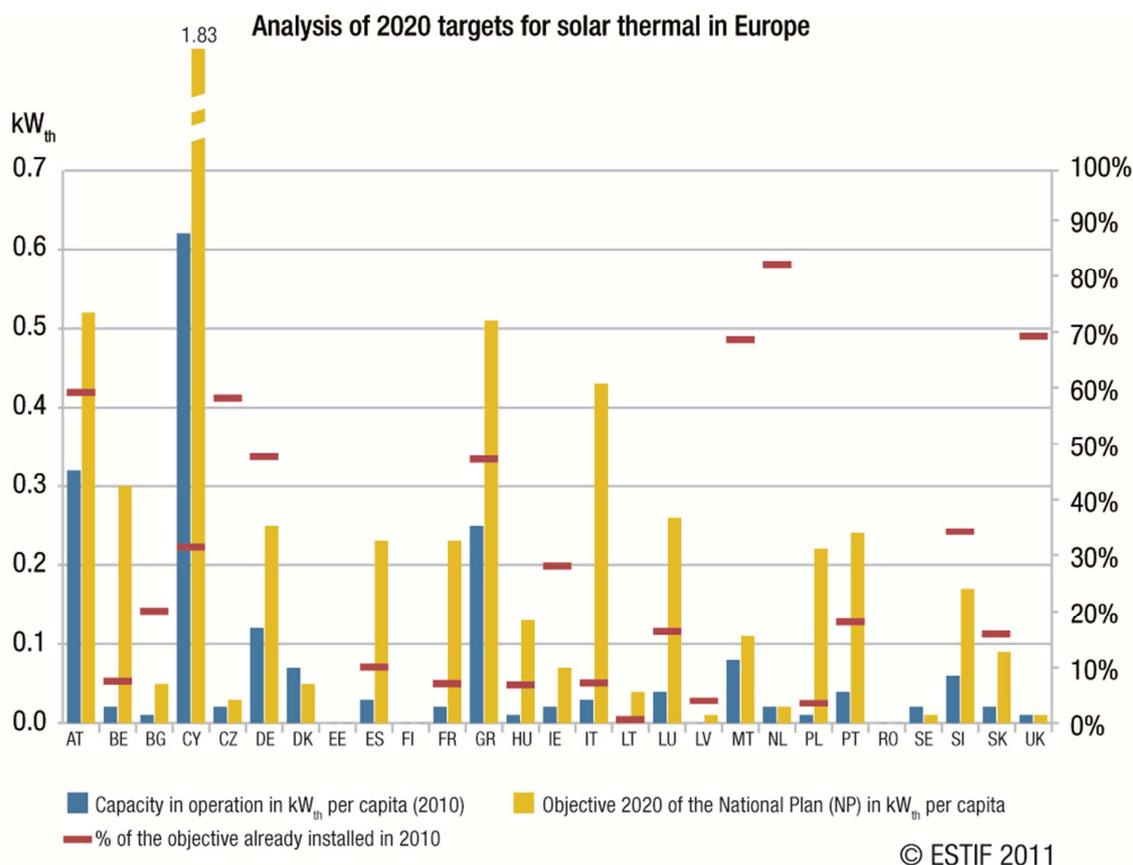


Abbildung 1-1: Bereits installierte solarthermische Leistung je Einwohner in den 27-EU-Mitgliedsstaaten und deren Perspektiven auf das Jahr 2020 (ESTIF, 2011)

Langfristig hat sich die Europäische Union bis 2050 dazu verpflichtet, die europäischen Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 Prozent zu senken und zielt somit auf eine Stabilisierung der globalen Erwärmung ab. Nach der Agenda 2020 kann bis dato noch nicht konkret vorhergesagt werden, welche Richtung eingeschlagen werden soll. Es wurden verschiedene Szenarien erstellt und analysiert, bei denen eine Verringerung der Treibhausgasemissionen um 80% erreicht werden soll. Diese Szenarien zeigen mögliche Wege zur Modernisierung des Energiesystems. Hierbei handelt es sich nicht um eine Entweder-Oder-Option, sondern vielmehr um die sich abzeichnenden Gemeinsamkeiten. Neben der generell hohen Verpflichtung zur Energieeinsparung zeigen alle Szenarien einen deutlichen Anstieg an erneuerbarer Energie.

Im Rahmen einer Studie der European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF) „Potential of Solar Thermal in Europe“ wurde in drei Szenarien die künftige Entwicklung des Solarthermiemarktes in Europa betrachtet.

- „Business as Usual“-Szenario (Referenz-Szenario)
- Forcierte Marktentwicklung „Advanced Market Deployment“-Szenario (beinhaltet insbesondere finanzielle und politische Fördermechanismen)

- „Full R&D and Policy“-Szenario (vollständige Umsetzung bei Forschung und Entwicklung sowie spezielle politische Maßnahmen, einschließlich umfangreicher finanzieller und politischer Fördermechanismen, Energiesparmaßnahmen und Forschungsaktivitäten)

Diese drei Szenarien und deren solaren Beiträge werden in Abbildung 1-2 abgebildet.

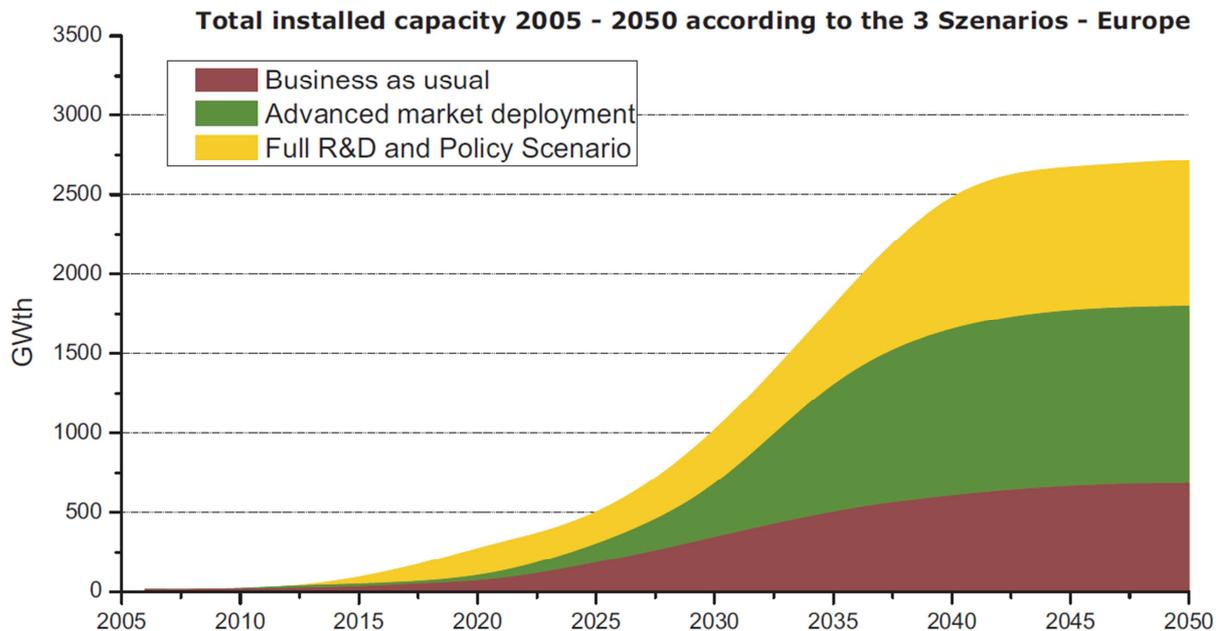


Abbildung 1-2: Prognosen des solarthermischen Potentials in Europa bis ins Jahr 2050 basierend auf drei Szenarien (Weiss & Biermayr, 2009)

Betrachtet man in der Abbildung das „Full R&D and Policy“-Szenario, zeigt sich, dass es in Europa zu einem Solarthermie-Zuwachs von rund 2700 Gigawatt thermisch kommen kann. Um dieses Ziel zu erreichen, werden nach Weiss & Biermayr (2009) pro Einwohner in den Mitgliedsstaaten rund 8 Quadratmeter Kollektorfläche benötigt.

Diese wesentliche Zunahme der solarthermischen Nutzung benötigt einen hohen Einsatz an Grundmetallwerkstoffen wie Kupfer und Aluminium für den Kollektorbau. Jedoch zeichnet sich bereits jetzt durch die starke Nachfrage nach diesen Grundmetallwerkstoffen ein Preisanstieg ab.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Rohstoffpreisentwicklung der zwei wichtigsten Materialien für Solarkollektoren.

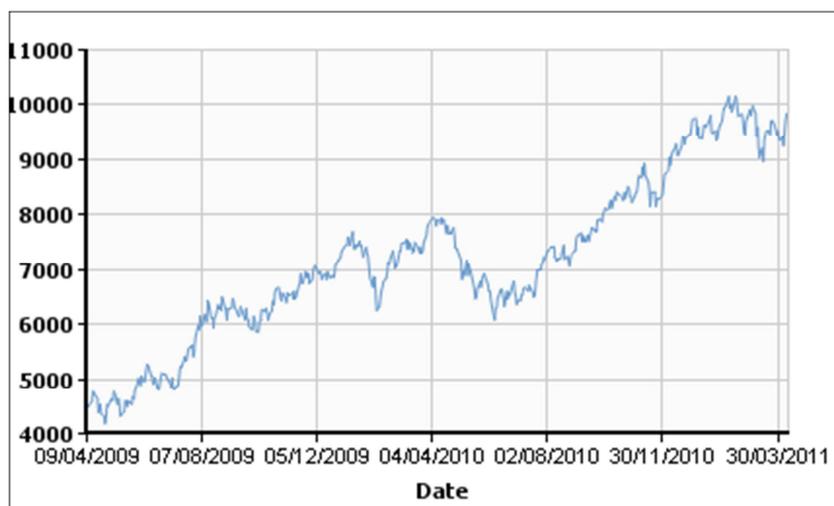


Abbildung 1-3: Rohmaterialpreis für Kupfer während der Jahre 2009 - 2011 in \$/Tonne
(<http://www.lme.com>, 09.07.2012)

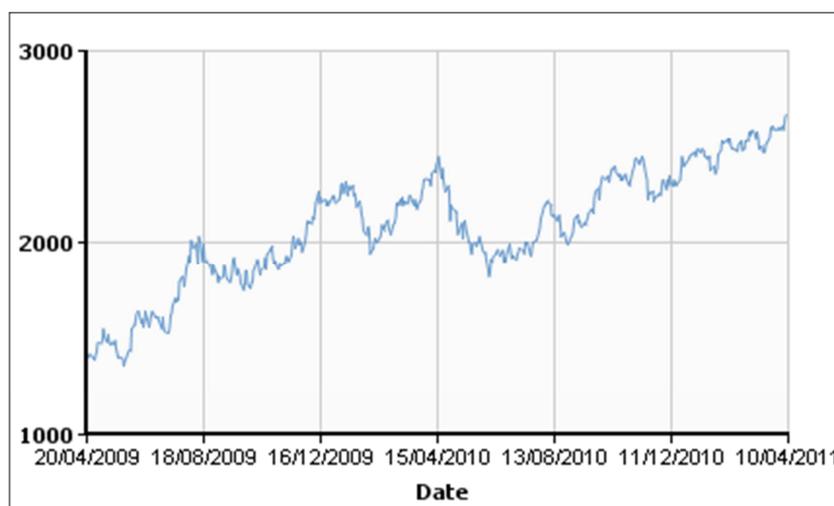


Abbildung 1-4: Rohmaterialpreis für Aluminium während der Jahre 2009 - 2011 in \$/Tonne
(<http://www.lme.com>, 09.07.2012)

In den Abbildungen 1-3 und 1-4 ist eine deutliche Preissteigerung in den Verläufen für Kupfer und Aluminium seit 2009 zu verzeichnen. Steigen die Rohmaterialpreise in dieser Weise weiter an, wird sich das negativ auf die Kollektorpreise auswirken.

Aus Kostengründen werden daher innovative, preisgünstigere Lösungen gefordert. Daher geht eine Entwicklungsschiene in der Forschung immer deutlicher in Richtung Einbindung von Polymerwerkstoffen oder ganzheitliche Substitution herkömmlicher Materialien in solarthermischen Systemen und Komponenten.

Die zuvor angesprochenen drei Szenarien des solarthermischen Potentials in Europa bilden die Basis für eine von der Borealis-Group durchgeführte Studie, um den Bedarf an Polymermaterialien in solarthermischen Systemen bis 2050 in Europa darzustellen (Sultan E. A., 2007).

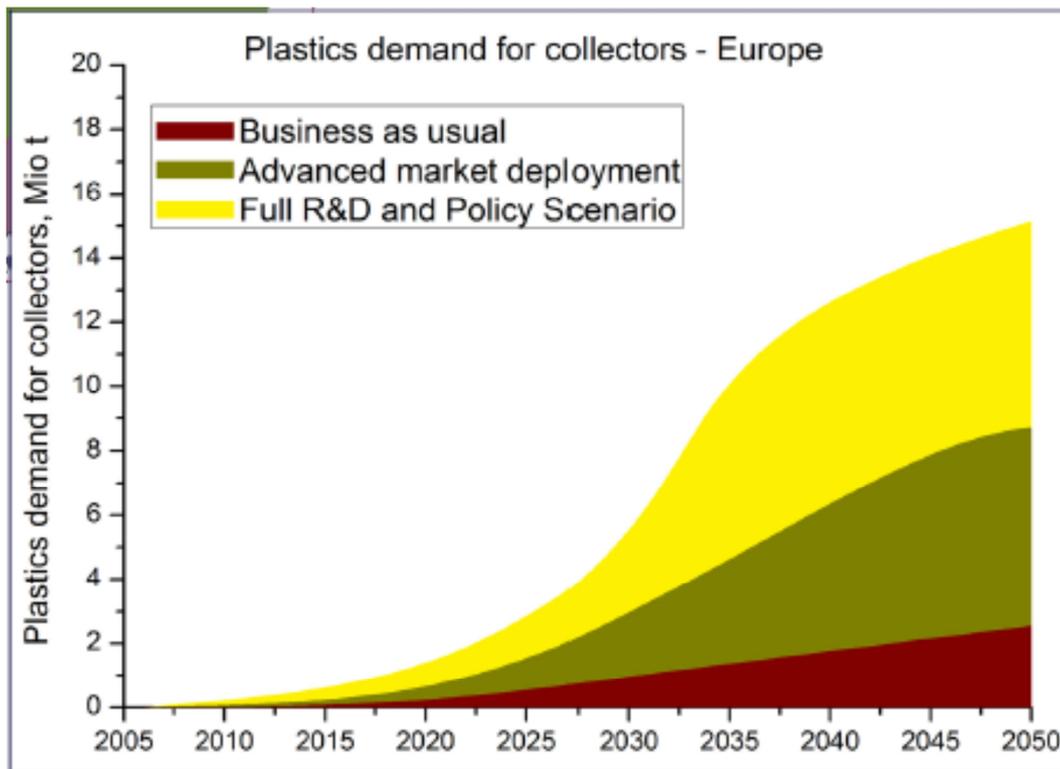


Abbildung 1-5: Prognose über die Nachfrage von Polymermaterialien für den Kollektorbau in Europa bis 2050; (Sultan E.-A., 2007)

Die Abbildung zeigt, dass es im „Full R&D and Policy“- Szenario in Europa zu einem erstaunlichen Bedarfszuwachs an Polymerwerkstoffen von bis zu 15 Millionen Tonnen für die Kollektorfertigung kommen kann. Betrachtet man das Referenz-Szenario, kommt es immerhin noch zu einem Bedarfszuwachs von rund 2 Millionen Tonnen.

Diese Prognosen des potentiellen Kunststoffbedarfs im Bereich Solarthermie bilden die Grundlage für Forschungsprojekte wie SolPol (Solarthermische Systeme aus Polymerwerkstoffen), auf welches im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird.

1.1 Das Projekt SolPol

Österreich besitzt eine Spitzenposition auf dem Gebiet der Solarthermie. Die Implementierung von innovativen Kunststoffsystemen in solarthermischen Anlagen soll diese Position Österreichs verteidigen und weiter ausbauen.

Im Rahmen des Projektes „Solarthermische Systeme aus Polymerwerkstoffen (SolPol)“ sollen neuartige Kollektoren und Systemkomponenten aus Kunststoffen entwickelt und zur Marktreife gebracht werden. Derzeit besteht ein konventioneller Kollektor aus einer Vielzahl unterschiedlichster Werkstoffe, die durch aufwendige und kostenintensive Fertigungsprozesse begleitet werden. Neben der künftig begrenzten Verfügbarkeit bestimmter Rohstoffe wie beispielsweise Kupfer für die Absorber-Herstellung, gibt es ein großes Potential für innovative Entwicklungen. Durch den Einsatz von Kunststoffen können auch Funktionalität und Design für

solarthermische Systeme verbessert werden. Vor allem die Wirtschaftlichkeit kann durch Ausschöpfung von vorteilhaften fertigungstechnischen Verfahren wie etwa Extrusion oder Spritzgussverfahren positiv beeinflusst werden. (<http://www.solpol.at>, 26.11.2011)

Ziel des Forschungsprojektes, an dem insgesamt 9 wissenschaftliche Partner sowie weiters 10 Unternehmenspartner beteiligt sind, ist es, durch die Vernetzung der Kunststoff- und Solarenergieforschung in Österreich innovative Neuentwicklungen sicherzustellen beziehungsweise weiter auszubauen und einen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen zu leisten. Um das Forschungsvorhaben zu erreichen, wird das Projekt in die zwei Einzelprojekte „SolPol1“ (Grundlagenforschung) und „SolPol2“ (Industrielle Forschung) unterteilt, die weitestgehend gleichzeitig bearbeitet und Vorteile aus den Erkenntnissen des jeweiligen Projektes genutzt werden sollen. Hauptziel des „SolPol1“ Projektes liegt in der Schaffung von wissenschaftlichen und methodischen Voraussetzungen für die Entwicklung thermischer Kollektorsysteme in Kunststoffbauweise sowie in der ökologischen und ökonomischen Folgewirkung bei weltweiter Marktdurchdringung. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde das Forschungsvorhaben in drei Arbeitspakete zu den Themen „Leistungsanforderungen“, „Test-Methoden“ und „Perspektiven und Folgewirkungen auf nationaler und globaler Ebene“ unterteilt.

Der Inhalt der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit gliedert sich in die Grundlagenforschung und insbesondere in die Bestimmung der Leistungsanforderungen an Polymermaterialien in solarthermischen Systemen hinsichtlich der Temperatur- und Druckbelastungen ein.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der AEE - Institut für Nachhaltige Technologien, im Rahmen des Arbeitspakets 1 des Subprojektes SolPol1 durchgeführt. Ziel dieses Arbeitspaketes und dieser Arbeit ist die Definition von Leistungsanforderungen an Polymermaterialien in solarthermischen Systemen hinsichtlich der Temperatur- und Druckbelastungen. In Abhängigkeit von unterschiedlichen Systemanwendungen sollen die thermischen und mechanischen (Druck) Anforderungen an den Kollektor und an andere Systemelemente ermittelt und dargestellt werden. Die Ergebnisse sollen als Grundlage für die Auswahl geeigneter Kunststoffe im Arbeitspaket 2 sowie in weiteren Entwicklungen innerhalb des Projektes „SolPol“ dienen.

1.3 Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein möglichst breites aber realistisches Spektrum an die Anforderungen in solarthermischen Systemen (Temperatur- und Druckbelastungen) abgedeckt werden. Die entstehenden Belastungen sind grundsätzlich abhängig von:

- Standort (klimatische Rahmen-Bedingungen)
- Systemaufbau (gepumptes System, Thermosiphon-System)
- Anwendungsgebiet (Warmwasserbereitung EFH/MFH¹, Kombisystem EFH)
- Nutzerverhalten (Warmwasserbedarf)

Nach einer intensiven Marktrecherche und Expertenbefragungen wurden in weiterer Folge:

- standortübliche Kollektoren definiert,
- repräsentative Referenzsysteme definiert, und diese einer dynamischen Jahressimulation mit kommerziellen Simulationsprogrammen (Polysun, SHW_2012) unterzogen,
- Temperaturbelastungen im Kollektor (gefüllt, ungefüllt² und bei Minimaltemperaturen³) ermittelt,
- Drücke anhand eines vereinfachten physikalischen Modells der hydraulischen Systeme berechnet,
- Häufigkeiten von Temperatur- und Druckbelastungen ermittelt.

Nach der Analyse der Referenzsysteme wurden angepasste Systeme mit einem Kollektor auf Kunststoffbasis mit (Rückkühlfunktion, thermotroper Schicht) und ohne (Drain-Back) integrierten Überhitzungsschutz definiert. Analog zu den Referenzsystemen wurde für diese Systeme eine Jahressimulation durchgeführt und wurden Temperaturbelastungen ermittelt. Mit adaptierten Berechnungsmethoden wurden in weiterer Folge die Drücke anhand der Systemtemperaturen berechnet.

Die Ergebnisse der Auswertungen für die Referenz- und Kunststoffsysteme wurden einerseits standortübergreifend und andererseits anwendungsorientiert (Warmwasserbereitung EFH/MFH, teilsolare Raumheizung EFH) verglichen.

¹ EFH ... Einfamilienhaus; MFH ... Mehrfamilienhaus

² ungefüllt: ganzjährig leerer, nicht mit Flüssigkeit gefüllter Kollektor

³ Minimaltemperatur: Temperatur am Kollektor in Abhängigkeit von Himmelstemperatur und Klimadaten

2 Allgemeine Grundlagen

In den folgenden Unterkapiteln werden wichtige Grundlagen und Begriffe für das Verständnis und für diese Arbeit behandelt.

2.1 Sonnenenergienutzung

Die Sonne ist der zentrale Energielieferant in unserem Sonnensystem. Ablaufende Fusionsreaktionen, bei denen im Wesentlichen Wasserstoffatome zu Helium verschmelzen, geben eine enorme Menge an Energie frei, die in Form von elektromagnetischer Strahlung in abgeschwächter aber konstanter Form auf die Erdatmosphäre auftrifft. Dieser Energiestrom wird Solarkonstante genannt und beträgt ca. 1360 W/m^2 . Beim Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre wird ein Teil der Strahlung wie in Abbildung 2-1 dargestellt absorbiert, reflektiert und gestreut. (Ladener & Späte, 1999)

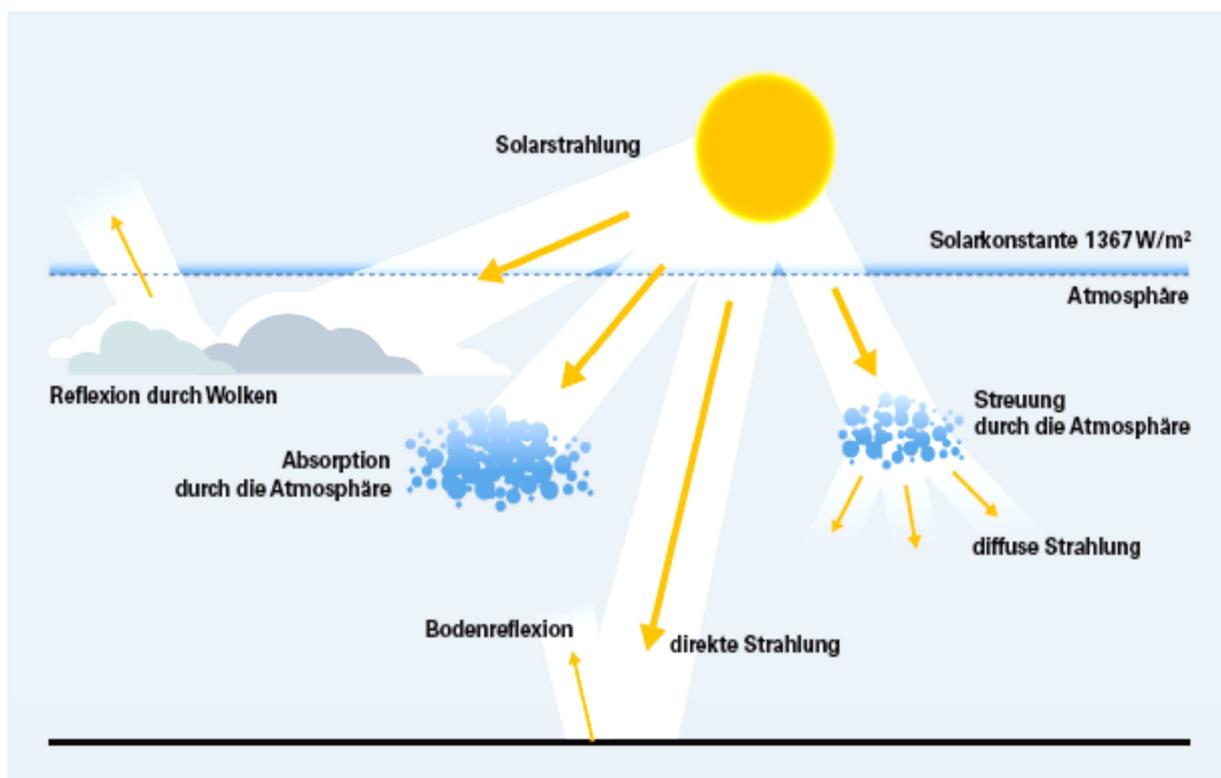


Abbildung 2-1: Vorgänge beim Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre (Viessmann, 2008)

Die die Erdoberfläche erreichende Strahlung wird als Globalstrahlung bezeichnet. Diese setzt sich wiederum aus diffuser und direkter Strahlung zusammen. Die direkte Strahlung fällt nahezu ohne Richtungsänderung auf die Erdoberfläche ein, während die diffuse gleichmäßig aus allen Himmelsrichtungen auftrifft. Der diffuse Anteil ist von der Jahreszeit, den klimatischen Bedingungen, dem Standort sowie Höhenlage und dem Bewölkungsgrad abhängig. In unseren Breitengraden kann dieser Anteil zwischen Sommer und Winter erheblich variieren, beträgt aber im Jahresmittel ca. 60 Prozent. (Ladener & Späte, 1999)

In der folgenden Abbildung sind die mittleren langjährigen Globalstrahlungssummen auf die horizontale Fläche weltweit ersichtlich. Abhängig vom Breitengrad ergeben sich auf der Erde Globalstrahlungssummen von 800 bis 2200 kWh/m²a. Die Jahreseinträge liegen wegen des steileren Einfallswinkels umso höher, je mehr man sich dem Äquator nähert. In Österreich werden im Durchschnitt ca. 950 bis 1200 kWh/m²a erreicht. (Streicher, 2009)

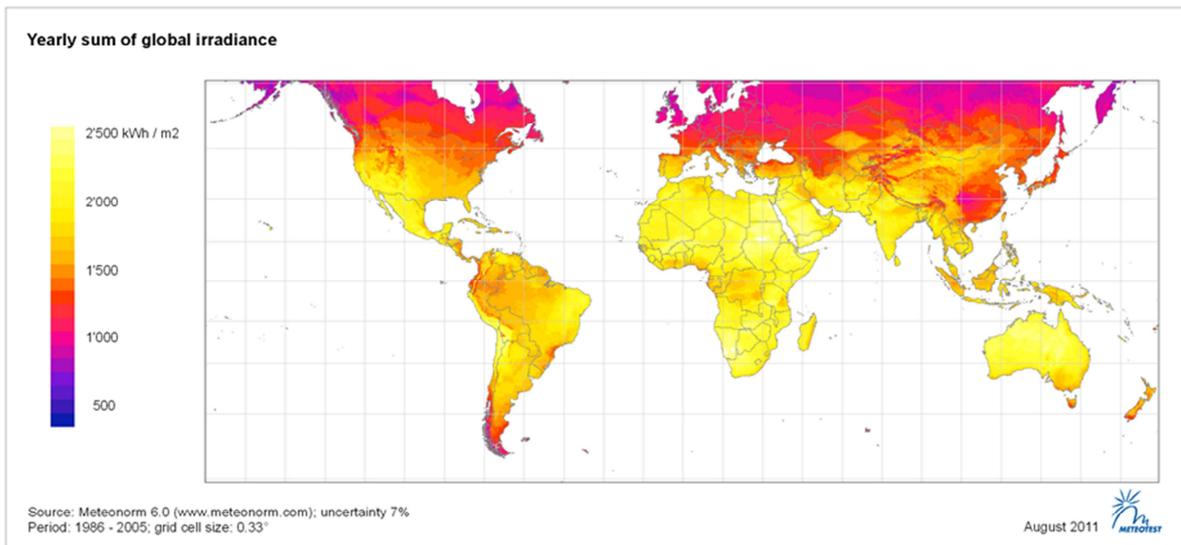


Abbildung 2-2: Jahressumme der Globalstrahlung auf die horizontale Fläche weltweit,
(<http://www.meteonorm.com/de/download/karten>; 15.06.2012)

2.2 Sonnenkollektoren

Am Solarthermiemarkt existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Kollektortypen, die beträchtliche Unterschiede im Aufbau und deren Wirkungsweise zeigen.

Grundsätzlich lassen sich Sonnenkollektoren nach Streicher (2009) einteilen in:

- nichtkonzentrierende Flüssigkeitskollektoren (Schwimmbadabsorber, Flachkollektoren und Vakuum-Röhrenkollektoren),
- nicht konzentrierende Luftkollektoren
- konzentrierende Kollektoren (z.B.: Hohlspiegel- oder Parabolspiegel)

Aufgrund ihres dominierenden Marktanteiles, wurden in der gegenständlichen Arbeit ausschließlich Flachkollektoren behandelt, auf die in den nächsten Punkten näher eingegangen wird.

2.2.1 Aufbau

In diesem Abschnitt wird ein Flachkollektor anhand seines Aufbaues beschrieben. Die Abbildung 2-3 stellt den typischen Kollektoraufbau dar.

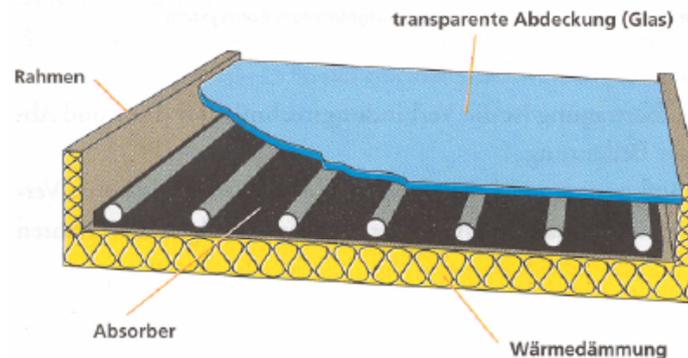


Abbildung 2-3: Grundsätzlicher Aufbau eines Flachkollektors (Brandstetter et al., 2004)

Der Flachkollektor besteht aus einer transparenten Abdeckung (spezielles Solarglas). Dieses Glas schützt den Absorber vor Witterungseinflüssen und verringert die Wärmeverluste. Die maßgebliche kurzwellige Strahlung wird beim Solarglas zu je rund 4 Prozent an der Außen- und Innenseite des Glases reflektiert, ein geringer Anteil wird absorbiert (rund 1 Prozent) und ca. 91 Prozent treffen dadurch auf den Absorber auf. Durch den Einsatz von Antireflexgläsern kann dieser Anteil bis auf etwa 95 Prozent erhöht werden. (Brandstetter et al., 2004)

Die von der Abdeckung hindurchgelassene kurzwellige Strahlung wird vom Absorber aufgenommen. Dieser absorbiert die Strahlung, wandelt diese in Wärme um und gibt sie über Wärmeleitung an das Absorberblech weiter. Durch den Einsatz von selektiven Beschichtungen die neben einem hohen Absorptionsgrad auch einen niedrigen Emissionsgrad aufweisen können die Abstrahlungsverluste reduziert werden. Am Absorberblech sind die Absorberrohre, etwa durch Lötverfahren oder Ultraschall- und Laserschweißverfahren, befestigt. Absorber können nach ihren Fertigungsmaterialien in Kupfer, Edelstahl, Aluminium oder Kunststoff unterteilt werden. Am häufigsten sind Varianten aus Kupfer und aus Kostengründen auch aus Aluminium anzutreffen. Kupfer ist leicht zu bearbeiten und ist durch seine sehr gute Wärmeleitfähigkeit optimal geeignet. Der Einsatz von Aluminium ist fertigungstechnisch schwieriger und birgt die Gefahr einer elektrolytischen Korrosion mit höherwertigen Materialien in sich. (Brandstetter et al., 2004)

Eine weitere Unterteilung von Absorbern ist nach Streicher (2009) anhand der Ausführung des Durchströmungskanals möglich. Hier ist zwischen Rohrabsorbern (in Serpentin- oder Streifenausführung), Roll-Bond-Absorbern sowie vollflächig durchströmten Absorbern zu unterscheiden. In der Abbildung 2-4 sind die zwei erstgenannten Ausführungen zu sehen.

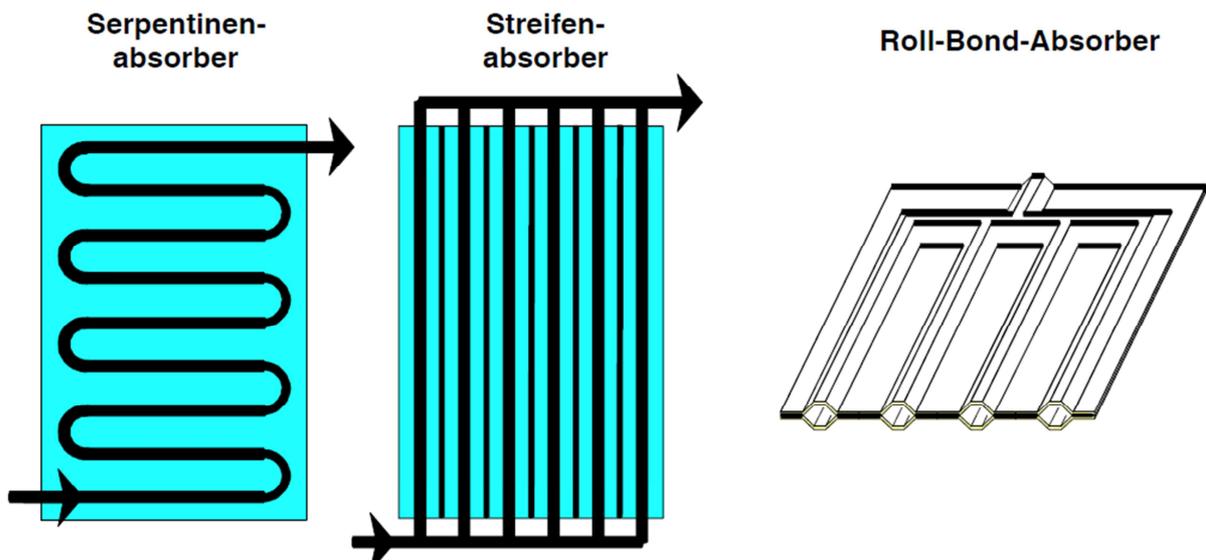


Abbildung 2-4: Ausführungsvarianten des Durchströmungskanals von Flachkollektoren (Streicher, 2009)

Flachkollektoren bestehen aus einem Rahmen, der dem Kollektor einerseits die mechanische Festigkeit bietet und andererseits die Aufgabe hat die Wärmeverluste während des Betriebes zu minimieren. Die Kollektorwanne wird meist aus Aluminium gefertigt und üblicherweise mit Mineralwolle, Steinwolle oder PU-Schäumen gedämmt.

2.2.2 Energiebilanz an einem Flachkollektor

Anhand des Aufbaues eines Flachkollektors wurden die wesentlichen Bauteile und ihre Aufgaben bereits erläutert. Mit Hilfe der Abbildung 2-5 werden nun die Energieflüsse in einem Flachkollektor näher betrachtet. Man erkennt sofort, dass nicht die gesamte, einfallende Energie zur Gänze ans Solarfluid abgegeben werden kann.

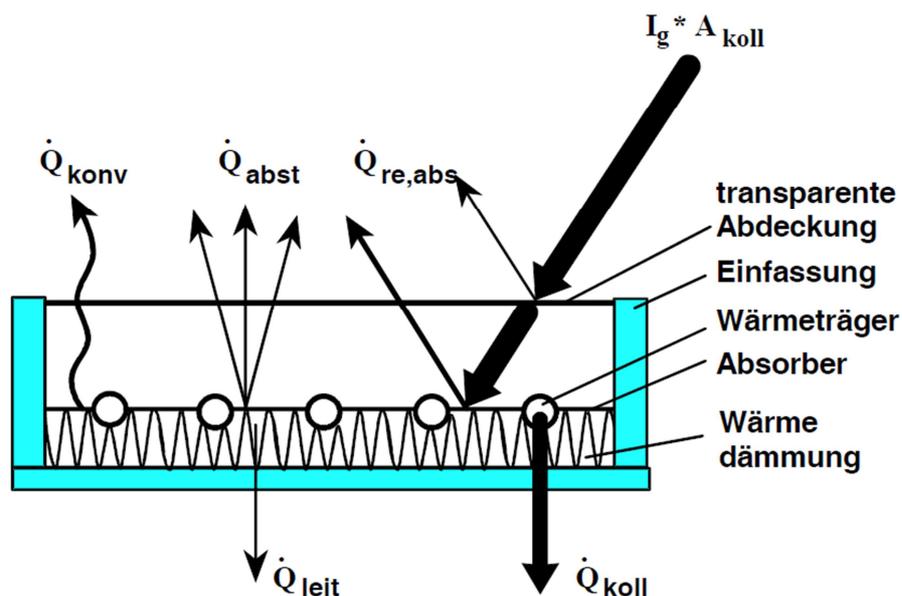


Abbildung 2-5: Energieflüsse an einem Flachkollektor (Streicher, 2009)

Ein geringer Teil der gesamt einfallenden solaren Strahlung auf den Kollektor ($I_g \cdot A_{Koll}$) wird bereits an der transparenten Frontscheibe sowie in zweiter Ebene am Absorber reflektiert und verlässt wieder den Kollektor. Gleichung 2-1 beschreibt wie sich die Reflexionsverluste zusammensetzen, (Fink & Brunner, 2012)

$$\dot{Q}_{re,abs} = I_g \cdot A_{Koll} \cdot (1 - \tau_{Abd} \cdot \alpha_{Abs} \cdot F') \quad (\text{Gl. 2-1})$$

$\dot{Q}_{re,abs}$ Reflexionsverluste der Glasscheibe und des Absorbers in [W]

α_{Abs} Absorptionskoeffizient des Absorbers für die Solarstrahlung

τ_{Abd} Transmissionskoeffizient der Kollektorabdeckung

A_{Koll} Absorberfläche des Kollektors in [m²]

I_g einfallende Globalstrahlung in [W/m²]

F' Kollektorwirkungsgradfaktor [-]

Der Transmissionskoeffizient beschreibt die durch die Glasscheibe dringende Strahlung. Hingegen bestimmt der Absorptionskoeffizient die Menge der absorbierten Strahlung am Absorber. Dieser kann durch den Einsatz von selektiven Beschichtungen Absorptionsgrade von über 90 Prozent aufweisen. Das Produkt aus Transmissions- und Absorptionskoeffizient wird effektiv vom Absorber aufgenommen. Ein Teil dieser absorbierten Energie wird wieder durch langwellige Wärmestrahlung an die Umgebung abgegeben.

Der Kollektorwirkungsgradfaktor F' beschreibt den nicht idealen Wärmeübergang vom Absorber auf das Wärmeträgerfluid. Der Wärmeübergang wird im Wesentlichen durch den Wärmefluss im Absorberblech, die Wärmeleitfähigkeit der Verbindungsstellen zwischen dem Absorberblech und dem Absorberrohr (Schweißnaht, Lötstellen) sowie durch den Wärmeübergang im Rohr bzw. Kanal (z.B.: Doppelstegplatte Kunststoffabsorber) an das Medium in Anhängigkeit der Strömungsform beeinflusst. (Fink & Brunner, 2012)

Die Höhe der Wärmeverluste durch Abstrahlung ist vom Emissionskoeffizienten ϵ , der Stefan-Boltzmann-Konstante σ und der vierten Potenz der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Absorber- und Himmelstemperatur abhängig (Gl. 2-2).

$$\dot{Q}_{abst} = A_{Koll} \cdot \epsilon_{Abs} \cdot \sigma \cdot (\bar{T}_{Abs}^4 - T_a^4) \quad (\text{Gl. 2-2})$$

\dot{Q}_{abst} langwellige Abstrahlung des Absorbers in [W]

- ε_{Abs} Emissionskoeffizient des Absorbers
- σ Stefan-Boltzmann-Konstante mit $5,68 \cdot 10^{-8}$ in $[W/(m^2K^4)]$
- \bar{T}_{Abs} mittlere Absorbtemperatur in $[^\circ C]$
- T_a Himmelstemperatur über dem Kollektor in $[^\circ C]$

Wie bereits im Aufbau erwähnt, trägt die Dämmung der Kollektorwanne ebenso zu einem insgesamt gesehen effektiv funktionierenden Kollektor bei. Die Wärmeverluste durch Konvektion und Wärmeleitung sollen so gering wie möglich sein. Diese Verluste werden durch einen gemeinsamen Wärmeverlustkoeffizienten beschrieben (Gl. 2-3).

$$\dot{Q}_{konv} + \dot{Q}_{leit} = A_{Koll} \cdot U_{Koll} \cdot (\bar{T}_{Abs} - T_{amb}) \quad (Gl. 2-3)$$

\dot{Q}_{konv} Wärmeverluste durch Konvektion in [W]

\dot{Q}_{leit} Wärmeverlust infolge Wärmeleitung in [W]

T_{amb} Außentemperatur über dem Kollektor in $[^\circ C]$

U_{Koll} mittlerer Wärmeverlustkoeffizient für Wärmeverluste durch Konvektion und Wärmeleitung in $[W/m^2K]$

Die Energiebilanz eines Flachkollektors kann nun unter Berücksichtigung der Gleichungen 2-1 bis 2-3 in folgende Gleichung zusammengefasst werden.

$$\dot{Q}_{Koll} = I_g \cdot A_{Koll} - \dot{Q}_{re,abs} - \dot{Q}_{abst} - \dot{Q}_{konv} - \dot{Q}_{leit} \quad (Gl. 2-4)$$

\dot{Q}_{Koll} Nutzleistung am Wärmeträger in [W]

2.2.3 Kollektorwirkungsgradkennlinie

Nach Definition der Nutzleistung eines Flachkollektors ist der Wirkungsgrad die wichtigste Kenngröße eines Kollektors. Dieser Wirkungsgrad beschreibt in der Solartechnik das Verhältnis von abtransportierter Wärmeenergie zu eingestrahelter Sonnenenergie. Die mathematische Beschreibung des Kollektorwirkungsgrades ist in Gleichung 2-5 formuliert.

$$\eta_{Koll} = \frac{\dot{Q}_{Koll}}{I_g \cdot A_{Koll}} = \tau_{Abd} \cdot \alpha_{Abs} \cdot F' - \frac{U_{Koll}}{I_g} \cdot (\bar{T}_{Abs} - T_{amb}) - \frac{\epsilon_{Abs} \cdot \sigma}{I_g} \cdot (\bar{T}_{Abs}^4 - T_a^4) \quad (GL. 2-5)$$

η_{Koll} Kollektorwirkungsgrad [-]

\bar{T}_{Abs} mittlere Absorbtemperatur in [°C]

In der Praxis hat sich diese mathematische Beschreibung nicht als praktikabel erwiesen. Das Strahlungsglied wird als quadratischer Wärmeverlustkoeffizient zusammengefasst, der die Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte berücksichtigt. Weiters wird an Stelle der mittleren Absorbtemperatur die sehr viel einfacher messbare mittlere Flüssigkeitstemperatur zwischen Ein- und Austritt aus dem Absorber bestimmt. (Gl. 2-6)

$$\bar{T}_{Abs,fl} = \frac{T_{Abs,ein} + T_{Abs,aus}}{2} \quad (Gl. 2-6)$$

$\bar{T}_{Abs,fl}$ mittlere Flüssigkeitstemperatur im Absorber in [K]

$T_{Abs,ein}$ Eintrittstemperatur des Absorbers in [K]

$T_{Abs,aus}$ Austrittstemperatur des Absorbers in [K]

Durch Zusammenfassung des Transmissions-, Absorptionskoeffizienten sowie des U-Wertes und des Emissionskoeffizienten zu Konstanten kann mit Einbeziehung der zuvor beschriebenen Gleichung 2-6 der Kollektorwirkungsgrades vereinfachend, wie in der Gleichung 2-7 dargestellt, beschrieben werden.

$$\eta_{Koll} = c_0 - c_1 \cdot \frac{(\bar{T}_{Abs,fl} - T_a)}{I_g} - c_2 \cdot \frac{(\bar{T}_{Abs,fl} - T_a)^2}{I_g} \quad (Gl. 2-7)$$

c_0 Konversionsfaktor des Kollektors [-]

c_1 Wärmeverlustkoeffizient des Kollektors in [W/m²K]

c_2 beschreibt die Krümmung der Kurve aufgrund des Anstiegs von Emission, Wärmeleitfähigkeit, Konvektion, etc. mit der Temperatur [W/m²K²]

Der Konversionsfaktor wird als optischer Wirkungsgrad bezeichnet. Bei einer Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung von Null Kelvin (keine Wärmeverluste) stellt dieser die maximal nutzbare Energiemenge dar, die der Kollektor erreichen kann.

Der Kollektorwirkungsgrad ist kein konstanter Wert, sondern wird wie in Gleichung 2-7 ersichtlich maßgeblich von der Einstrahlung, der Umgebungstemperatur und den Wärmeverlusten beeinflusst (siehe nachfolgende Abbildung 2-6).

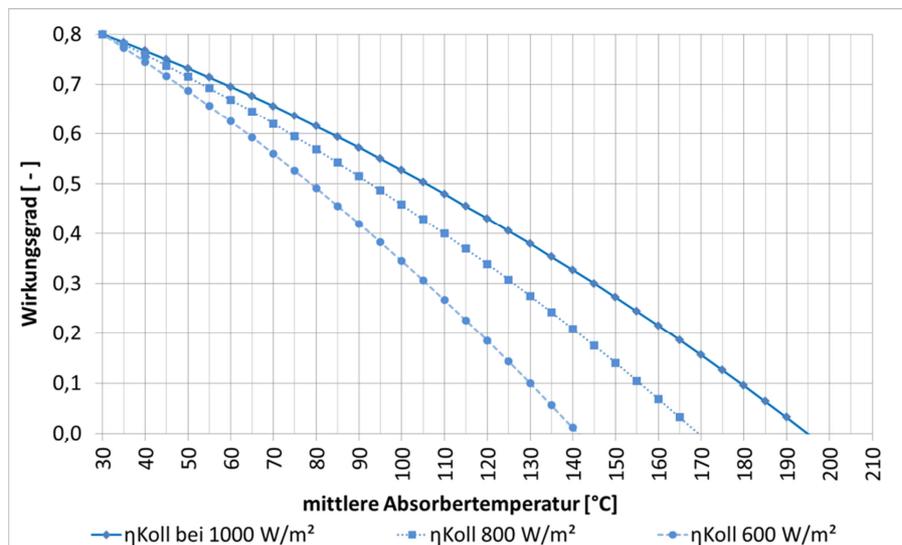


Abbildung 2-6: Wirkungsgradkennlinien eines Kollektors in Abhängigkeit von der Einstrahlungsstärke bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 30 °C

2.3 Solarthermische Anlagen

Im folgenden Abschnitt werden solarthermische Systeme anhand ihrer Hydrauliksysteme (Thermosiphon-Systeme, gepumpte Systeme) betrachtet. Weiters wird bei Zwangsumlaufsystemen auf die wesentlichen Komponenten von solarthermischen Systemen sowie auf die Betriebsvarianten (High-Flow, Low-Flow, Matched-Flow) im Kollektorkreis näher eingegangen.

2.3.1 Systeme nach dem Thermosiphon Prinzip

Solarthermische Systeme, die im Thermosiphonprinzip funktionieren, werden auch Naturumlaufsysteme genannt und finden ihren hauptsächlichen Einsatzraum in Südeuropa, Südamerika sowie im asiatischen und afrikanischen Raum (Weiss, Mauthner, 2011). Sie sind grundsätzlich unabhängig von elektrischer Hilfsenergie, da das Prinzip auf den Dichteunterschied von Flüssigkeiten bei unterschiedlichen Temperaturen beruht.

Thermosiphon Systeme können in zwei unterschiedliche hydraulische Konzepte eingeteilt werden. Es gibt das **Einkreis-Prinzip**, in dem es keine Trennung zwischen Solarkreis und Verbraucherkreis gibt, und somit reines Wasser als Wärmeträgermedium zum Einsatz kommt.

In der folgenden Abbildung 2-7 ist das Hydraulikschema eines Einkreisystems abgebildet.

Anlagenschema:

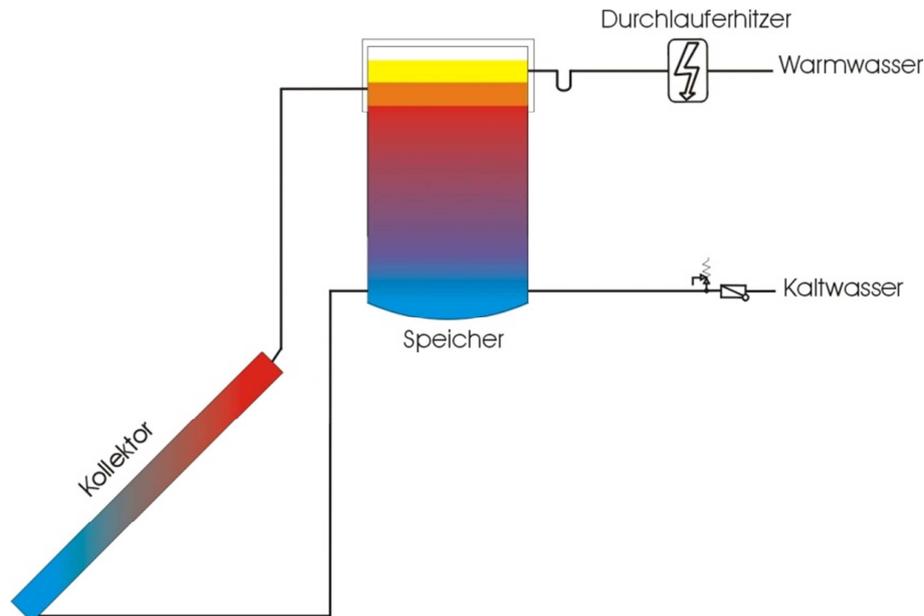


Abbildung 2-7: Hydraulikschema des Einkreis-Thermosiphon Warmwasser-Systems für ein Einfamilienhaus

Diese Systeme können unbedenklich nur in frostsicheren Gebieten eingesetzt werden. Weiters kann dieses System geschlossen also unter Druck aber auch drucklos betrieben werden. Im drucklosen System ist der Speicher als offener Behälter ausgeführt und benötigt daher kein Ausdehnungsgefäß und Sicherheitsventil. Um einen Naturkreislauf aufrecht zu erhalten, benötigt der Kollektor eine Neigung von rund 30°. Weiters müssen die Rohrleitungen ansteigend zum und fallend vom Speicher, der über dem Kollektor positioniert sein muss, verlegt werden. Das im Kollektor unter Einstrahlung erwärmte Wasser steigt durch die Temperaturdifferenz und daraus resultierenden Dichteunterschied nach oben in den Speicher. Gleichzeitig strömt kälteres Wasser aus dem Speicher in den Rücklauf des Kollektors nach und wird im Kollektor erwärmt. Der Kreislauf beginnt von vorne. Bei einer Warmwasser-Entnahme wird in den unteren Bereich des Speichers Kaltwasser nachgespeist. Die Nachheizung kann entweder in den Speicher integriert werden (z.B.: E-Patrone) oder wie in Abbildung 2-7 ersichtlich über einen nachgeschalteten, elektrisch betriebenen, Durchlauferhitzer erfolgen, oder auch gänzlich entfallen.

Das zweite hydraulische Konzept bei Thermosiphonsystem ist das **Zweikreis-Prinzip**.

In Zweikreisystemen werden Solarkreis und Verbraucherkreis hydraulisch getrennt. In der folgenden Abbildung 2-8 ist das Hydraulikschema eines Zweikreisystems abgebildet.

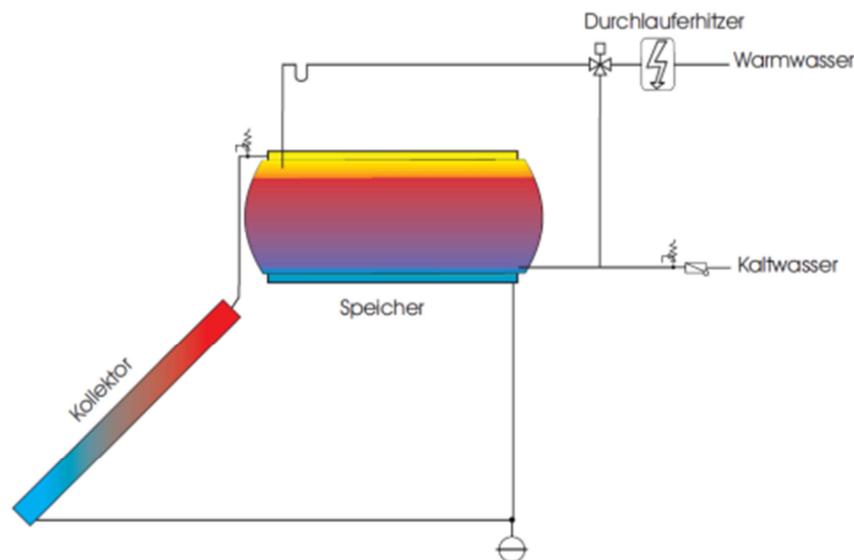
Anlagenschema:

Abbildung 2-8: Hydraulikschema des Zweikreis-Thermosiphon Warmwasser-Systems für ein Einfamilienhaus; Wurm, 2012)

Als Wärmeträgermedium wird meist ein Frostschutzgemisch, das im Kollector zirkuliert und die Wärme meist über einen Mantelwärmetauscher an das Brauchwasser abgibt, eingesetzt. Dadurch wird ein Einsatz in frostgefährdeten Gebieten ermöglicht. Dieses System benötigt im geschlossenen Solarkreislauf ein Ausdehnungsvolumen um die Wärmedehnung des Wärmeträgermediums aufnehmen zu können. Des Weiteren wird ein Sicherheitsventil in jedem hydraulischen Kreislauf benötigt. Der Brauchwasserraum im Speicher wird ebenso wie im zuvor beschriebenen Einkreis-Prinzip bei einer Zapfung im unteren Bereich mit Kaltwasser nachgespeist. Die Nachheizung kann bei unzureichender Einstrahlung wiederum über eine in den Speicher integrierte E-Patrone, oder über einen nachgeschalteten, elektrisch betriebenen, Durchlauferhitzer (Abbildung 2-8) erfolgen, beziehungsweise sie kann gänzlich entfallen.

Nach Brandstetter et al. (2004) weisen Thermosiphonsysteme folgende Vor- und Nachteile auf.

Generelle Vorteile von Thermosiphon-Systemen:

- keine elektrische Energie für die Zirkulation des Wärmeträgermediums von Nöten
- verhältnismäßig einfacher und kompakter Systemaufbau
- geringe Anschaffungskosten
- keine Wartungskosten

Generelle Nachteile von Thermosiphon-Systemen:

- Speicher muss oberhalb des Kollectors angebracht werden (Platzbedarf)
- Eine Dachintegration erfordert eine hohe statische Tragfähigkeit der Dachkonstruktion
- Thermisch träges System wodurch kurze Einstrahlung schlecht genutzt werden kann

2.3.2 Zwangsumlaufsysteme

Systeme mit Solarpumpe zur solarthermischen Warmwasserbereitung werden auch Zwangsumlaufsysteme genannt und sind vor allem in Mittel- und Nordeuropa sowie den Vereinigten Staaten, Kanada und Australien üblich (Weiss & Mauthner, 2011).

Die Zwangsumlaufsysteme haben im Gegensatz zu Thermosiphonsystemen eine Zirkulationspumpe in den Solarkreis integriert, die das Wärmeträgermedium umwälzt. In Abbildung 2-9 ist ein Hydraulikschema einer solarthermischen Warmwasserbereitungsanlage dargestellt, anhand dessen die einzelnen Komponenten erläutert werden.

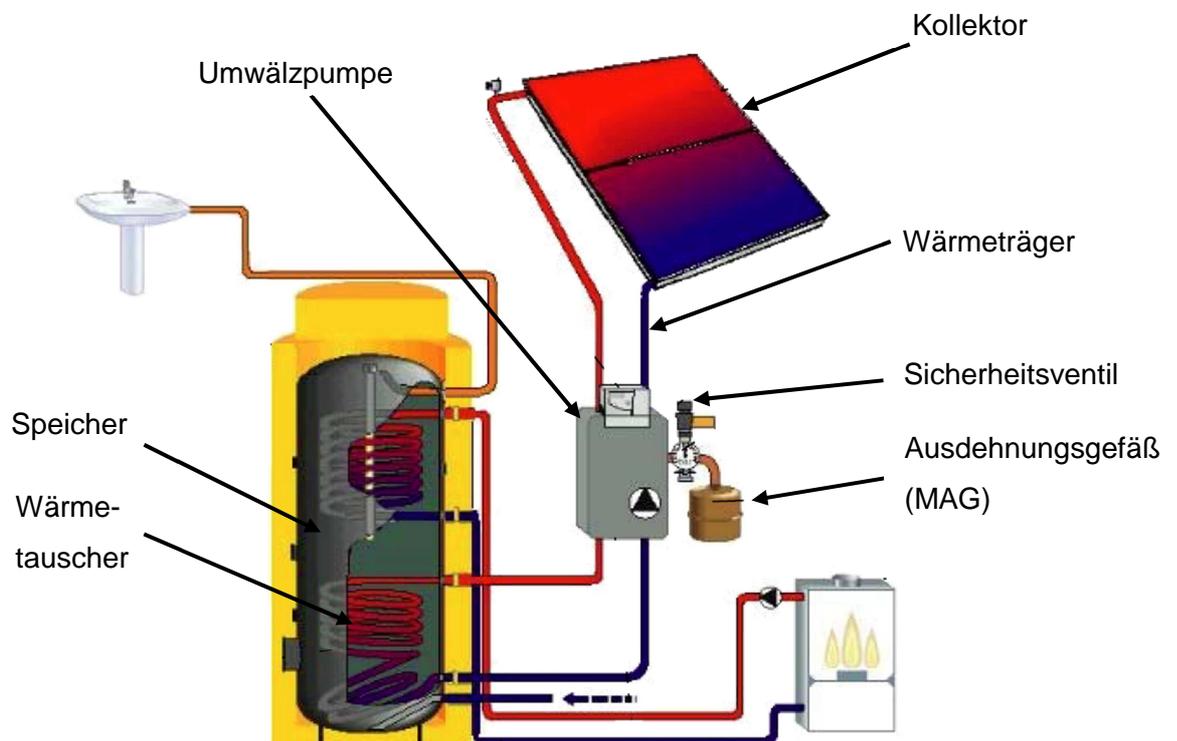


Abbildung 2-9: Hydraulikschema einer solarthermischen Warmwasserbereitungs-Anlage mit Umwälzpumpe; (in Anlehnung an Brandstetter et al., 2004)

Umwälzpumpe

Wie bereits erwähnt, ist in gepumpten solarthermischen Systemen eine Umwälzpumpe in den solaren Primärkreis integriert. Diese wird benötigt, da sich der Kollektor meist am höchsten Punkt der Anlage befindet und daher eine Zirkulation durch Dichteunterschied nicht mehr möglich ist. Abhängig vom geförderten Massenstrom der Umwälzpumpe können solarthermische Systeme grundsätzlich in die Betriebsarten „High-Flow“, „Low-Flow“ und „Matched-Flow“ unterteilt werden. (Brandstetter et al., 2004)

Die klassische Variante für die meist verbreitete Anwendung von solarthermischen Systemen für die Warmwasserbereitung stellt das „**High-Flow**“-Prinzip dar. Mit einem spezifischen

Massenstrom von 20 - 70 Kilogramm pro Stunde und pro Quadratmeter Kollektorfläche wird ein Temperaturanstieg durch die gesamte Kollektorfläche von rund 5 bis 20 Kelvin erreicht. Aufgrund dessen wird die Temperatur im Speicher mit jedem Kollektordurchlauf höher. Das Solarsystem benötigt daher längere Laufzeiten, um die Temperatur im Speicher auf Nutztemperatur zu heben. Eingesetzt werden High-Flow Systeme bis etwa 25 Quadratmeter Kollektorfläche.

Im Gegensatz zum klassischen System wird bei dem sogenannten „**Low-Flow**“-Prinzip mit einem spezifischen Massenstrom von 5 - 20 Kilogramm pro Stunde und pro Quadratmeter Kollektorfläche, die Nutztemperatur in einem Durchlauf durch die Kollektorfläche erreicht. Durch diese hohen Temperaturen sollte der Speicher temperaturorientiert beladen werden. Dieses System bietet nach Ladener und Späte (1999) & Streicher (2009) Vorteile sowie Nachteile, auf die in der nachfolgenden Aufzählung näher eingegangen wird.

Vorteile:

- ❖ Durch die geringeren Volumenströme werden geringere Pumpenleistungen benötigt.
- ❖ Kleinere Rohrquerschnitte und serielle Verschaltung wirken sich zu Gunsten der Anlagenkosten sowie der Wärmeverluste positiv aus.
- ❖ Rasches Erreichen der Nutztemperatur reduziert den Nachheizenergiebedarf erfordert jedoch eine geschichtete Speicherbeladung.

Nachteile:

- ❖ Höhere mittlere Absorberrtemperatures verringern den Wirkungsgrad des Kollektors
- ❖ Energiespeicher sollten temperaturorientiert beladen werden
- ❖ Optimale Anpassung aller Systemkomponenten untereinander notwendig

Das „**Matched-Flow**“-Prinzip beruht auf einer drehzahlgeregelten Solarpumpe wodurch die Anlage optimiert betrieben werden kann. Durch Regelung des Massenstroms wird ein konkreter zu erzielender Temperaturanstieg im Kollektor oder eine definierte Kollektorausstritttemperatur angestrebt. Bei reduzierter Einstrahlung kann der Massenstrom auf ein Minimum reduziert werden, wodurch im günstigsten Fall eine Aktivierung der Nachheizung vermieden werden kann. (Brandstetter et al., 2004) Kosteneinsparungen können dadurch nicht erzielt werden, da die Komponenten (Rohrleitungen usw.) auf den maximalen Durchfluss ausgelegt werden müssen. (Ladener & Späte, 1999)

Kollektor

Das Herzstück des Primärkreislaufes bildet der bereits in Kapitel 2.2 beschriebene Kollektor.

Ausdehnungsgefäß

Ein wichtiges Element bildet das Membranausdehnungsgefäß (MAG). Dieses wird in jedem geschlossenen, mit Flüssigkeit gefüllten System benötigt, da sich Flüssigkeiten bei Temperaturzunahme ausdehnen beziehungsweise bei Temperaturabnahme zusammenziehen. Bei der Dimensionierung ist nicht nur die Flüssigkeitsdehnung zu berücksichtigen, sondern auch die Volumsänderung durch Dampfbildung (Stagnation) im Kollektor. Das Ausdehnungsgefäß muss in der Lage sein, die aus dem Kollektor und aus den Rohrleitungen verdrängte Flüssigkeit (Dampfvolumen) aufzunehmen, um den Druckanstieg so gering wie möglich zu halten.

Sicherheitsventil

Nach der ÖN EN 12828 muss in einer Solaranlage ein Sicherheitsventil vorhanden sein. Dieses bildet eine Absicherung gegen den Druckanstieg im Primär-Solarkreislauf, falls es zu einer Störung (z.B.: defektes MAG) kommen sollte. Der Ansprechdruck liegt üblicherweise zwischen 3 und 6 bar. Steigt der Druck im System auf den Ansprechdruck, entweicht das anstehende Wärmeträgermedium über eine Abblase-Leitung, wodurch sich der Druck reduziert. (Brandstetter et al., 2004)

Wärmeträgermedium

Der Wärmeträger (z.B.: Wasser-Propylenglykol Gemisch) transportiert die aufgenommene Wärme vom Absorber an den Wärmetauscher. Nach Streicher (2009), ist ein Wärmeträger spezifiziert durch seine spez. Wärmekapazität c_p [kJ/kg,K], Dichte ρ [kg/m³], Zähigkeit η [Pa·s], Wärmeleitfähigkeit λ in [W/m,K], sowie durch die Temperatur des Gefrierpunktes. Weiters sollte der Wärmeträger möglichst günstig in der Anschaffung und Entsorgung sein, lebensmittelecht, langzeitbeständig (größer 10 Jahre), temperaturbeständig (größer 130 °C), unbrennbar, sowie korrosionshemmende Wirkung auf Bauteile haben.

Wärmetauscher

In frostgefährdeten Gebieten kommt als Wärmeträger meist ein Wasser-Frostschutzgemisch im primären Solarkreislauf zum Einsatz. Um die Energie zwischen zwei Medien zu übertragen, ohne dass diese untereinander in Verbindung kommen sollen, wird daher ein Wärmetauscher benötigt. Die Wärmeübertragung an der Sekundärseite des Wärmetauschers kann entweder durch schwerkraftbedingte freie Konvektion (z.B.: innenliegender Rohrwärmetauscher) oder durch erzwungene Konvektion (z.B.: externer Plattenwärmetauscher) erfolgen. Plattenwärmetauscher weisen gegenüber Rohrwärmetauschern einen deutlich größeren Wärmeübergangskoeffizienten auf und sind wesentlich kompakter, jedoch wird eine zusätzliche Pumpe auf der Sekundärseite benötigt.

Speicher

Ein wesentliches Element einer solarthermischen Anlage ist der Speicher. Dieser soll das Energieangebot der Sonne und die daraus solar erzeugte Wärme über einen gewissen Zeitraum speichern.

In dieser Arbeit kommen solarthermische Systeme entweder mit einem Brauchwasserspeicher (Trinkwasserspeicher) oder mit einem Pufferspeicher zum Einsatz, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

Brauchwasserspeicher sind in der Regel mit Trinkwasser gefüllt. Die Entnahme von Brauchwasser erfolgt direkt aus dem Speicher. Durch den ständigen Eintrag von frischem Sauerstoff durch das nachfließende Trinkwasser, muss der Speicher vor Korrosion geschützt werden. Aus diesem Grund kommen teurere Edelstahlspeicher oder Stahlspeicher mit einer Emailbeschichtung (mit Magnesium oder Fremdstromanode) beziehungsweise einer Kunststoffbeschichtung zum Einsatz. Im Einfamilienhaussektor kommen meist Trinkwasserspeicher mit einem Fassungsvermögen von rund 300 bis 500 Liter zum Einsatz. Wobei rund eine Badewannenfüllung (Bereitschaftsvolumen) für die Nachheizung und das Restvolumen für die Solaranlage zu Verfügung stehen sollte. Das Bereitschaftsvolumen kann durch eine Nachheizung auf Nutztemperatur gehalten werden. Dies geschieht entweder mit einem konventionellen Wärmeerzeuger über einen Wärmetauscher oder mit einer direkt in den Speicher integrierten E-Patrone. Die Speichertemperatur sollte auf etwa 60 °C begrenzt werden, da bei höheren Temperaturen Kalk ausfällt. (Brandstetter et al., 2004)

Pufferspeicher sind mit Heizungswasser (aufbereitetem Wasser) gefüllt, welches den Anforderungen der ÖNORM H 5195-1 (Verhütung von Schäden durch Korrosion und Steinbildung in geschlossenen Warmwasser-Heizungsanlagen mit Betriebstemperaturen bis 100 °C) entsprechen soll. Das aufbereitete Wasser kann bis zu knapp unter die Siedetemperatur erwärmt werden, wodurch mehr Energie im Speicher untergebracht werden kann. Zudem sind Pufferspeicher meist aus Stahl gefertigt, da sie keinen Korrosionsschutz benötigen. Sie sind dadurch billiger als Trinkwasserspeicher. Die Brauchwassererwärmung aus dem Pufferspeicher wird in dieser Arbeit über ein Frischwassermodul vollzogen. Dabei wird das Heizungswasser aus dem Speicher über einen externen Wärmetauscher geführt. Auf der Sekundärseite (Frischwasser) wird mittels drehzahl geregelter Pumpe der Massenstrom variiert, wodurch die Zapftemperatur in Abhängigkeit von der Zapfmenge geregelt wird. (Brandstetter et al., 2004)

2.4 Betriebszustände

Im folgenden Abschnitt werden solarthermische Systeme mit Zwangsumlauf anhand der Betriebszustände näher erläutert. Bei Zwangsumlaufsystem kann es aufgrund von Stagnation zu einer Dampfbildung innerhalb der Anlage kommen, was bei einem Thermosiphonsystem ausgeschlossen ist.

Grundsätzlich kann man bei gepumpten Systemen zwei Unterscheidungen in Normal- sowie Stillstands-Betrieb treffen.

2.4.1 Normalbetrieb

Um die Sonneneinstrahlung für die Deckung des Wärmebedarfs nutzen zu können muss das Wärmeträgermedium seine zuvor über den Kollektor aufgenommene Energie an den Speicher abgeben. Der Wärmetransport geschieht mittels einer Umwälzpumpe. Diese läuft wenn die Temperatur der Wärmequelle (Kollektor) über der Temperatur der Wärmesenke (Speicher) liegt. Die Pumpe ist solange aktiv wie der Speicher Energie aufnehmen kann an, und die solare Einstrahlung auf den Kollektor in ausreichender Form zur Verfügung steht.

Im Normalbetrieb treten im Kollektor Temperaturen bis etwa 120 °C auf. Die im Normalbetrieb auftretende Wärmedehnung wird vom Ausdehnungsgefäß kompensiert. Daher liegt der Druck im Ausdehnungsgefäß im Normalbetrieb in etwa um den jeweils eingestellten Fülldruck.

2.4.2 Stillstand

Der Stillstandszustand kann durch mehrere Ursachen eingeleitet werden:

- Natürlicher Stillstand, in dem die Kollektortemperatur unter der Speichertemperatur liegt (Nacht, Schlechtwetter)
- Stillstand durch Defekt der Umwälzpumpe oder Stromausfall
- Stillstand durch Erreichen der Maximaltemperatur im Speicher oder Kollektor

Tritt der Stillstand unter Einstrahlung auf, spricht man von Stagnation. Aufgrund der überschüssigen Energie, die vom Kollektor nicht über die Rohrleitungen als Nutzenergie abgeführt wird, steigt die Temperatur des Kollektors bis sich ein Gleichgewicht aus eingestrahelter Energie und Eigenverlusten des Kollektors einstellt. Die dabei auftretenden Temperaturen können deutlich über jenen im Normalbetrieb liegen.

Nach den bisherigen Untersuchungen zur Thematik Stagnationsverhalten von solarthermischen Systemen kann man diese in fünf unterschiedliche Phasen einteilen. Auf diese wird nachfolgend näher eingegangen. (Hausner et al., 2003)

- Phase 1 - Ausdehnung des Wärmeträgermediums
- Phase 2 - Verdrängung der Flüssigkeit aus dem Kollektor durch erste Dampfbildung

- Phase 3 - Leersieden des Kollektors - Sattdampf
- Phase 4 - Leersieden des Kollektors - Sattdampf und überhitzter Dampf
- Phase 5 - Wiederbefüllen des Kollektors

Um auf die einzelnen Phasen der Stagnation näher eingehen zu können, wird zuvor das Entleerungsverhalten von Kollektoren näher beschrieben. Dieses Entleerungsverhalten beeinflusst gravierend die Intensität und Dauer der einzelnen Stagnationsphasen und ist im Wesentlichen von der internen Absorberverschaltung abhängig. Die Bildung von Flüssigkeitssäcken im Kollektor sollte möglichst vermieden werden. Im Idealfall drückt eine entstehende Dampfblase die Flüssigkeit vollständig aus dem Kollektor. Ein „gut entleerender“ Kollektor weist zumindest einen Sammelrohranschluss an der Unterkante des Kollektors auf. In Abbildung 2-10 ist der prinzipielle Vergleich des Entleerungsverhaltens eines „schlecht“ und eines „gut“ entleerenden Kollektors zu sehen.

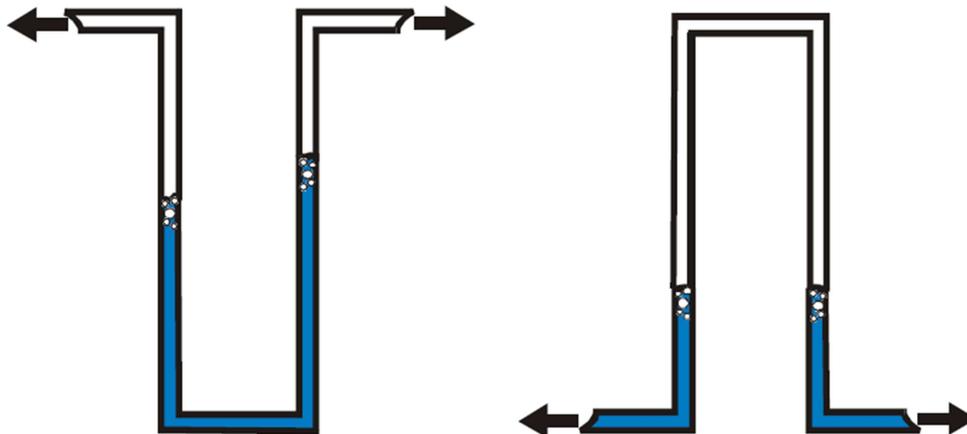


Abbildung 2-10: Bildung von Restflüssigkeit im Kollektor bei schlechtem (links) und gutem (rechts) Entleerungsverhalten; (Hausner, Fink, 2001)

Ebenso wie für Einzelkollektoren gilt dies auch für die Verschaltung innerhalb eines Kollektorfeldes. Die Abbildung 2-11 zeigt Verschaltungsvarianten mit gutem (B und C) und schlechtem (A) Entleerungsverhalten wobei durch ein Hinzufügen eines weiteren Kollektors in Variante B sich das Verhalten drastisch ändern würde. Einzig in Variante C würde es zu keinen zusätzlichen Flüssigkeitssäcken kommen.

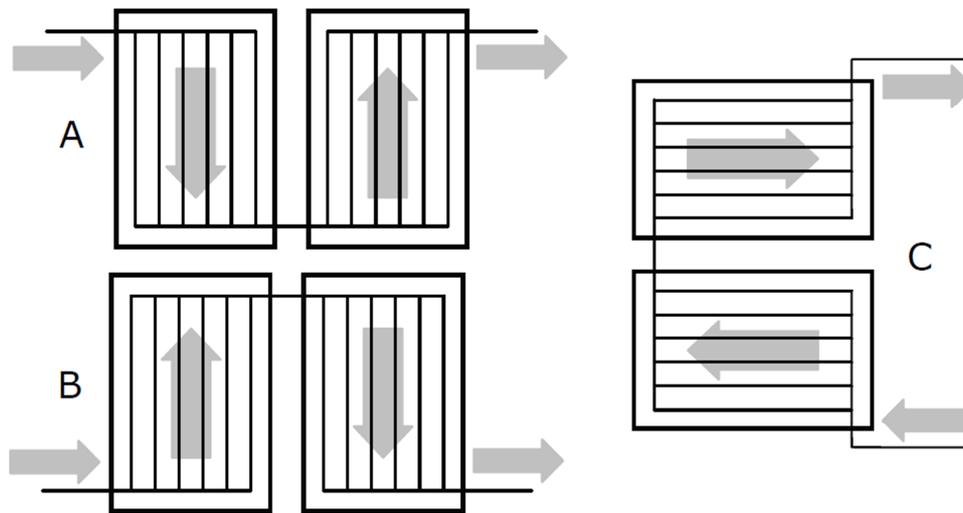


Abbildung 2-11: Kollektor-Verschaltungen mit „schlechtem“ (A) und „gutem“ (B und C) Entleerungsverhalten (Scheure, 2008)

Die folgende Abbildung 2-12 zeigt schematisch den Systemdruck am Ausdehnungsgefäß von unterschiedlich gut entleerenden Kollektoren in den fünf Phasen der Stagnation.

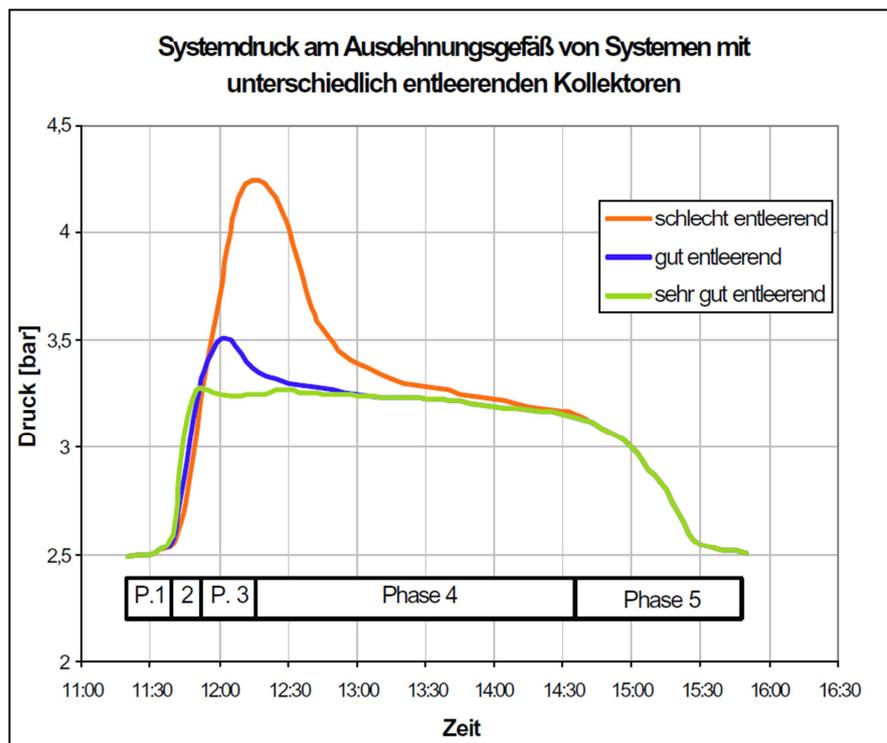


Abbildung 2-12: Schematische Darstellung des Systemdrucks am Ausdehnungsgefäß von unterschiedlich gut entleerenden Kollektoren. (Hausner et al., 2003)

Die Stagnationsphasen 1 bis 5 werden am Beispiel des schlecht entleerenden Kollektors beschrieben.

Phase 1 – Ausdehnung des Wärmeträgermediums

Wie bereits erwähnt tritt eine Volums-Änderung des Wärmeträgermediums bereits im Normalbetrieb ein. Auf Grund eines Stillstandes der Solarpumpe steigen die Temperaturen bis Ende der Phase 1 im Kollektor rasch an. Der Druck erfährt nur im geringen Maße eine Steigerung. (Hausner & Fink, 2001)

Phase 2 - Verdrängung der Flüssigkeit aus dem Kollektor durch erste Dampfbildung

Überschreitet die Mediums-Temperatur die Siedetemperatur bei gegebenem Druck, kommt es zu ersten Dampfbildungen. Das Volumen des Mediums nimmt dabei rasch zu, wodurch eine große Menge Flüssigkeit in das Ausdehnungsgefäß gelangt und einen sehr raschen Druckanstieg mit sich führt. Die Siedetemperatur im mit Sattdampf gefüllten Bereich steigt an und damit auch die Temperatur im Kollektor. Die Temperaturbelastungen in Rück- sowie Vorlaufleitung erreichen wegen ihrer Abkühlverluste bis in den Technikraum nicht die hohen Temperaturen wie im Kollektor. Sind diese Leitungen kurz und zudem noch gut gedämmt, oder ist durch ein schlechtes Entleerungsverhalten die Dampfreichweite groß, so kann es bereits zu unzulässig hohen Temperaturen an Systemkomponenten wie beispielsweise dem Ausdehnungsgefäß kommen. (Hausner & Fink, 2001)

Phase 3 - Leersieden des Kollektors – Sattdampf

In Absorber- sowie Sammelrohren sind nach Ende der zweiten Phase noch immer geringe Flüssigkeitsansammlungen festzustellen, die nach und nach verdampfen. Die Flüssigkeiten in den Rohrleitungen werden durch das entstehende Dampfvolument nach unten in Richtung Technikraum verdrängt. Bei richtiger Anordnung der Rückschlagklappe wird das flüssige Wärmeträgermedium aus der Vor- und Rücklaufleitung gleichzeitig verdrängt. Dies kann soweit führen, dass Ausdehnungsgefäße und Wärmetauscher vom Dampf erreicht werden. Die tatsächliche Dampf-Reichweite ist von der Dampfleistung des Kollektors entsprechend seines Entleerungsverhaltens und den Wärmeverlusten jener unter Dampf stehenden Elemente (Kollektor, Rohrleitungen, Wärmetauscher) abhängig. Am Ende der Phase 3 erreichen dabei Dampfvolument und Druck ihr Maximum und der Kollektor beginnt auszutrocknen. (Hausner & Fink, 2001)

Ein effektives Ausdrücken der Flüssigkeit in dieser Phase ist durch den internen Aufbau des Absorbers und von der Verschaltung bzw. Verrohrung abhängig. Dadurch kann eine drastische Reduzierung der Dauer und des Ausmaßes der kritischen Stagnationsphase 3 bewirkt werden.

Phase 4 - Leersieden des Kollektors - Sattdampf und überhitzter Dampf

Nachdem der Maximaldruck erreicht wird, verringert sich die Menge des noch in flüssiger Form vorliegenden Mediums immer weiter, bis dieses vollständig verdampft ist. Dadurch werden Temperaturen über der Siedetemperatur erreicht. Durch die Überhitzung sinkt der Kollektorwirkungsgrad und die Dampfreichweite nimmt wieder ab. Dabei sinkt der Anlagendruck und die Flüssigkeit wird aus dem Ausdehnungsgefäß rücklaufseitig wieder in Richtung Unterkante des Kollektors gedrückt. Vorlaufseitig wird dies durch die Rückschlagklappe verhindert, jedoch füllt sich diese leicht zeitverzögert durch Kondensat aus dem Kollektor. Der sich einstellende Zustand mit überhitztem Dampf im Kollektor und Sattdampf in der Nähe der unteren Anschlüsse kann einige Stunden andauern bis ein Ende durch sinkende Sonneneinstrahlung hervorgerufen wird. (Hausner & Fink, 2001)

In dieser Phase kommt es zudem zu hohen thermischen Belastungen des im Kollektor verbliebenen Solarfluids. Dies kann zu Aufkonzentration (fraktionierte Destillation) führen, was bei häufigem Auftreten zur Degradation des Wärmeträgers führen kann. (Hausner et al., 2003)

Phase 5 - Wiederbefüllen des Kollektors

Der Kollektor wird langsam über die Rücklaufleitung wieder befüllt und die Temperaturen sinken rasch ab. Der Druck fällt dabei annähernd wieder auf sein Ausgangsniveau.

2.5 Kennzahlen solarthermischer Systeme

Solarer Deckungsgrad

Eine der wichtigsten und gebräuchlichsten Kennzahlen zur Beurteilung eines solarthermischen Systems ist der solare Deckungsgrad. Dieser beschreibt den solaren Anteil an der Energiebereitstellung einer beliebigen Anwendung. Wie die Abbildung 2-13 darstellt, kann der solare Deckungsgrad anhand der betrachteten Systemgrenzen unterschiedlich definiert werden.

In dieser Arbeit wird auf die Definition des Speicherinput-orientierten solaren Deckungsgrades zurückgegriffen. Dieser wird anhand der nachfolgenden Gleichung 2-8 (Vela Solaris, 2012) berechnet.

$$SF_i = \frac{\text{Solarenergie an Speicher}}{\text{Solarenergie an Speicher} + \text{Zusatzenergie an Speicher}} \quad (\text{Gl. 2-8})$$

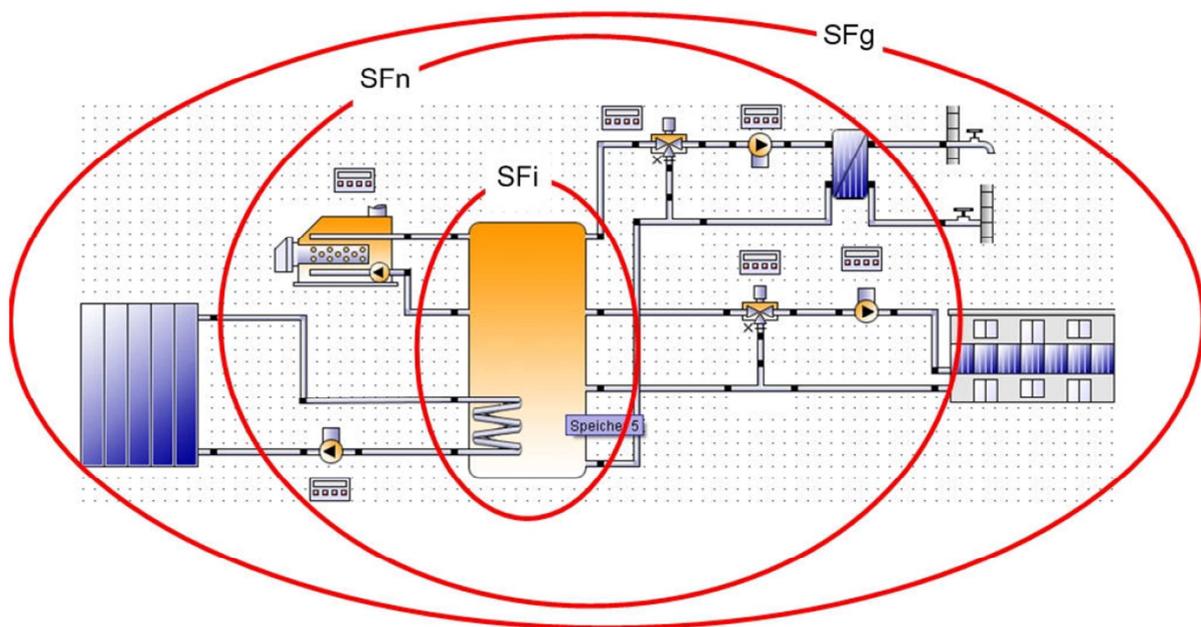


Abbildung 2-13: Unterscheidung bei solaren Deckungsgraden; (Vela Solaris, 2012)

Eine weitere Möglichkeit wäre es den solaren Deckungsgrad, wie er auch im Simulationsprogramm SHW_2012 ermittelt wird, wie folgt zu definieren.

$$SF' = \frac{\text{Nutzenergieverbrauch} - \text{Zusatzenergie}}{\text{Nutzenergieverbrauch}} \quad (\text{Gl. 2-9})$$

Bei der Deckungsgraddefinition nach Gleichung 2-9 werden alle auftretenden Systemverluste (Speicher, Rohrleitungen usw.) der Solaranlage zugeschrieben. Diese Betrachtungsweise ist somit die ungünstigste für Solaranlagen.

Auslastung

Die Auslastung beschreibt, mit welchem Verbrauch (kWh) ein Quadratmeter Kollektorfläche ein Quadratmeter im Jahr beaufschlagt wird. Hohe Auslastungen bedeuten geringe solare Deckungsgrade. (Brandstetter et al., 2004)

$$Auslastung_{ges.Wärmebed.} = \frac{\text{ges. Wärmebed. Brauchwarmw. und Raumwärme}}{\text{Bruttokollektorfläche}} \quad (\text{Gl. 2-10})$$

Spezifischer Solarertrag

Neben dem solaren Deckungsgrad zählt auch der spezifische Solarertrag zu den wesentlichen Kennzahlen. Beim spezifischen Solarertrag (SE) handelt es sich um die an den Speicher pro Jahr abgegebene Energiemenge bezogen auf Quadratmeter Kollektorfläche (üblicherweise Bruttokollektorfläche).

Der spezifische Solarertrag ergibt sich aus folgender Gleichung 2-11.

$$SE = \frac{\text{Solarenergie an Speicher}}{\text{Bruttokollektorfläche}} \quad (\text{Gl. 2-11})$$

Der spezifische Ertrag zeigt ein gegenläufiges Verhalten zum solaren Deckungsgrad. Dies bedeutet, dass sich bei sinkender Auslastung ein höherer solarer Deckungsgrad und ein niedriger spezifischer Solarertrag einstellt und umgekehrt. So liegen beispielsweise spezifische Solarerträge für Anwendungen zur Trinkwassererwärmung mit herkömmlichen Flachkollektoren bei üblichen Deckungsgraden zwischen 50 und 75 Prozent bei 450 bis 3000 kWh pro Quadratmeter und Jahr.

3 Polymerwerkstoffe

Bereits zum heutigen Zeitpunkt sind schon zahlreiche mittlerweile am Markt etablierte Einzelanwendungen (Dichtungen, Absorberschläuche, Mantelwärmetauscher für Thermosiphonanlagen, usw.) sowie Vollkunststoffkollektoren aus Polymerwerkstoffen in solarthermischen Systemen verfügbar. Eine umfangreiche Erhebung wurde dazu von einer internationalen Expertengruppe „IEA Task 39: Polymeric Materials for Solar Thermal Applications“ im Rahmen des Solar Heating and Cooling Programmes der International Energy Agency (IEA SHC) durchgeführt. Für eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus dieser Erhebung sei hier auf die Arbeit von Nadja Wurm (2012) verwiesen. In den folgenden Abschnitten werden Polymerwerkstoffe spezifiziert und zwei bereits verfügbare Vollkunststoffkollektoren beschrieben.

3.1 Polymerwerkstoffe in solarthermischen Anwendungen

Die folgende Abbildung 3-1 zeigt eine gebräuchliche Einteilung von Polymerwerkstoffen. Hierbei wird anhand ihrer Langzeittemperaturbeständigkeit zwischen Standard-Polymeren (<100 °C), Technischen-Polymeren (<150 °C) und Hochleistungs-Polymeren (>150 °C) unterschieden. Polymere sind somit nicht per se preisgünstiger. Mit steigenden Anforderungen an die Temperaturbelastbarkeit muss man Werkstoffe aus höheren Bereichen der Pyramide wählen. Jährlich werden weltweit rund 270 Millionen Tonnen von Standard-Polymeren produziert, für die bereits eine Vielzahl von unterschiedlichen Verarbeitungsmethoden entwickelt wurden. Bei Kunststoffen, die für herkömmliche Flachkollektoren im Bereich des Absorbers Verwendung finden, liegen die Preise pro Kilogramm Polymere oftmals weit über jenen der metallischen Konkurrenz. Bezieht man diesen Vergleich auf das Volumen so liegen Hochleistungspolymere preislich bei Kupfer und technische Polymere bei Aluminium. Jedoch wird aufgrund der geringeren Festigkeit von Kunststoffen eine Substitution der Volumina nicht ausreichen. Vorteile bieten die Verarbeitungsmethoden, die durch geschicktes Design den Materialbedarf auf ein Minimum reduzieren können. (Brunold, 2010)

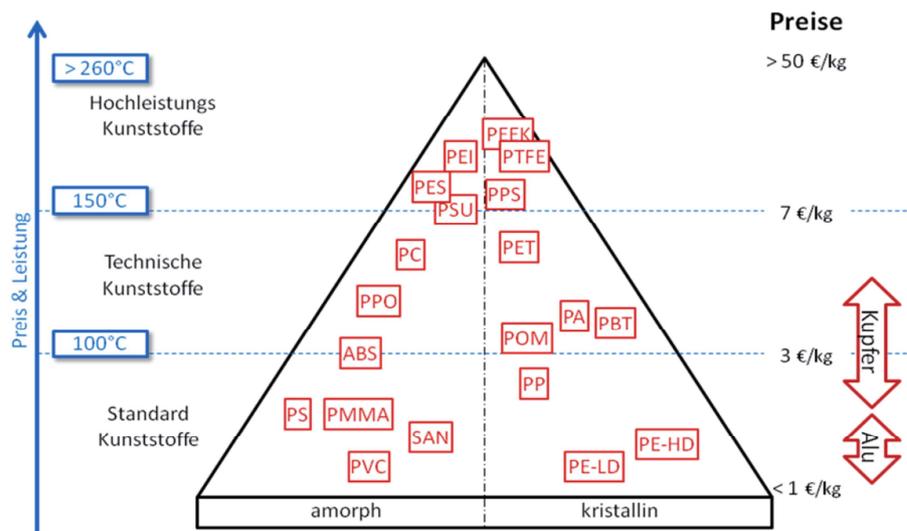


Abbildung 3-1: Polymer-Pyramide mit Einsatztemperaturen und Preisvergleich zu Metallen
(Brunold, 2010)

Für die transparente Abdeckung des Kollektors würde sich PMMA aufgrund seiner Witterungsbeständigkeit und seines hohen solaren Transmissionsgrades am besten eignen. Das nachfolgende Produkt von Magen ECO-Energy setzt PC (Polycarbonat) ein, welches thermisch stabiler, jedoch erst durch Zusätze witterungsbeständig wird.

Für den Absorber verwendet der norwegische Hersteller Aventa beispielsweise den Polymerwerkstoff Polyphenylensulfid (PPS). Dieses Hochleistungspolymer ist in seinen Materialkosten teuer, benötigt aber durch seine sehr hohe Temperaturbeständigkeit (bis über 150 °C) keinen konstruktiven Überhitzungsschutz.

3.2 Aktuell verfügbare Vollkunststoffkollektoren

Aus bisherigen Erkenntnissen sind zwei Vollkunststoffkollektoren am Markt verfügbar, auf die in den nächsten Abschnitten näher eingegangen wird.

3.2.1 ECO-Flare

Magen Eco-Energy ist ein Israelischer Entwickler und Produzent von Vollkunststoff-Kollektoren, der sich auf ökologische und ökonomische Lösungen für solarthermische Systeme spezialisiert hat. Die Abbildung 3-2 zeigt einen Schichtaufbau aus der Kollektorbaureihe zur Warmwasserbereitung (ECO-Flare PRO).

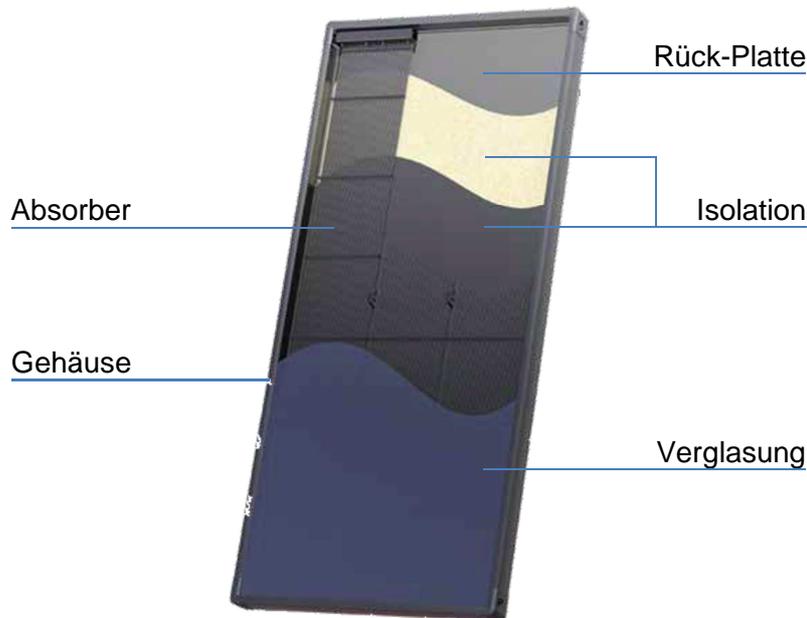


Abbildung 3-2: Aufbau des ECO-Flare Kollektors (in Anlehnung an <http://www.magen-ecoenergy.com>; 09.09.2012)

Die Abdeckung besteht aus einer Stegplatte aus Polycarbonat (PC) mit einer UV-beständigen Schicht. Darunter befindet sich ein Rohrregisterabsorber aus Polypropylen (PP), der die Strahlungsenergie aufnimmt und in speziell designte Sammler leitet. Laut Herstellerangaben kann dieser eine Volumenänderung durch gefrierendes Wasser mit einer Temperatur bis -10 °C aufnehmen. Die Rückwandisolation bildet ein Polyurethan Schaum mit einer darunterliegenden Aluminiumfolie mit Polyesterbeschichtung. Der Absorber ist in einem auf Kunststoff basierenden Rahmen eingebettet, der das Gesamtgewicht des Kollektors gering hält. Durch ein Schnellverbindungs-System und das geringe Gewicht wird die Installation am Dach erleichtert. (<http://www.magen-ecoenergy.com>; 09.09.2012)

Die Eckdaten des Kollektors können aus der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Eckdaten ECO-Flare Kollektor (<http://www.magen-ecoenergy.com>; 09.09.2012)

Daten ECO-Flare	Wert	Einheit
Bruttofläche	2,15	[m ²]
Absorberfläche	1,85	[m ²]
Länge	215	[cm]
Breite	100	[cm]
Höhe	9	[cm]
Gewicht (ungefüllt)	15	[kg]
Flüssigkeitsinhalt	6	[l]
Betriebsdruck	5	[bar]
Prüfdruck	10	[bar]

Der Kollektor wird bei einem Druck von 10 bar getestet. Der empfohlene Betriebsdruck ist von der Betriebstemperatur abhängig und wird mit 5 bar angegeben. Daraus lässt sich anhand der von Magen Eco-Energy veröffentlichten Tabelle 2 erkennen, dass die angestrebten Betriebstemperaturen bei rund 70 °C liegen.

Tabelle 2: Mechanische Beständigkeit in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur (<http://www.magen-ecoenergy.com>; 09.09.2012)

Mechanical stability					
Water temperature	°C	20	40	60	80
	°F	68	104	140	176
Maximum recommended operating pressure	bar	16	10	6	4
	psi	232	145	87	58

Um diese Temperaturen nicht zu überschreiten wurde ein spezielles Überhitzungsschutzsystem entwickelt und patentiert. Dieses nützt die Wärmedehnung des Absorbers bei zunehmender Temperatur aus, um mechanisch Belüftungsklappen zu öffnen. Durch die Öffnungen im unteren Bereich strömt kühlere Luft in den Kollektor ein, erwärmt sich durch Konvektion, strömt aus den darüber liegenden Öffnungen aus und gibt die aufgenommene Energie an die Umgebung ab. Dadurch kann die Temperatur des Absorbers begrenzt und vor unzulässig hohen thermischen Belastungen geschützt werden. Dieses Prinzip wird in dieser Arbeit durch das Rückkühlprinzip (beschrieben in Kapitel 6) abgebildet.

In Abbildung 3-3 ist eine Detailansicht des Aufbaues aus der Patentanmeldung ersichtlich. Das Verteilerrohr ist am oberen Ende fixiert und bei Temperaturänderung des Absorbers dehnt sich der Absorber aus beziehungsweise zieht sich zusammen. Dadurch die Wärmedehnung des Absorbers öffnet die an dessen Ende angebrachte Sammelleitung [16] die Belüftungsklappen [24] mechanisch. Die Ein- und Auslass-Mechanismen [20] sind miteinander durch ein Gestänge [30] verbunden, wodurch eine Durchlüftung des Kollektors ermöglicht wird.

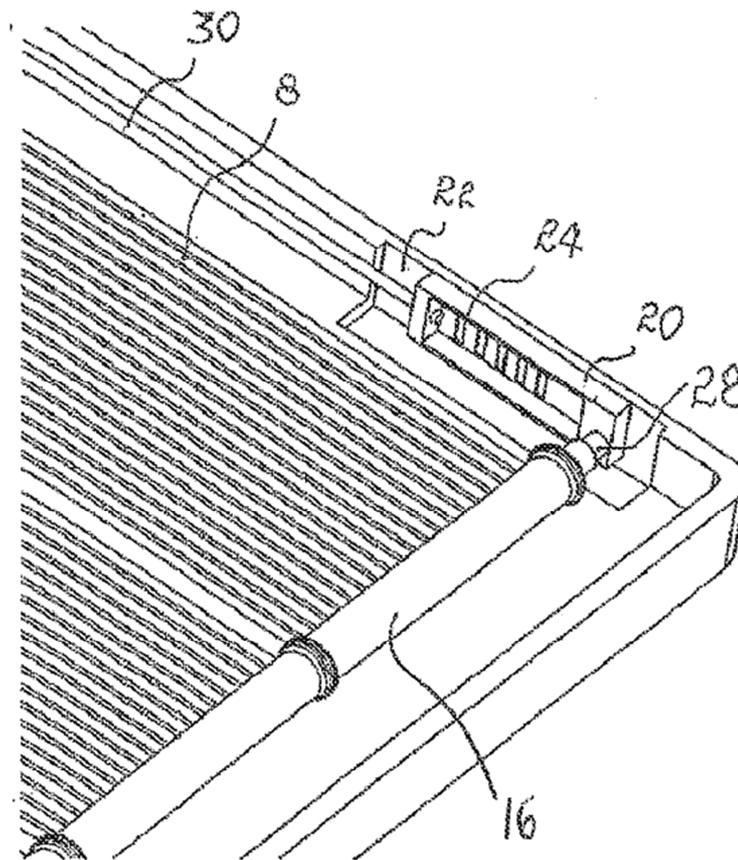


Abbildung 3-3: Detailansicht des mechanischen Mechanismus für die Durchlüftung
 (<http://www.google.com/patents/US20100132764>; Zugriff: 10.09.2012)

3.2.2 Aventa

Aventa Solar hat vor einigen Jahren in Norwegen ein Produkt entwickelt, welches sich bereits am norwegischen Markt etabliert hat und hier näher beschrieben wird. Es handelt sich dabei um einen Vollkunststoffkollektor, der Recherchen zufolge bereits mehrfach installiert wurde und sich bewährt hat. Dessen Aufbau, Eigenschaften sowie Kennlinie dient in weiterer Folge als Referenz für die Berechnung von solarthermischen Systemen in Kunststoffausführung. Seine Kennlinie dient sowohl den gepumpten Kunststoffsysteme, als auch den Thermosiphonsystemen in Kunststoffausführung als Basis. In der folgenden Tabelle werden die Eckdaten des für die Simulation eingesetzten Kunststoffkollektors in Anlehnung an den Aventa Kollektor zusammengefasst.

Tabelle 3: Eckdaten des für die Simulation verwendeten Kunststoffkollektors

Daten Aventa Kunststoff-Kollektor		
Bruttofläche	5,6	[m ²]
Absorberfläche	4,82	[m ²]
Volumen	19,5	[l]
Anzahl Absorberrohre	50	[-]
Rohrinnendurchmesser	6,2	[mm]
Einzelrohrlänge	2,2	[m]
Konversionsfaktor	0,73	[-]
Wärmeverlustkoeffizient	3,5	[W/m ² K]
quadratisches Glied	0,02	[W/m ² K ²]
Dynamische Wärmekapazität	20	[kJ/K]

Die folgende Abbildung zeigt ein Schnittbild des betreffenden Kunststoffkollektors.



Abbildung 3-4: Aufbau des Kunststoffkollektors von Aventa Solar; (<http://www.aventa.frifugl.net>; Zugriff: 24.09.2012)

Die Abdeckung besteht aus einer Doppelstegplatte aus Polycarbonat (PC), die mit einer UV resistenten Schutzschicht versehen ist. Beim Durchtritt solarer Strahlung durch eine transparente Abdeckung kommt es zu Reflexionen an beiden Oberflächen und zu Mehrfachreflexionen innerhalb der Abdeckung, was zu einer Intensitätsabschwächung der durchtretenden Strahlung und zu einer Temperaturerhöhung der Abdeckung führt. Der Transmissionsgrad von rund 77 Prozent, liegt unter jenem eines herkömmlichen Flachkollektors mit einem eisenarmen Solarglas von rund 90 bis 91 Prozent.

Das Absorbermaterial besteht im Gegensatz zum Referenzkollektor nicht aus Kupfer, sondern aus dem Polymerwerkstoff Polyphenylensulfid (PPS). Der Absorber ist als Doppelstegplatte ausgeführt und wird in einem Arbeitsschritt durch Extrusion gefertigt. Die Doppelstegplatte weist eine Wandstärke von 2 mm auf und besitzt eine spezifische Wärmekapazität von rund 1000 [J/kgK]. Durch den Aufbau des Absorbers ergibt sich eine vollflächige Durchströmung einzig getrennt durch die Stege, die die Kanäle definieren. Durch die vollflächige Durchströmung der Absorberkanäle kann trotz der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Polymermaterials im Vergleich zu metallischen Werkstoffen ein sehr guter Kollektorwirkungsgradfaktor (F') erreicht werden. Der spezifische Flüssigkeitsinhalt des Absorbers beträgt etwa $4 \text{ l/m}^2_{\text{Koll}}$.

In der Abbildung 3-5 ist sowohl die Kennlinie eines selektiv beschichteten Flachkollektors als auch die des Kunststoffkollektors, der in dieser Arbeit Verwendung findet, bei einer Einstrahlung von 1000 W/m^2 und einer Umgebungstemperatur von $30 \text{ }^\circ\text{C}$ dargestellt. Durch die Doppelstegplatte des Kunststoffkollektors mit ihrem geringen Transmissionsgrad ergeben sich höhere optische Verluste im Vergleich zu einem Kollektor mit einem Solarglas. Weiters ist ersichtlich, dass durch die fehlende selektive Beschichtung des Kunststoffkollektors die Kennlinie steiler nach unten wegfällt, wodurch sich im Vergleich etwa um 35 bis $40 \text{ }^\circ\text{C}$ geringere Stillstandstemperaturen ergeben.

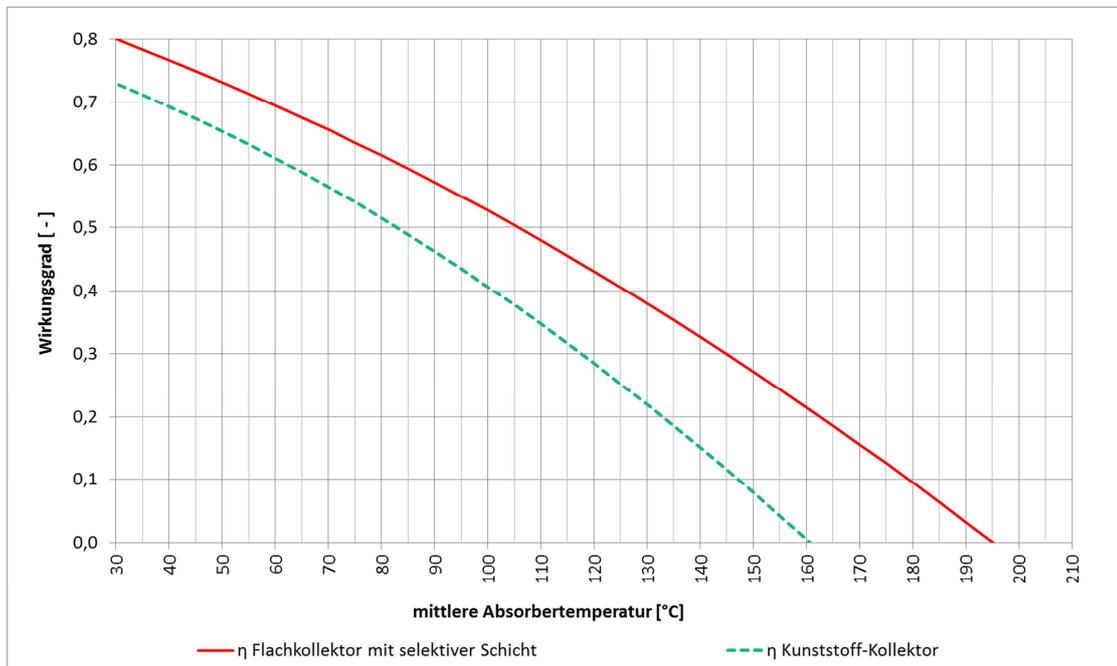


Abbildung 3-5: Kennlinien eines Flachkollektors mit selektiver Schicht sowie des Kunststoff-Kollektors der Firma Aventa bei 1000 W/m^2 Einstrahlung und $30 \text{ }^\circ\text{C}$ Umgebungstemperatur

4 Referenzsysteme

Im Projekt „Solpol“ sollen die Belastungen auf solarthermische Systeme, die aufgrund von Einstrahlung, Außenlufttemperatur, Feuchte an unterschiedlichen Standorten sowie unterschiedliche Systemkonfigurationen weltweit auftreten, möglichst breit abgedeckt werden. Anhand von Kriterien wie den vorhandenen Solarthermie-Markt wurden für die Klimazonen Mitteleuropa (kontinental), Südeuropa (mediterran), Afrika (heiß, trocken), Südamerika (heiß, feucht) und China (gemäßigt), repräsentative Standorte ausgewählt.

4.1 Auswahl der Referenzstandorte

Zu den genannten Klimazonen wurden fünf Standorte definiert, auf die sich die weiteren Betrachtungen konzentriert haben.

- Mitteleuropa: Graz (Österreich)
- Südeuropa: Athen (Griechenland)
- Afrika: Pretoria (Südafrika)
- Südamerika: Fortaleza (Brasilien)
- China: Peking (China)

4.2 Klimadaten an den Referenzstandorten

An jedem Standort liegen aufgrund der geographischen Lage auf der Erde unterschiedliche Rahmenbedingungen für die Nutzung von Sonnenenergie vor. Die Globalstrahlung und die Lufttemperatur beeinflussen neben anderen Faktoren die Konzeptionierung und Dimensionierung von solarthermischen Anlagen.

Mit Hilfe des folgenden Diagrammes werden diese fünf Standorte anhand ihrer kumulierten Globalstrahlung einerseits auf die Horizontale sowie auf die geneigte Kollektorfläche verglichen. Die höchsten Einstrahlungswerte im Jahresmittel werden erzielt, wenn die Kollektorflächen Richtung Süden (auf der Nordhalbkugel) beziehungsweise gegen Norden (auf der Südhalbkugel) ausgerichtet werden. Der optimale Neigungswinkel entspricht hierbei dem Breitengrad des jeweiligen Standortes.

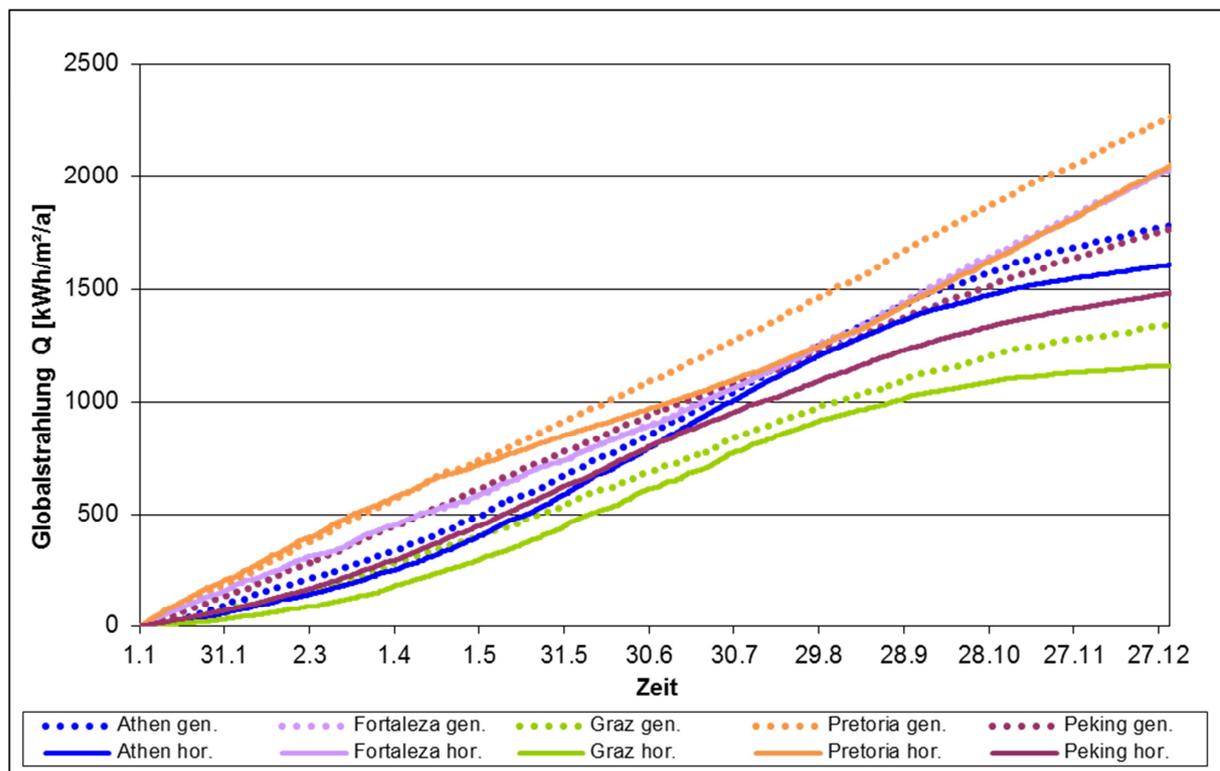


Abbildung 4-1: Globalstrahlung auf die horizontale und geneigte Fläche (in Anlehnung an Wurm 2012)

Man erkennt, dass der Standort Pretoria die höchsten Einstrahlungswerte von rund 2000 kWh/m²/a gemessen auf die horizontale Ebene erzielt. Dabei ist für diesen Standort eine Steigerung um mehr als 10 Prozent durch die Neigung um 25,8° (Breitengrad) der Kollektorfläche im Vergleich zur Horizontalen möglich. Typisch für Fortaleza sind die nahezu deckungsgleichen Resultate zwischen den Einstrahlungswerten auf die Horizontale und auf die geneigte Fläche zu erkennen. Dies ist auf die geringe Abweichung des geographischen Breitengrads von 3° zum Äquator zurückzuführen. Athen und Peking befinden sich im Mittelfeld und Graz weist in diesem Vergleich mit rund 1100 kWh/m²/a auf die Horizontale sowie mit rund 1250 kWh/m²/a auf die Geneigte Fläche die geringsten Einstrahlungswerte auf.

Das folgende Whisker-Box-Plot-Diagramm zeigt die Temperaturverteilung der Außenluft sowie die Himmelstemperatur an den verschiedenen Standorten. Die Maximal- und Minimalwerte werden durch die Balken begrenzt. In den grauen Kästchen befinden sich 50 Prozent der Messwerte und der Median wird durch ein Kreuz in der Mitte dargestellt. (Wurm, 2012)

Bei der Himmelstemperatur handelt es sich um die Temperatur der Wolken und anderer atmosphärischer Elemente des Himmels. Die Himmelstemperatur entspricht der effektiven Temperatur eines schwarzen Strahlers, der die gleiche Leistung wie der Himmel abstrahlt. Diese liegt typischerweise ca. 10 bis 20 Kelvin unter der Umgebungs-Temperatur. (Eicker, 2012)

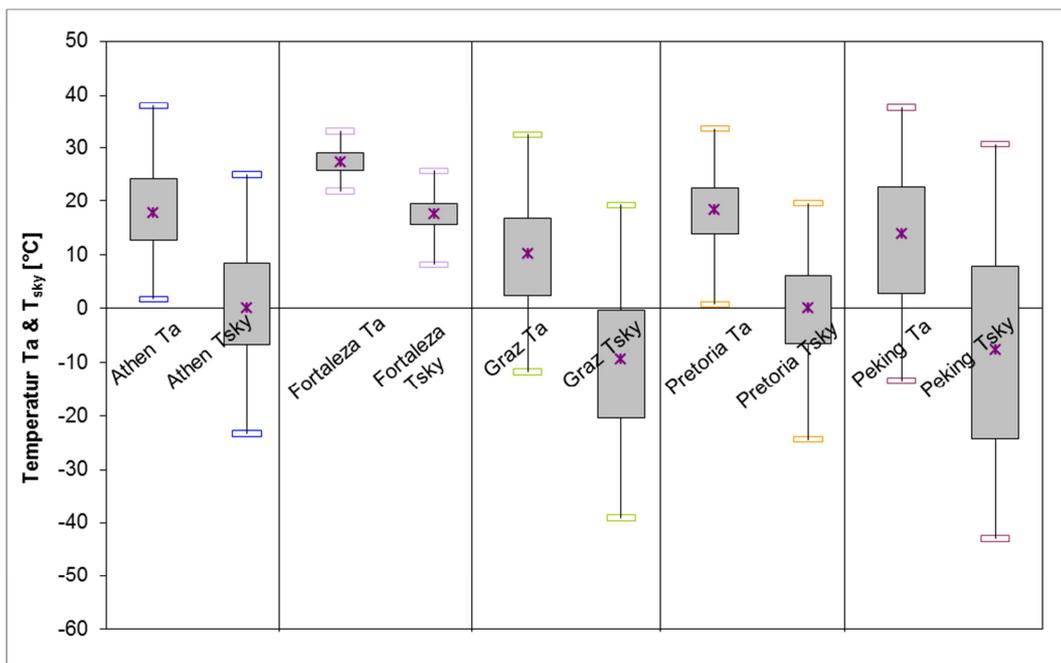


Abbildung 4-2: Luft- und Himmelstemperatur an den Referenzstandorten; (in Anlehnung an Wurm, 2012)

Vergleicht man die einmalig auftretenden Maximaltemperaturen der verschiedenen Standorte, so befinden sich diese in einem relativ geringen Band zwischen 30 und 40 °C. Größere Schwankungen sind insbesondere bei den einmalig auftretenden Minimaltemperaturen zu erkennen. An den Standorten Graz und Peking treten Temperaturen weit unter 0 °C auf. In den restlichen drei Standorten befinden sich Lufttemperaturen über 0 °C.

Zusätzlich ist in der Abbildung 4-2 die Himmelstemperatur dargestellt. Niedrige Himmelstemperaturen können beispielsweise ein Einfrieren des Wärmeträgermediums bewirken, obwohl die Lufttemperatur über dessen Gefrierpunkt liegt. Demzufolge kann nur am Standort Fortaleza in Solarsystemen reines Wasser ohne Frostschutzzusätze als Wärmeträgermedium verwendet werden (eine Ausnahme bilden Drain-Back-Systeme).

4.3 Marktrecherche an den Referenzstandorten

Um standortübliche Anwendungen für solarthermische Systeme an den Referenzstandorten zu definieren, wurde eine Gruppe von Experten mit entsprechenden Marktkenntnissen im jeweiligen Land befragt und eine Marktrecherche durchgeführt.

Die Abbildung 4-3 zeigt die Verteilung von verglasten Flach- (FPC) und Vakuumröhrenkollektoren (ETC) in unterschiedlichen Regionen und im weltweiten Überblick. Die rot umrandeten Regionen beinhalten die zuvor definierten Referenzstandorte. Im Balken Sub-Saharan Africa ist neben der Referenzregion Südafrika, noch Namibia und Zimbabwe enthalten. In Central / South America sind neben Brasilien auch noch Barbados, Chile, Mexico sowie Uruguay integriert.

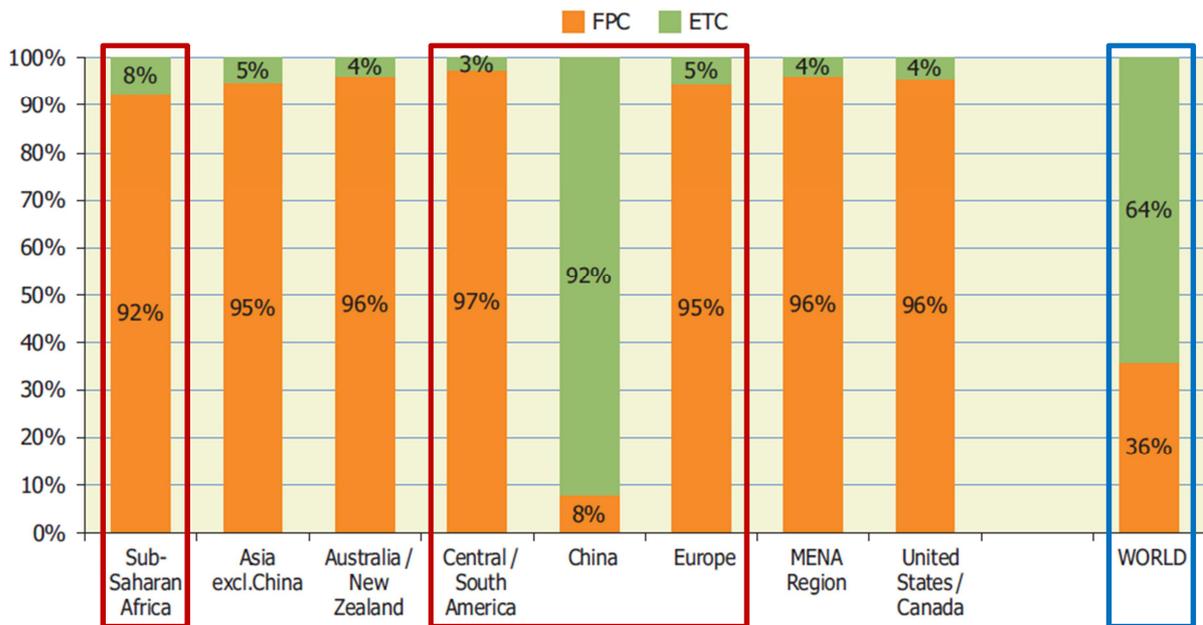


Abbildung 4-3: Verteilung von Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren weltweit Ende 2010 (in Anlehnung an Weiss & Mauthner, 2012)

Die einzelnen Regionen sind – bis auf China – klar von Flachkollektoren dominiert. China weist einen Anteil von rund 60 Prozent an weltweit installierter Kollektorfläche auf und beeinflusst den weltweiten Überhang an ETC. Für Flachkollektoren auf Kunststoffbasis bedeutet dies, dass dennoch ein weltweites Potential von rund 89 Millionen Quadratmeter Kollektorfläche zur Verfügung steht, sollten alle im Jahr 2010 betriebenen herkömmlichen Flachkollektoren durch Kollektoren auf Kunststoffbasis substituiert werden.

Weltweit werden rund drei Viertel aller solarthermischen Anlagen als Thermosiphonsysteme ausgeführt. Ähnlich wie in der vorigen Abbildung beeinflusst auch hier wieder der chinesische Markt die weltweite Verteilung.

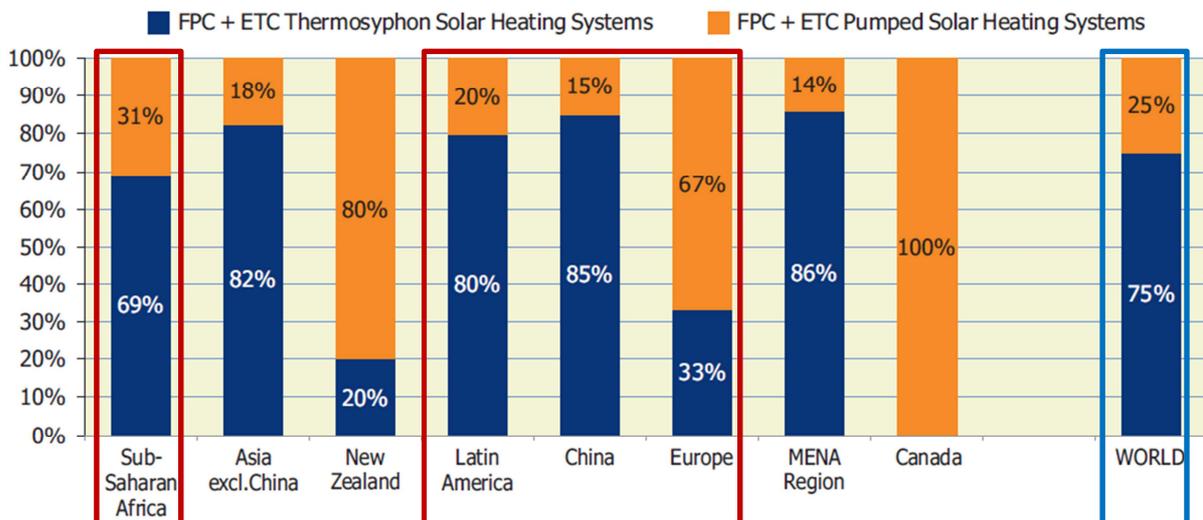


Abbildung 4-4: Marktverteilung zwischen Thermosiphon und gepumpten Systemen in unterschiedlichen Regionen der Welt Ende 2010 (in Anlehnung an Weiss & Mauthner, 2012)

Die Abbildung 4-5 stellt einen Vergleich über die Anwendungsgebiete (Warmwasserbereitung EFH, Warmwasserbereitung MFH, Solare Heizungsunterstützung, andere) der Top 10 Nationen dar. Die rot umrandeten Länder spiegeln wiederum die Referenzstandorte wieder. Da Süd Afrika in dieser Darstellung nicht integriert ist, wurden Experten mit der entsprechenden Marktkenntnis befragt.

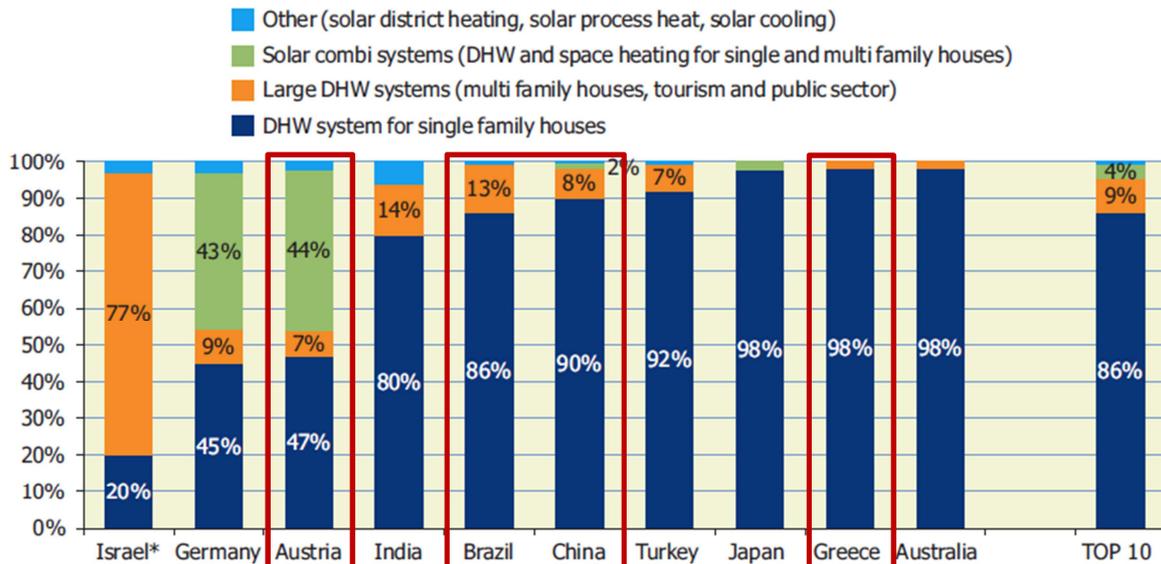


Abbildung 4-5: Verteilung der insgesamt installierten Kollektorfläche auf unterschiedliche Anwendungen in den Top 10 Ländern Ende 2010 (in Anlehnung an Weiss & Mauthner, 2012)

Die Abbildung zeigt, dass in allen Referenzländern solarthermische Anlagen zur Warmwasserbereitung im Ein- und Mehrfamilienhaussektor Anwendung finden. In Österreich werden gemäß dieser Darstellung etwa 44 Prozent der Ende 2010 installierten Kollektorflächen für die teilsolare Raumheizung genutzt. Im Zuge dieser Arbeit wurden neben Kombisystemen für den Standort Graz (Österreich) auch noch Kombisysteme für die Referenzstandorte Peking (China) und Athen (Griechenland) definiert.

4.4 Anwendungsgebiete im Überblick

Die nachfolgende Tabelle 4 spiegelt die Ergebnisse aus der Marktrecherche und den Expertenbefragungen wider und gibt einen Überblick der standortüblichen Systeme auf welche in weiterer Folge näher eingegangen wird. Weiters wird in der Tabelle auf die Hydraulikschemen der jeweiligen Systeme verwiesen. Diese sind zusammenfassend unter der Tabelle 4 abgebildet.

Tabelle 4: Überblick Referenzsystem

Standort	Referenzschemen					
	WW-EFH, gepumpt	WW-EFH, Schwerkraft, Ein-Kreis	WW-EFH, Schwerkraft, Zwei-Kreis	Kombi-EFH, gepumpt	WW-MFH, gepumpt, Puffersp.	WW-MFH, gepumpt, Trinkwassersp.
Mitteleuropa	A.3			A.4	A.5	
Südeuropa			A.2	A.4		A.6
Afrika			A.2			A.6
Brasilien		A.1				A.6
China			A.2	A.4		A.6

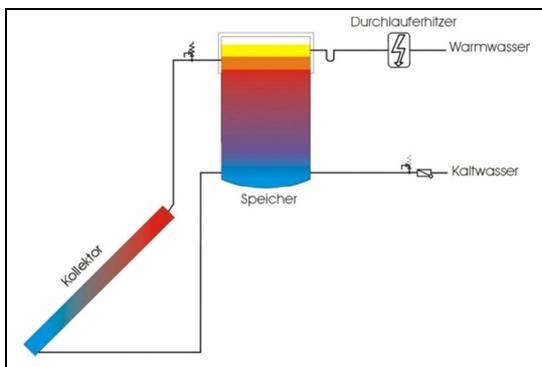


Abbildung 4-6: Anlagenschema A.1

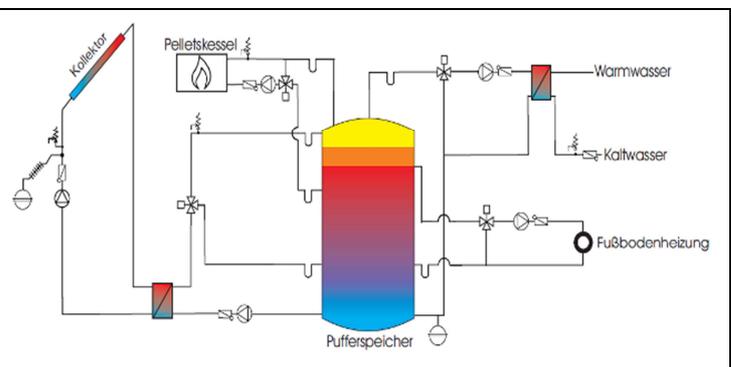


Abbildung 4-7: Anlagenschema A.4

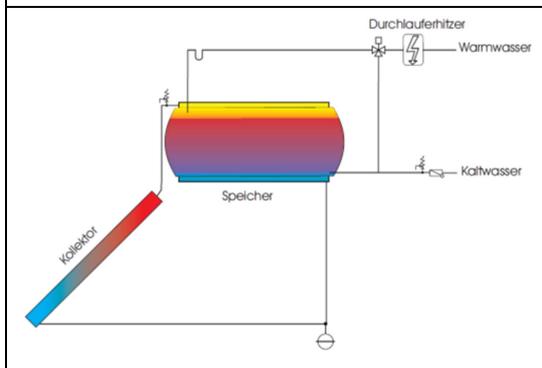


Abbildung 4-8: Anlagenschema A.2

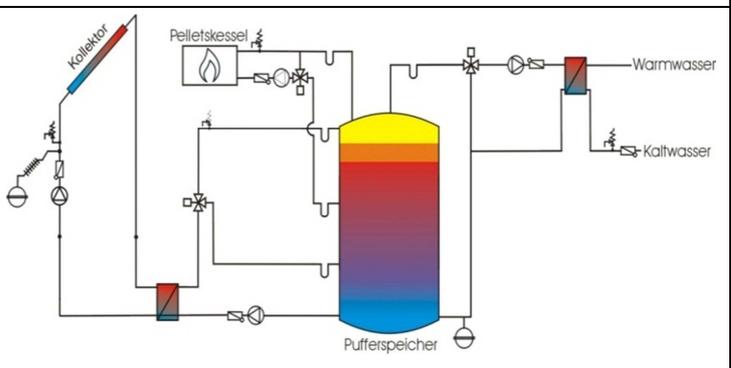


Abbildung 4-9: Anlagenschema A.5

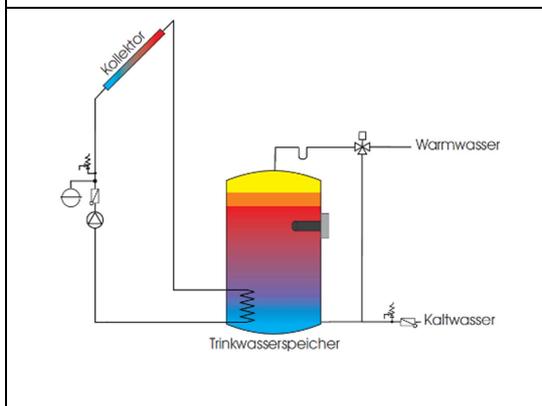


Abbildung 4-10: Anlagenschema A.3

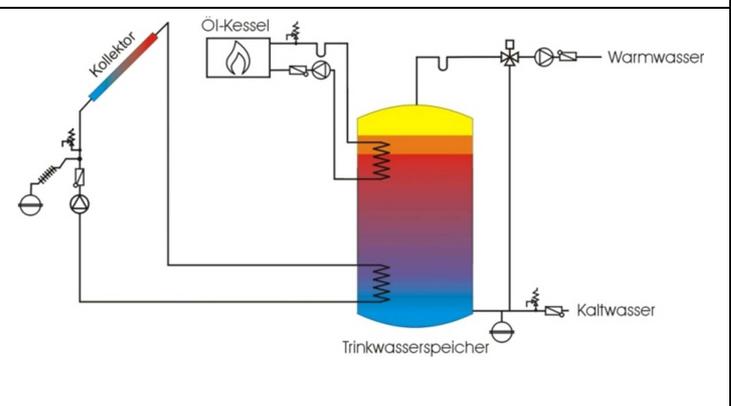


Abbildung 4-11: Anlagenschema A.6

Um einen detaillierten Einblick in die Referenzsysteme an den Standorten zu ermöglichen, wurden in Tabelle 5 alle relevanten Daten zusammengefasst. Die Definition der standortüblichen Kollektoren und die Dimensionierung der Kollektorfläche sowie Speichervolumen, Warmwasserbedarf und das zugrundeliegende Gebäude für die Kombisysteme wurde anhand der Expertenbefragungen und der Marktrecherche vorgenommen. Die entsprechenden Tagesverbrauchsprofile des Warmwasserbedarfs an den Referenzstandorten für Ein- sowie Mehrfamilienhäuser können dem Anhang A.1 entnommen werden. Die Wochen- und Jahresprofile wurden in der Simulation über alle Anwendungsgebiete als konstant angenommen.

Tabelle 5: Detaillierte Übersicht der Referenzsysteme

		Graz			Athen			Pretoria		Fortaleza		Peking			Einheit
		WW-EFH	Kombi-EFH	WW-MFH	WW-EFH	Kombi-EFH	WW-MFH	WW-EFH	WW-MFH	WW-EFH	WW-MFH	WW-EFH	Kombi-EFH	WW-MFH	
Kollektor	Nettofläche	6	16	40	3,6	16,2	40	2,5	35	2,2	20	3,6	16	50	[m²]
	Neigung	47			38			30	25,8	30	3,8	40			[°]
	Ausrichtung	Süd			Süd			Nord		Nord		Süd			[-]
	Konversionsfaktor c0	0,8			0,78 / 0,8			0,8		0,77		0,75			[-]
	Wärmeverlustkoeffizient c1	3,2			5,2 / 3,8			3,8		3,73		4,2			[W/m²K]
	quadratisches Glied c2	0,01			0,015 / 0,018			0,018		0,018		0,017			[W/m²K²]
	Dynamische Wärmekapazität	10600			6000 / 30820			30820		6670		16670			[J/K]
	Absorberbeschichtung	selektiv			nicht selektiv / selektiv (Schwarzchrom)			selektiv (Schwarzchrom)		selektiv		selektiv (Schwarzchrom)			[-]
Speicher	Speicher Typ	Trinkwasser	Puffer	Puffer	Thermosiphon	Puffer	Trinkwasser	Thermosiphon	Trinkwasser	Thermosiphon	Trinkwasser	Thermosiphon	Puffer	Trinkwasser	[-]
	Volumen	300	1000	2000	200	1000	1750	200	2000	200	1000	150	800	2500	[l]
	Höhe	1,8	2	2	1,5	2	2	1,2	2	1,2	2	1,2	1,8	2	[m]
	Dämmdicke	30	100	100	55	100	80	50	80	50	80	50	100	80	[mm]
	Dämmmaterial	PU-Hartschaum	PU-Hartschaum	PU-Hartschaum	PU-Schaum	PU-Hartschaum	PU-Hartschaum	PU-Schaum	PU-Hartschaum	PU-Schaum	PU-Hartschaum	PU-Schaum	PU-Hartschaum	PU-Hartschaum	[-]
	Solar-Wärmetauscher	Wendel-WT	Platten-WT	Platten-WT	Mantel-WT	Platten-WT	Wendel-WT	Mantel-WT	Wendel-WT	Mantel-WT	Wendel-WT	Mantel-WT	Platten-WT	Wendel-WT	[-]
	Nachheizung	E-Patrone	Pellets-Kessel	Pellets-Kessel	Durchlauf-erhitzer	Öl-Kessel	Öl-Kessel	E-Patrone	Gas-Kessel	E-Patrone	Gas-Kessel	E-Patrone	Pellets-Kessel	Gas-Kessel	[-]
BW-Bedarf	WE	1	1	30	1	1	30	1	30	1	30	1	1	30	
	Pers. / WE	4	4	2,5	4	4	2,5	4	2,5	3	2,5	3	3	2,5	[-]
	Soll-Temperatur	50	50	60	60	60	60	60	60	50	60	45	45	60	[°C]
	Verbrauch	200	200	2250	150	150	2250	150	2250	120	2250	120	120	2250	[l/d]
	Profil	Graz-EFH	Graz-EFH	Graz-MFH	Athen-EFH	Athen-EFH	Athen-MFH	Pret.-EFH	Pret.-MFH	Forta.-EFH	Forta.-MFH	Peking-EFH	Peking-EFH	Peking-MFH	[-]
Gebäude	Fläche	-	150	-	-	140	-	-	-	-	-	140	-	[m²]	
	spez. Heizenergiebed.	-	43,3	-	-	80	-	-	-	-	-	80	-	[kWh/m²a]	
	Wärmeabgabesystem	-	FB	-	-	Radiator	-	-	-	-	-	Radiator	-	[-]	
Marktüblicher solarer Deckungsgrad	70	45	50	65	40	60	50	75	90	50	75	35	65	[%]	

In Tabelle 5 wurden die Referenz-Kollektoren mit ihren Parametern dokumentiert. In Athen wurden ein Kollektor mit einer Solarlack-Beschichtung (in weiterer Folge „Athen1“) sowie ein zweiter marktüblicher Kollektor mit einer selektiven Beschichtung (in weiterer Folge „Athen2“) als Referenzkollektoren definiert. In der Abbildung 4-12 werden die Kennlinien der Referenzkollektoren aller Standorte bei einer Einstrahlung von 1000 W/m^2 und einer Umgebungstemperatur von $30 \text{ }^\circ\text{C}$ gegenüber gestellt.

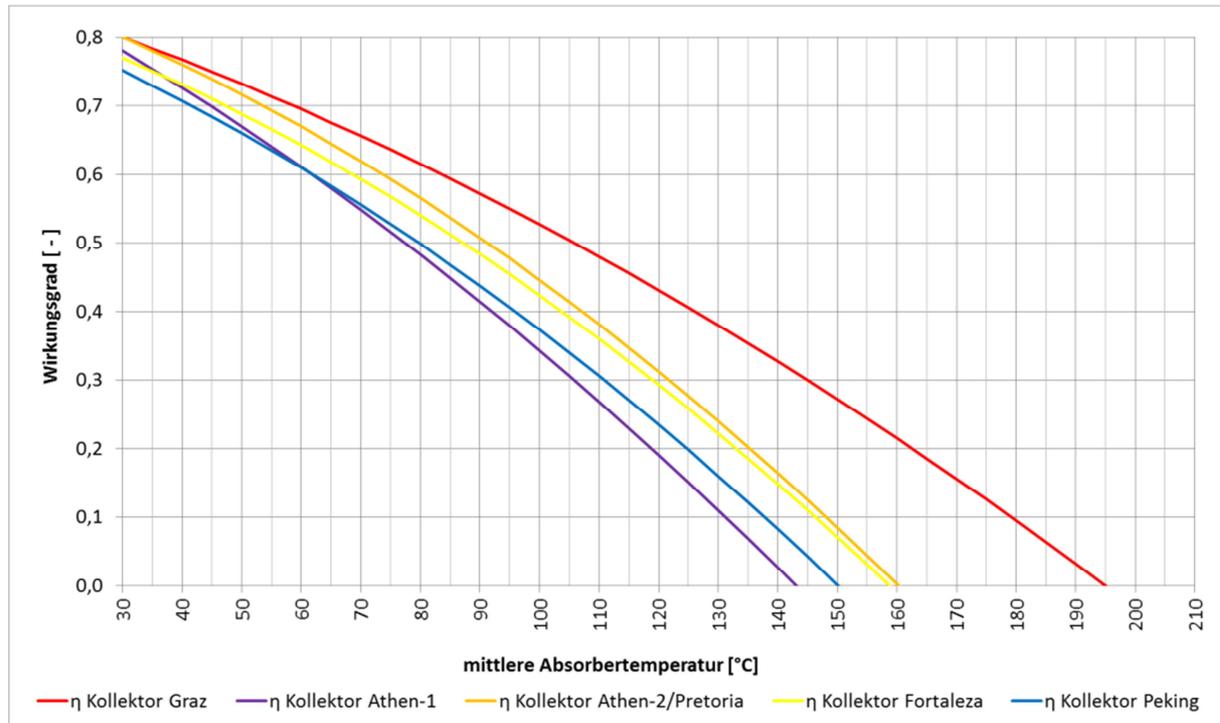


Abbildung 4-12: Kennlinie der Referenz-Kollektoren bei 1000 W/m^2 Einstrahlung und $30 \text{ }^\circ\text{C}$ Umgebungstemperatur

Bewertet man die Kollektoren anhand ihrer Kennlinien erkennt man:

1. ein breites Band der Konversionsfaktoren (c_0) bei $30 \text{ }^\circ\text{C}$ von 80 Prozent (mit selektiver Schicht) bis 75 Prozent (keine selektive Schicht)
2. eine sehr hochwertige Kollektortechnik in Mitteleuropa (hoch selektive Beschichtung) mit Stagnationstemperaturen um die $200 \text{ }^\circ\text{C}$
3. die hohe Bandbreite der Kollektorgüte in Athen (Athen1 und Athen2)

In Gegenden mit hoher Einstrahlung wie beispielsweise in Pretoria wird das Hauptaugenmerk nicht auf die Effizienz des Kollektors gerichtet sondern auf die Kostenersparnis.

Da nun alle Referenzsysteme für die Standorte in diesem Kapitel definiert wurden, kann nun auf Simulationsumgebungen, mit denen die Systeme abgebildet und simuliert wurden, eingegangen werden.

5 Simulationsumgebungen

In den folgenden Kapiteln wird auf die in dieser Arbeit verwendeten Simulationsprogramme Polysun, SHW_2012 und das Druckberechnungstool SHW_T_P_stat im Allgemeinen, sowie auf die Vorgehensweise und Unterschiede eingegangen.

5.1 Polysun

Zur Simulation der Referenzsysteme sowie der entleerenden Systeme wurde das Programm Polysun in seiner aktuellen Version 5.10 verwendet. Dieses Produkt bietet eine Vielzahl wichtiger Werkzeuge zum Konfigurieren, Optimieren und Simulieren von solarthermischen Anlagen. Neben einer Vielzahl von vorgefertigten Basis-Varianten gibt es die Möglichkeit, eigene detaillierte Solarsysteme und alle zugehörigen Komponenten selbst zu konfigurieren sowie Komponenten aus einer Bibliothek zu verwenden. Polysun ermöglicht, aus standortbezogenen Klimadaten zu wählen, die der Simulation zu Grunde liegen. In Polysun wurden die Referenzsysteme (gepumpt, Thermosiphon) sowie die auf Kunststoff basierenden Systeme (Drain-Back, Thermosiphon) simuliert. Die Jahressimulationsergebnisse können sowohl als Report, graphisch, als auch in tabellarischer Form ausgegeben und mit Microsoft Office Excel weiter verarbeitet werden. (Vela Solaris, 2012) Im Anhang B.1 wird der Report für das Warmwassersystem am Standort Graz beispielhaft dargestellt.

Allgemeine Vorgehensweise

Durch Auswahl eines vorgefertigten Schemas wurde das solarthermische System hydraulisch mit den dazugehörigen Komponenten vorausgewählt. Jede einzelne Komponente (Kollektor, Speicher, Pumpe, Zusatzheizung, Rohre usw.) und Steuerung derselben wurden betrachtet und entsprechend dem abzubildenden System konfiguriert. Im nachfolgenden Schritt sind detaillierte Informationen zum Lastprofil und Nutzerverhalten sowie die Warmwassersolltemperatur anzugeben. Abhängig von Einsatz des Solar-Systems müssen weitere Angaben zum Gebäude (Grundfläche, Heizwärmebedarf, Wärmeabgabesystem usw.) getroffen werden. Nach gestarteter Simulation wurden die Ergebnisse in der gewünschten Form (tabellarisch) ausgegeben und für die weitere Bearbeitung aufbereitet. Neben den abgebildeten Referenzsystemen werden auch die entleerenden Systeme in Kunststoff-Ausführung mit Polysun definiert. Die Kunststoffsysteme werden so dimensioniert, dass sie die gleichen solaren Deckungsgrade erreichen, wie die Referenzsysteme.

5.2 SHW_2012

SHW_2012 ist eine Erweiterung des in den Jahren 1993 - 2005 am Institut für Wärmetechnik der TU Graz zur Unterstützung mehrerer Forschungsprojekte entstandenen Simulationsprogrammes. Das in FORTRAN geschriebene Programm kann Solaranlagen zur Warmwasserbereitung, Heizungsunterstützung, Schwimmbaderwärmung und andere Anwendungen berechnen. In der Erweiterung, die durch Univ.-Prof. Wolfgang Streicher, Leiter des Bereiches Gebäudetechnik und Erneuerbare Energie an der Universität Innsbruck implementiert wurde, bietet das Programm die Grundlage für die Berechnung von solarthermischen Systemen mit Rückkühlfunktion oder thermotroper Schicht an. (Streicher et al., 2012) SHW bietet wie Polysun vorgefertigte hydraulische Konzepte für solarthermische Systeme an, die nach Belieben bearbeitet werden können.

Die Simulation benötigt an Klimadaten Stundenwerte von Außentemperatur sowie von direkter (I_{dir}), globaler (I_{Glob}) sowie diffuser Solarstrahlung (I_{dif}) auf die horizontale Fläche. Es können derzeit drei verschiedene Formate verwendet werden. In dieser Arbeit wurden die Klimadaten aus Polysun exportiert und als ASCII-Datensatz in SHW importiert.

SHW bietet auch den großen Vorteil, dass Anzahl der Rechenoperationen (ausgeführte Simulationsschritte) frei wählen sind, wodurch ein deutlich detaillierteres Ergebnis (zum Beispiel Ausgabe der Daten im 5 Minuten Schritt), im Vergleich zu Polysun (ein Simulationsschritt pro Stunde) zur Verfügung steht.

Allgemeine Vorgehensweise

Mit SHW_2012 werden in dieser Arbeit in erster Linie auf Kunststoff basierende gepumpte Systeme mit Rückkühlfunktion bzw. thermotroper Schicht als Überhitzungsschutz simuliert. Diese Kunststoffsysteme bauen auf die Referenzsysteme an den jeweiligen Standorten, die mit Polysun simuliert wurden, auf. Es wurde daher im ersten Schritt versucht ein möglichst identisches Abbild des Referenzsystems aus Polysun mit SHW darzustellen. In dieses Referenzsystem wurde danach ein Kunststoffkollektor mit Rückkühlfunktion oder thermotroper Schicht implementiert; die Kollektorfläche wurde zur Erzielung des gleichen Deckungsgrades angepasst.

Zusätzlich benötigt SHW bei der Berechnung des Überhitzungsschutzes einen weiteren Datensatz, der eine temperaturabhängige Kennlinie einliest. SHW erstellt verschiedene ASCII Ausgabedatensätze, die nachfolgend grafisch oder tabellarisch ausgewertet werden können. Beispielsweise wird ein Standardprotokoll erstellt, in welchem die Energieflüsse, Deckungsgrade und Laufzeiten monatlich zusammengefasst und in eine lesbare Form gebracht werden. Ebenso werden Ausgabedatensätze mit Einzelwerten jedes Simulationsschrittes über den

gesamten Berechnungszeitraum in tabellarischer Form ausgegeben. Im Anhang B.2 ist ein Auszug aus den Ausgabedatensätzen angefügt.

Der solare Deckungsgrad (SF'), wie ihn SHW definiert, wurde bereits im Abschnitt 2.5, Gl. 2-10 beschrieben. In weiterer Folge wurde anhand der ausgegebenen Energieflüsse der Deckungsgrad nach SF_i (Gl. 2-8) berechnet, um mit Polysun vergleichen zu können. Der SF_i bezieht sich auf die Energieflüsse in den Speicher (Solarenergie an den Speicher zu Solarenergie an den Speicher plus Zusatzenergie an den Speicher)

5.3 SHW_T_P_Stat

Zusätzlich zum Simulationsprogramm SHW_2012 wurde ein Druckberechnungstool, das ebenfalls durch Univ.-Prof. Wolfgang Streicher programmiert wurde, entwickelt. Das in FORTRAN geschriebene Programm SHW_T_P_Stat benötigt als Input ein durch SHW_2012 produziertes Ausgabedatenfile, mit dem die entsprechenden Systemtemperaturen eingelesen und die damit verbundenen Drücke berechnet und in weiterer Folge ausgewertet werden können.

Allgemeine Vorgehensweise

Nach erfolgter Simulation der gepumpten Systeme auf Kunststoffbasis mit Überhitzungsschutz (Rückkühlfunktion, thermotrope Schicht) an den Referenzstandorten mit SHW_2012, werden dem Drucktool die Systemtemperaturen bereitgestellt. Zusätzlich benötigt SHW_T_P_Statistik Eingabeparameter, mit denen die Hydraulik der Anlage sowie die Zusammensetzung der eingesetzten Solarflüssigkeit (zum Beispiel Propylenglykol-Gemisch mit 40 prozentiger Konzentration) und das Entleerungsverhalten des Systems beschrieben werden. Über die Eckdaten (Flüssigkeits-Volumen Wärmetauscher, Höhendifferenz zwischen Kollektor und Membranausdehnungsgefäß (MAG), Ansprechdruck des Sicherheitsventils, eingesetztes Wärmeträgerfluid, Flüssigkeitsvorlage) der Anlage wird in weiterer Folge ein Ausdehnungsgefäß dimensioniert.

Die Flüssigkeitsvorlage (V_V) ergibt sich aus der Umformung der idealen Gasgleichung.

$$V_V = V_{MAG} \cdot \left[1 - \frac{(p_{vor} + 1)}{(p_{füll} + 1)} \right] \quad (\text{Gl. 5-1})$$

mit

V_{MAG} Volumen des Ausdehnungsgefäßes [m^3]

p_{vor} Vordruck [$\text{bar}_{ü}$]

$p_{füll}$ Systemdruck beim Befüllen (Fülldruck) [$\text{bar}_{ü}$]

Ausgehend von einem Vordruck im Ausdehnungsgefäß der zumeist der statischen Höhe (MAG bis Kollektor Oberkante) entspricht, soll nach dem Füllvorgang im Kollektor ein Überdruck von 0,3 bar herrschen. Daraus ergibt sich beispielsweise bei sechs Meter Bauhöhe ein Fülldruck von 0,9 bar.

Während des Betriebes werden bei Systemen mit Rückköhlfunktion maximale auftretende Kollektortemperaturen von etwa 90 °C erreicht. Dies reicht bei gegebenem Anlagendruck, der sich immer über Atmosphärendruck befindet, nicht aus um das Wärmeträgermedium zu verdampfen. Durch die Flüssigkeitsausdehnung von ca. 9 Prozent zwischen 10 °C und 90 °C des Propylenglykol-Gemisches kann nur eine geringe Druckerhöhung in der Anlage verbucht werden. Davon ausgehend, dass es durch den Einsatz eines Überhitzungsschutzes, (Rückköhlfunktion, thermotrope Schicht) zu keiner Dampfbildung kommt, wurde ein entsprechendes Ausdehnungsgefäß gewählt.

Die Simulationsergebnisse werden von SHW_T_P_Stat in Ausgabedatensätze geschrieben. Im Anhang B.3 wird ein solcher Datensatz beispielhaft dargestellt.

5.4 Simulationsumgebung Solar

Die Simulationsumgebung Solar wurde am Institut für Nachhaltige Energien für die Simulation von Kollektoren und Kollektorfeldern von Robert Hausner entwickelt und wird ständig ausgebaut und erweitert. Mit diesem Simulationsprogramm wird der Kollektor mit theoretischen Hintergründen nach Duffie Beckman, VDI und weiterer Literatur abgebildet.

Es können sowohl thermische als auch hydraulische physikalische Vorgänge abgebildet werden. Der theoretische Kollektor kann in seiner Geometrie und in seinen Komponenten (Abdeckungen, Dämmungen, Absorber, usw.) beliebig definiert werden. Durch Integration von Klimadaten (Einstrahlung, Umgebungstemperaturen, Wind, Feuchte, Bodenreflexion, etc.) und mittleren Kollektortemperaturen (beispielsweise aus Polysun) können Temperaturen im Kollektor auf Komponentenebene ermittelt werden. Weiters können die Minimaltemperaturen am Absorber in Abhängigkeit von der Himmelstemperatur durch Nullsetzen des Wärmestroms berechnet werden.

In dieser Arbeit beschränkt sich die Anwendung von „Solar“ auf die Berechnung der Minimaltemperaturen am Kollektor. Diese werden für die Referenzkollektoren sowie für den Kunststoffkollektor an dem jeweiligen Standort ausgewertet.

6 Systeme in kunststoffgerechter Ausführung

In diesem Kapitel wird auf die Möglichkeiten zur Verringerung der thermischen und mechanischen (Druck) Belastungen eingegangen.

In Österreich weist die Großzahl der neuproduzierten Kollektoren eine selektive Beschichtung auf, um die Effizienz des Kollektors weiter zu steigern. Konventionelle Kollektoren aus Metall (Kupfer, Aluminium, usw.) kommen selbst bei Stagnation, wo Stillstandstemperaturen von über 200 °C und Drücke bis zum Ansprechdruck des Sicherheitsventiles (beispielsweise 6 bar) erreicht werden können, nicht an ihre Materialgrenzen.

Am Beispiel des Vollkunststoffkollektors von ECO-Flare liegen jedoch die empfohlenen Betriebsdrücke bei 60 °C Mediums-Temperatur bei 6 bar und bei 80 °C bei nur noch 4 bar. Der Rohrregisterabsorber wird, wie erwähnt aus Polypropylen (PP) gefertigt, welches in die Kategorie der Standardpolymere einzugliedern ist. Da Standardpolymere eine Temperaturbeständigkeit bis ca. 100 °C aufweisen, ist ein Überhitzungsschutz von Nöten. Auf den Überhitzungsschutz wird in den nachfolgenden Kapiteln 6.1 und 6.2 näher eingegangen.

Der zweite bereits erwähnte Vollkunststoffkollektor der Firma Aventa Solar weist als Absorbermaterial den Polymerwerkstoff Polyphenylensulfid (PPS) auf, der zu den Hochleistungskunststoffen zählt und somit Temperaturen über 150 °C standhält. Die Solarsysteme von Aventa Solar sind als Drain-back-System ausgeführt, da, wie das Beispiel ECO-Flare zeigt, eine Kombination hoher Temperaturen und hoher Drücke für Polymermaterialien unzulässig sind. Auf die Funktionsweise eines Drain-Back-Systems wird nach den Überhitzungsschutzvarianten im Kapitel 6.3 näher eingegangen.

6.1 Rückkühlfunktion

In einer konventionellen, gepumpten thermischen Solaranlage gibt es keine Möglichkeit den Zustand der Stagnation über eine entsprechend immer vorhandene Wärmesenke zu verhindern. Jedoch gibt es, wie es das Funktionsprinzip des ECO-Flare Kollektors zeigt, die Möglichkeit den Kollektor zu hinterlüften (abführen der Wärme aus dem Kollektor durch Konvektion) und dadurch den Kollektor vor zu hohen Temperaturen zu schützen. Eine weitere Methode nach Schildberger (2008) wäre eine Integration eines sekundären Kreislaufes mit einem Kühlkörper. Über die Flüssigkeitstemperatur im Sammler des Absorbers wird ein Ventil angesteuert, das einen Thermosiphon-Kreislauf freigibt. Um den Überhitzungsschutz auch bei Stromausfall zu garantieren, muss das Ventil so installiert werden, dass es im ungeschalteten Zustand den Sekundärkreislauf zum Kühler hin öffnet.

Für die Simulation mit SHW_2012 wurde dieses Prinzip über die Erhöhung des Wärmeverlustkoeffizienten des Kollektors angenähert. Die Koeffizienten wurden in der Hinsicht

angepasst, dass einerseits ein effektiver Überhitzungsschutz gewährleistet wird und andererseits der Kollektor im Normalbetrieb keine Effizienzeinbußen aufweist.

In Tabelle 6 sind die Korrekturfaktoren mit denen der lineare Wärmeverlustkoeffizient multipliziert wird für die jeweilige Temperatur ersichtlich. Zwischen den jeweiligen Werten wird linear interpoliert. Diese Korrekturfaktoren wurden zusammen mit einem Experten der AEE-INTEC definiert.

Tabelle 6: Korrekturfaktor des linearen Wärmeverlustkoeffizienten

Temperatur	Korrekturfaktor
$\bar{T}_{\text{abs,fl}} [\text{°C}]$	f_{RK}
-50	1,0
50	1,0
60	1,0
70	1,0
85	1,0
90	3,4
95	3,4
100	3,4
120	3,4
250	3,4

Die Gleichung 6-1 beschreibt die veränderte Wirkungsgradkennlinie durch den Korrekturfaktor.

$$\eta_{\text{Koll}} = c_0 - c_1 \cdot f_{\text{RK}} \cdot \frac{(\bar{T}_{\text{Abs,fl}} - T_a)}{I_g} - c_2 \cdot \frac{(\bar{T}_{\text{Abs,fl}} - T_a)^2}{I_g} \quad (\text{Gl. 6-1})$$

In der nachfolgenden Abbildung 6-1 erkennt man, dass bis zu einer mittleren Absorbtemperatur von 85 °C der Faktor 1,0 in die Gleichung eingeht, was bedeutet, dass die Kennlinie des Kunststoffkollektors mit Rückkühler deckungsgleich jener ohne Rückkühler liegt. Übersteigt die mittlere Absorbtemperatur die Schalttemperatur von 85 °C, wird wie erwähnt linear zwischen den jeweiligen Werten interpoliert. Das bedeutet, dass wenn die mittlere Absorbtemperatur beispielsweise 88 °C erreicht, e in Korrekturfaktor von 2,44 in die Gleichung 6-1 eingeht.

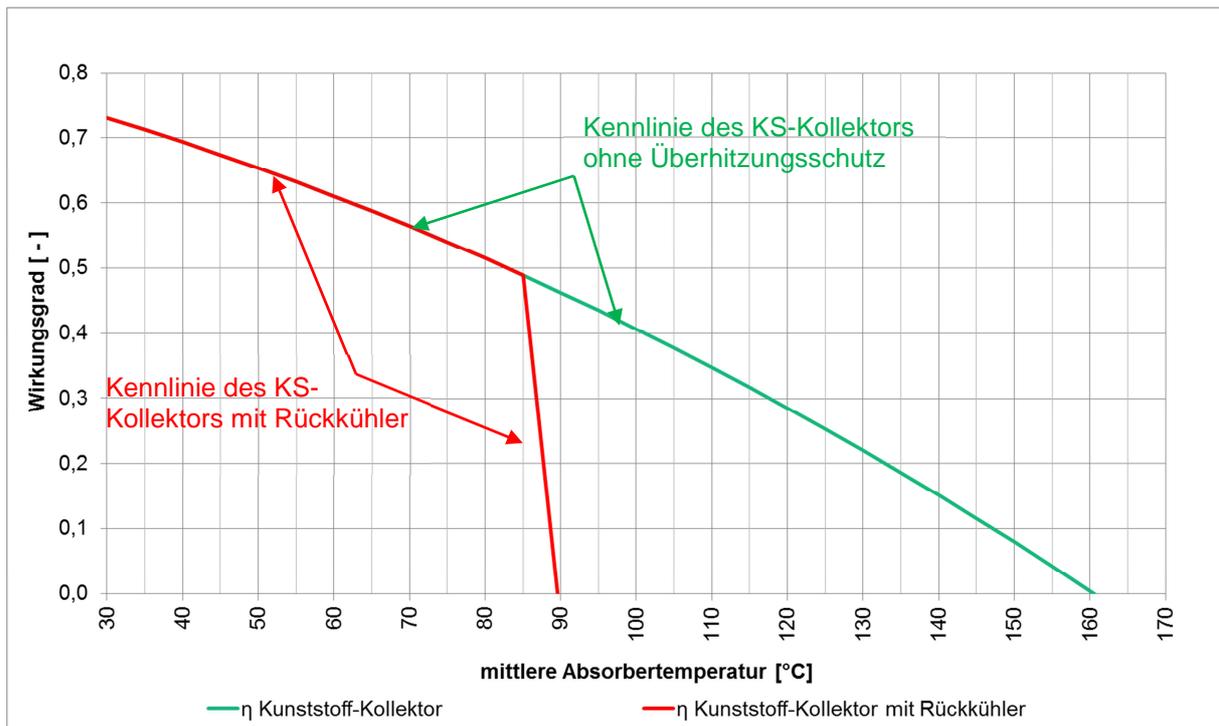


Abbildung 6-1: Wirkungsgradkennlinie des Kunststoffkollektors mit und ohne Rückkühler bei einer Einstrahlung von 1000 W/m^2 und einer Umgebungstemperatur von 30 °C

Um die Wirkungsweise eines Solarsystems mit integriertem Rückkühler näher zu erläutern, wurde eine Simulation des Warmwassersystems auf Kunststoffbasis mit Rückkühler am Standort Graz, mit SHW_2012 simuliert und ein Tagesverlauf abgebildet. Da beiden Simulationsumgebungen (Polysun, SHW_2012) dieselben Klimadaten (aus Polysun exportiert und in SHW_2012 importiert) als Eingabedatensatz zur Verfügung stehen, wurde in weiterer Folge immer der gleiche Tag im Jahr (26. Mai) für die folgenden Darstellungen gewählt.

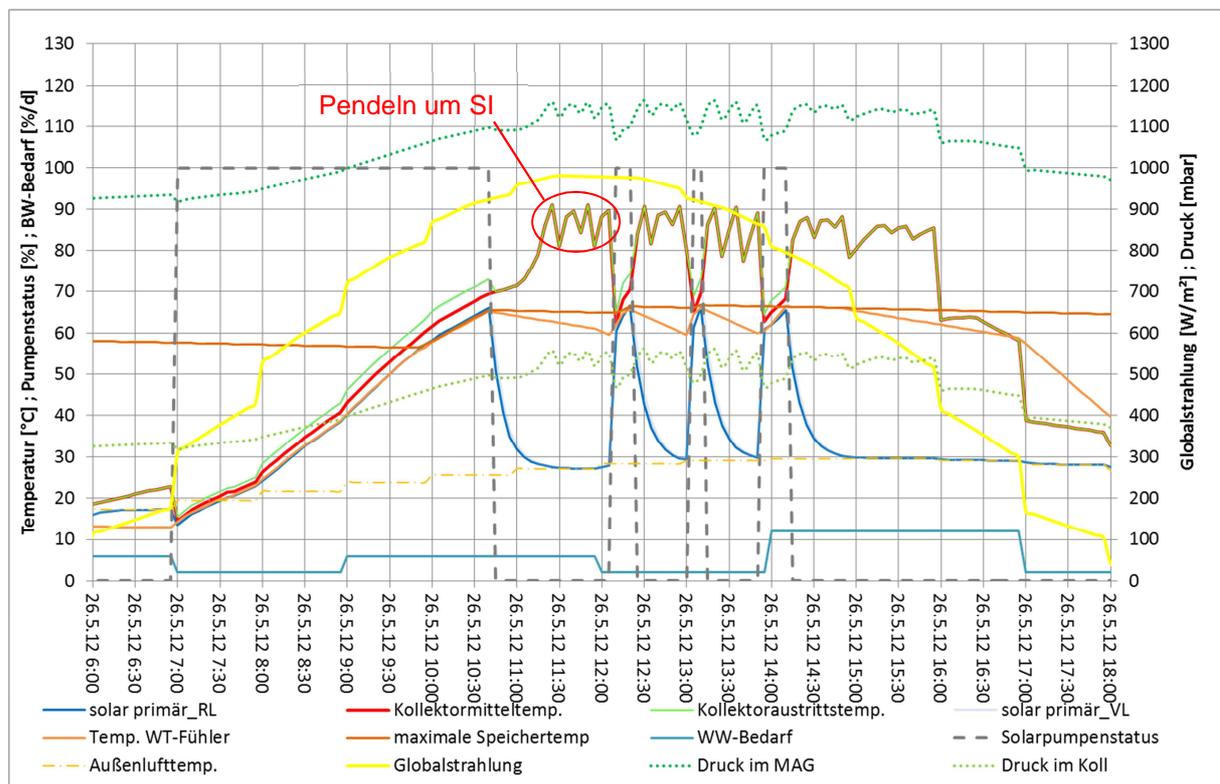


Abbildung 6-2: Tagesverlauf WW-System auf Kunststoffbasis mit Rückkühler am Standort Graz

Man erkennt in Abbildung 6-2 den ersten Einschaltvorgang knapp vor 7 Uhr. Zu diesem Zeitpunkt wird die erforderliche Temperaturdifferenz zwischen Kollektor-Ausgang und Brauchwasserspeicherfühler von 6 Kelvin überschritten. Ebenso liegt die Speichertemperatur unter der maximal erlaubten Temperatur von 65 °C ab züglich der Hysterese von 5 Kelvin, die vom Brauchwasserspeicherfühler gemessen wird. Mit steigender Einstrahlung nehmen die Temperaturen im Speicher als auch im Kollektor zu, bis um ca. 10:40 erstmalig die maximal erlaubte Speichertemperatur von 65 °C überschritten wird. Das hat eine Beendigung der solaren Energiezufuhr zur Folge. Der Kollektor geht aus diesem Zustand in Stagnation. In weiterer Folge steigen die Kollektormittel- und Austrittstemperaturen weiter an und die gedämmten Vor- und Rücklaufleitungen kühlen gegen die Umgebungstemperatur aus. Um ca. 11:20 beginnt die im Simulationsprogramm hinterlegte Funktion, die den Wärmeverlustkoeffizienten c_1 ab dem angegebenen Schaltintervall (SI) von 85-90 °C, wie in Tabelle 6 ersichtlich, verändert, zu wirken. Eine Änderung dieses Koeffizienten beeinflusst den theoretischen Wirkungsgrad des Kollektors, was der Wirkungsweise eines nachgeschalteten Rückkühlers sehr nahe kommt. Fällt die Kollektortemperatur unter jene der unteren Schalttemperatur von 85 °C, so wird der Korrekturfaktor auf den Ausgangswert zurückgesetzt. Diese Wirkungsweise ist klar durch das Pendeln der Kollektortemperaturen um das Schaltintervall (SI) zu erkennen. Dies wird wie bereits erwähnt, durch die hohe zeitliche Auflösung (fünf Minuten Intervall) und Ausgabe der Daten von SHW ersichtlich. In der Zwischenzeit sinkt die Temperatur des Brauchwasserspeicherfühlers durch

Warmwasserentnahmen sowie durch Abstrahlverluste des Speichers unter 60 °C (=max. erlaubte Speichertemperatur abzüglich 5 Kelvin Hysterese). Damit wird die Pumpe des Primärsolarkreises aktiviert und der Speicher mit Warmwasser geladen, bis die Anlage wieder in Stagnation geht. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis die Einstrahlung nicht mehr ausreicht, um die entsprechende Temperaturdifferenz zwischen Kollektorausstritt und Brauchwasserspeicherfühler zu gewährleisten.

An diesem Beispiel ist zu erkennen, dass Systeme mit einer Abfuhr der überschüssigen Wärme durch Konvektion (Rückkühler, Hinter-Lüftung), sehr gut geeignet sind, die Temperaturen im Kollektor auf ein definiertes Maß zu begrenzen. Das bedeutet in Bezug auf die verwendeten Kunststoffe, dass günstige Standardpolymere für die Kollektorherstellung eingesetzt werden können.

6.2 Thermotrope Schicht

Thermotrope Schichten werden bereits für den Überhitzungsschutz von Wohn- und Arbeitsräumen für Glasfassaden von Gebäuden eingesetzt. Sie ändern in einem Temperaturbereich von 25 bis 30 °C selbstständig und reversibel ihren solaren Transmissionskoeffizienten. Für diesen Zweck wurden in den letzten Jahren drei Konzepte entwickelt. Hydrogele und Polymer Blends sind Mehrkomponentensysteme, die eine untere kritische Entmischungstemperatur aufweisen. Wird die Schalttemperatur überschritten, entmischen sich die einzelnen Materialkomponenten und es kommt zu einer Phasenseparation. Diese bewirkt eine diffuse Streuung des Lichtes. Beide Systeme zeigen jedoch für einen solaren Systemschutz bei Kollektoren eine unzureichende Transmissionsverringerung. Das dritte Konzept basiert auf dem Einsatz von thermotropen Gießharzsystemen. Diese bestehen aus einer vernetzten Polymermatrix mit einer darin eingebetteten thermotropen Komponente. Die eingebettete Komponente ist stark temperaturabhängig und verändert den Brechungsindex durch Änderung ihres Aggregatzustandes. Unterhalb der Schalttemperatur weisen die beiden Komponenten dieselben Brechungsindizes auf, während es oberhalb dieser zu einer Eintrübung kommt. Dies würde es theoretisch ermöglichen, den Konversionsfaktor c_0 der Kollektorkennlinie so zu beeinflussen, dass eine gezielte Absenkung der Stagnationstemperatur erreicht werden kann. Bei niedrigen Temperaturen sollte diese Schicht möglichst transparent sein und bei höheren Temperaturen die solare Strahlung mit einem höheren Anteil reflektieren. Im geschalteten Zustand ist eine Transparenz von rund 30% für einen zuverlässigen Überhitzungsschutz ausreichend. (Wallner et al. 2006)

Die thermotrope Schicht ist wie erwähnt durch eine untere und eine obere Schalttemperatur definiert. In Tabelle 7 ist das Schaltintervall, das sich für einen Einsatz im Solarthermie-Bereich eignen würde, mit den dazugehörigen Korrekturfaktoren ersichtlich. Diese

Korrekturfaktoren wurden zusammen mit einem Experten und unter Einbeziehung interner Forschungsergebnisse der AEE-INTEC definiert.

Tabelle 7: Korrekturfaktor einer theoretischen thermotropen Schicht

Temperatur	Korrekturfaktor
$\bar{T}_{\text{abs,fl}} [\text{°C}]$	f_{TTS}
-50	0,95
50	0,95
60	0,95
70	0,95
85	0,9
90	0,3
95	0,3
100	0,3
120	0,3
250	0,3

Die Gleichung 6-2 beschreibt die veränderte Wirkungsgradkennlinie durch den Korrekturfaktor.

$$\eta_{\text{Koll}} = c_0 \cdot f_{\text{TTS}} - c_1 \cdot \frac{(\bar{T}_{\text{Abs,fl}} - T_a)}{I_g} - c_2 \cdot \frac{(\bar{T}_{\text{Abs,fl}} - T_a)^2}{I_g} \quad (\text{Gl. 6-2})$$

Die nachfolgende Abbildung 6-3 stellt die Wirkungsgradkennlinie des Kunststoffkollektors mit und ohne thermotroper Schicht (Überhitzungsschutz) dar. Vergleicht man die beiden Kennlinien erkennt man den Einfluss der thermotropen Schicht. Hierbei sei nochmals zu erwähnen, dass es sich um eine sehr theoretische thermotrope Schicht handelt. Durch den Korrekturfaktor verschlechtert sich der Transmissionskoeffizient der Abdeckung bereits im unteren Temperaturbereich bis 70 °C um 5 Prozent. Weiters wurden zwei Schaltintervalle zwischen 70 und 85 °C, sowie zwischen 85 und 90 °C angenommen. Die Korrekturwerte für die entsprechenden Temperaturen sind der Tabelle 7 zu entnehmen. Zwischen den jeweiligen Temperatur-Werten wird linear interpoliert. Das bedeutet, dass bei Erreichen der mittleren Absorbtemperatur von beispielsweise 88 °C durch Interpolation ein Korrekturfaktor von 0,66 in die Gleichung 6-2 eingeht.

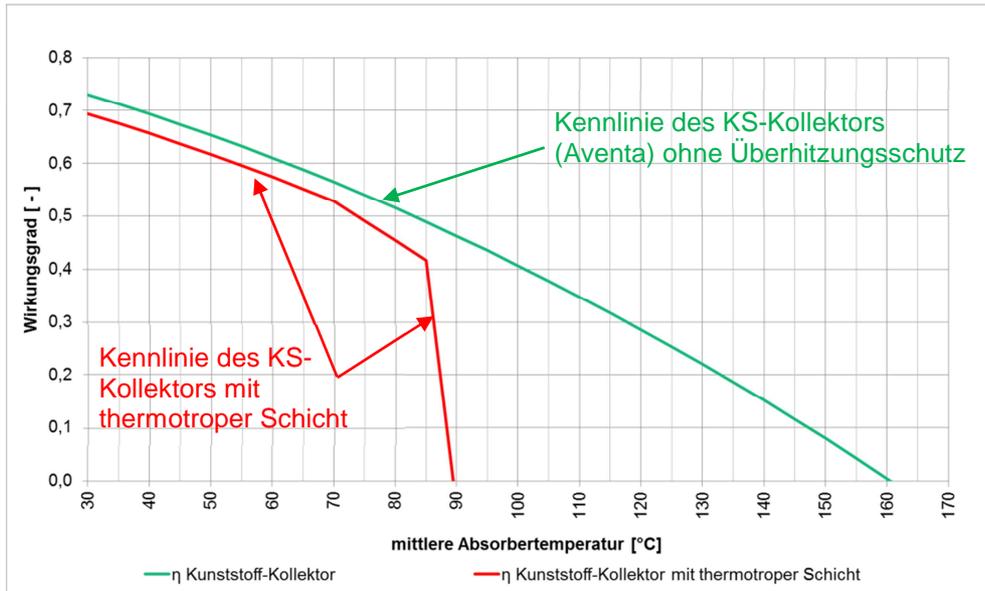


Abbildung 6-3: Wirkungsgradkennlinie des Kunststoffkollektors mit und ohne thermotroper Schicht mit t_{TTS} laut Tabelle 7 bei einer Einstrahlung von 1000 W/m^2 und einer Umgebungstemperatur von 30 °C

In der Abbildung 6-4 ist der Einfluss des Transmissionskoeffizienten ersichtlich. Hierbei wurde das auf Kunststoff basierende Warmwassersystem mit Überhitzungsschutz für den Standort Graz mit dem Simulationsprogramm SHW_2012 simuliert. Es wurde eine Variantenrechnung durchgeführt, in der jeweils der Korrekturfaktor der thermotropen Schicht von 100 bis 90 Prozent im Schaltintervall zwischen -50 und 85 °C variiert wurde.

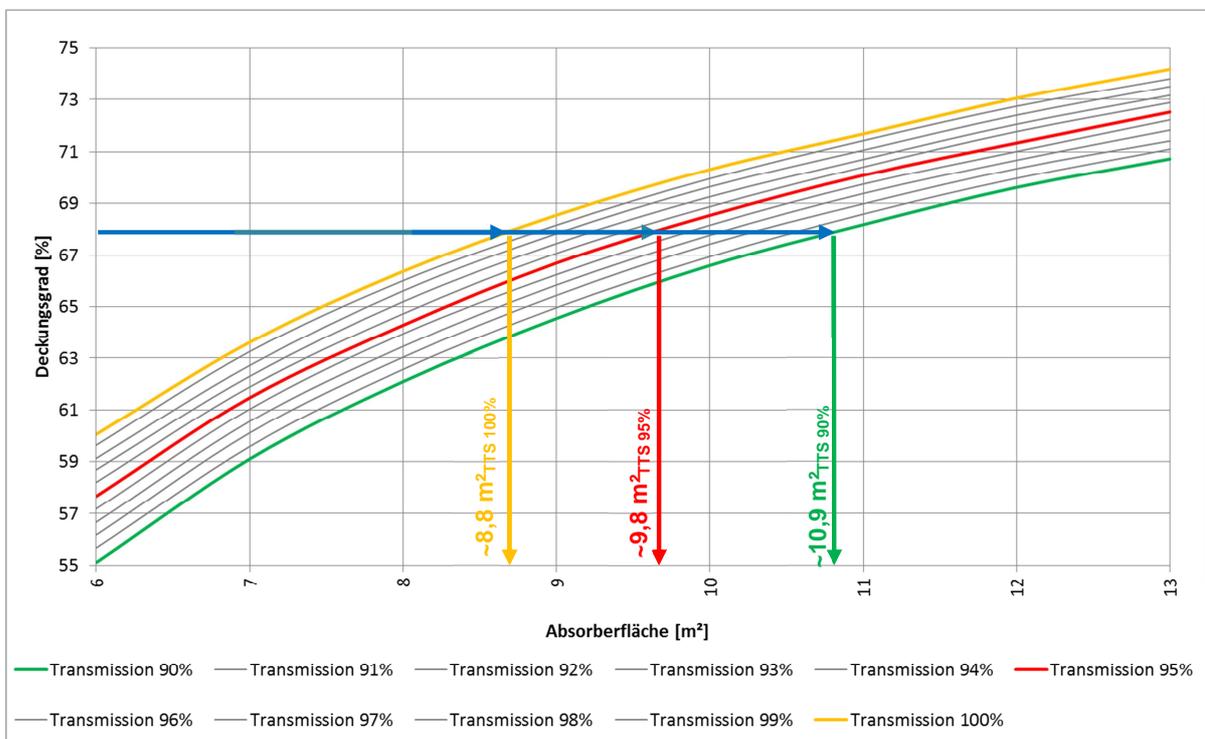


Abbildung 6-4: Einfluss des Transmissionskoeffizienten der thermotropen Schicht auf den Deckungsgrad

Man erkennt, dass mit einem reduzierten Transmissionsgrad von 95 Prozent eine notwendige Zunahme der Kollektorfläche um nahezu 10 Prozent (bei gleichem solaren Deckungsgrad) gegeben ist. Reduziert man die Transmission auf 90 Prozent, wären nochmals ca. 10 Prozent mehr Kollektorfläche erforderlich.

Herkömmliche Absorber mit einer selektiven Beschichtung haben im langwelligen Strahlungsbereich viel geringere Wärmeverluste ($\alpha = \epsilon$ nach Kirchhof) als nichtselektive, wie es in Abbildung 6-5 ersichtlich ist. Bei einer Kombination aus einem selektiv beschichteten Absorber und einer am Absorber aufgetragenen thermotropen Schicht, wird die gegebene Selektivität im Emissionsverhalten unwirksam. Ist die thermotrope Schicht hingegen auf der Abdeckung angebracht, dann schaltet sie in Abhängigkeit der Temperatur der Abdeckung. Diese befindet sich zwischen der Absorbertemperatur und der Umgebungstemperatur. Je höher die Umgebungstemperatur ist, desto niedriger ist die Begrenzungstemperatur am Absorber und umgekehrt. Diese Abhängigkeit ist bei einer selektiven Absorberbeschichtung noch stärker ausgeprägt. Dies schließt eine Kombination praktisch aus. Eine zielführende Variante wäre beispielsweise eine am Absorber (nicht selektiv) montierte thermotrope Schicht. (Hausner, 2011)

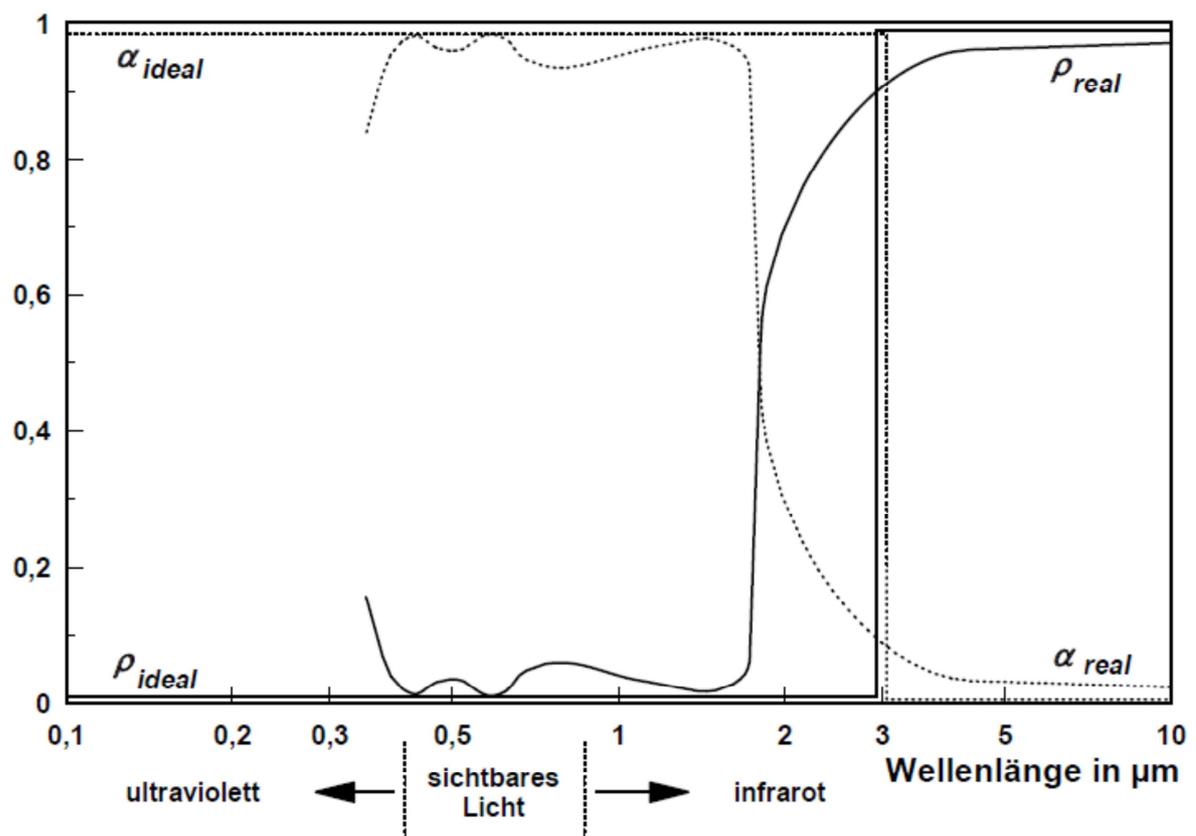


Abbildung 6-5: Absorptions- (α_{Abs}) und Reflexionskoeffizient ($\rho_{Abs} = 1 - \alpha_{Abs}$ bei opaken Flächen) eines idealen (ideal) und eines gängigen realen Absorbers (real) (Streicher, 2009)

Um die Wirkungsweise eines Solarsystems mit thermotroper Schicht näher zu erläutern wurde eine Simulation des Warmwassersystems auf Kunststoffbasis mit einer thermotropen Schicht am Standort Graz mit SHW_2012 simuliert und ein Tagesverlauf abgebildet. Um einen Vergleich mit SHW - simulierten Kunststoff-Systemen mit Übertemperaturschutz verdeutlichen zu können, wurde wiederum der 26. Mai gewählt.

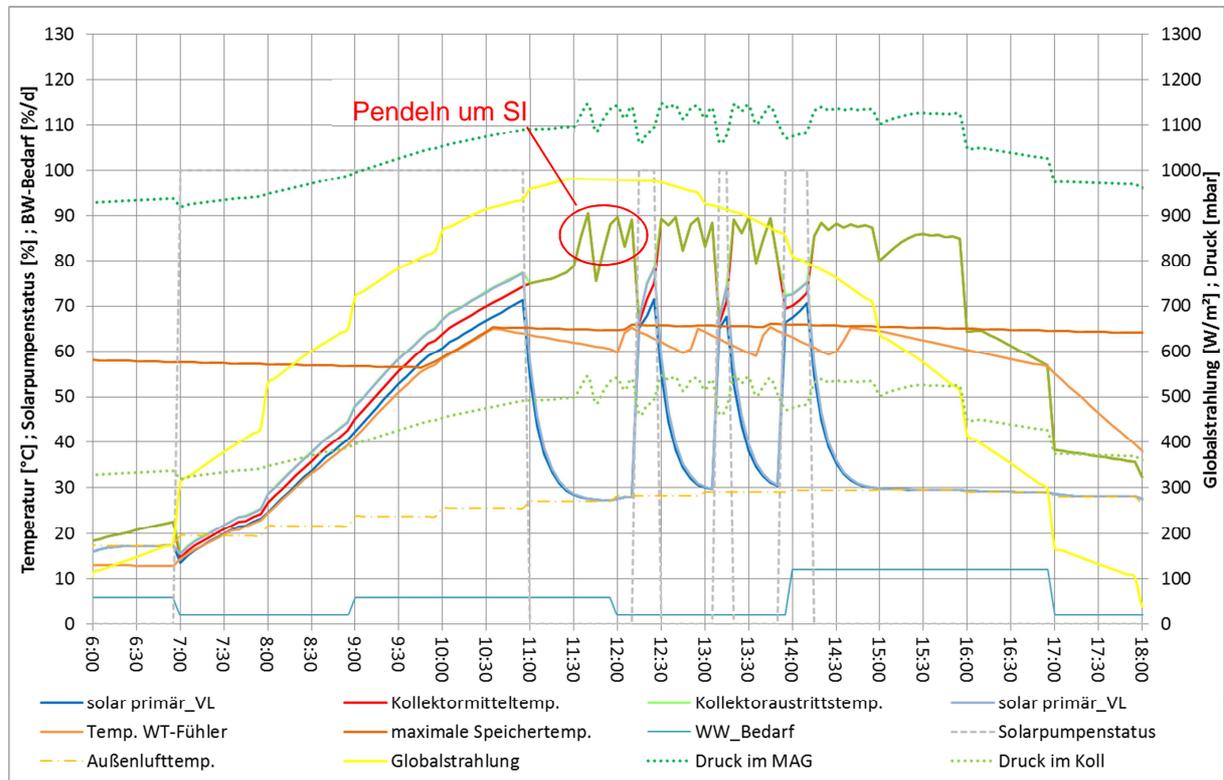


Abbildung 6-6: Tagesverlauf WW-System auf Kunststoffbasis mit thermotroper Schicht am Standort Graz

Nahezu identisch verhält sich das WW-System mit thermotroper Schicht zu jenem mit Rückköhlfunktion als Überhitzungsschutz in den frühen Morgenstunden bis nach dem erstmaligen Einschalten der Anlage. Vergleicht man den weiteren Tagesverlauf bis ca. 11 Uhr, so erkennt man, dass die Kollektortemperaturen des WW-Systems mit Rückköhlfunktion wie in Abbildung 6-2 ersichtlich, schneller ansteigen als jene des Systems mit thermotroper Schicht. Ursache ist das reduzierte Transmissionsverhalten des Kollektors mit thermotroper Schicht (siehe Tabelle 7). Im Gegensatz dazu kann das System mit Rückköhlfunktion bis zur unteren Grenze des Schaltintervalls wie ein konventionelles System ohne Einbußen betrieben werden.

Um ca. 11:35 übersteigt die mittlere Kollektortemperatur die Grenze des Schaltintervalls von 85-90 °C (siehe Tabelle 7). Die hinterlegte Funktion, die den Transmissionskoeffizienten der Abdeckung verändert, beginnt zu wirken. Eine Änderung dieses Koeffizienten beeinflusst den theoretischen Wirkungsgrad des Kollektors, der die Wirkungsweise einer thermotropen Schicht abbilden soll. Ähnlich der Funktionsweise des Rückköhlers beginnt auch hier ein Pendeln der Kollektortemperaturen um die Schaltintervalle.

In der Zwischenzeit sinkt die Temperatur des Brauchwasserspeicherfühlers durch Entnahme von Warmwasser durch den Nutzer sowie durch Abstrahlverluste des Speichers unter 60 °C (max. erlaubte Speichertemperatur abzüglich 5 Kelvin Hysterese), wodurch die Pumpe des Primärsolarkreises aktiviert wird bis die Speichermaximaltemperatur ein weiteres Mal erreicht wird und die Anlage wieder in Stagnation geht. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis die Einstrahlung nicht mehr ausreicht, um die entsprechende Temperaturdifferenz zwischen Kollektorausstritt und Brauchwasserspeicherfühler zu gewährleisten.

6.3 Drain-Back-System

Der Begriff „Drain-Back“ bedeutet so viel wie Rückentleerung des mit Wärmeträger gefüllten Kollektors in ein spezielles Drain-Back-Gefäß, das zur Aufnahme dieses Volumens dient. In den Niederlanden und in Norwegen arbeiten die Solarsysteme fast ausschließlich nach diesem Prinzip. Diese sind als offene, drucklose Systeme ausgeführt, welche nur dem hydrostatischen Druck bei Betrieb standhalten müssen (Hausner et al., 2003).

Drain Back Systeme stellen sicher, dass zum Zeitpunkt des Erreichens höherer Temperaturen der Kollektor und die frostgefährdeten Rohrleitungen frei vom Wärmeträgermedium sind. Beim Erreichen einer definierten Grenztemperatur im Kollektor schaltet sich die Primärpumpe des Solarkreislaufes aus. Die Vorlaufleitung entleert sich durch Einwirkung der Schwerkraft in ein Vorratsvolumen. Im Gegenzug dazu strömt Luft von diesem in den Kollektor, wodurch sich gleichzeitig der Kollektorinhalt und die Rücklaufleitung ebenfalls in das Vorratsvolumen entleeren. Für Kollektoren auf Kunststoffbasis bedeutet das, dass übermäßige Druckbelastungen zur Gänze vermieden werden können. Die folgende Abbildung 6-7 zeigt das Hydraulikschema eines Warmwasser-Systems auf Kunststoffbasis.

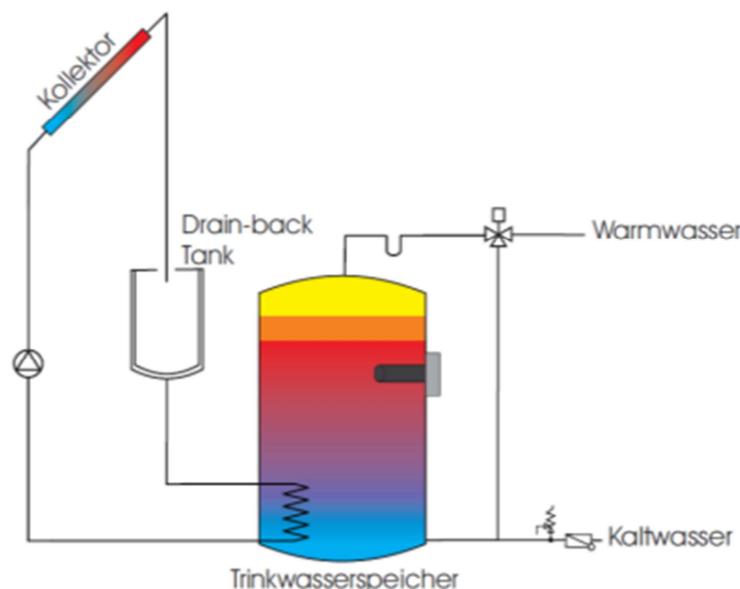


Abbildung 6-7: Hydraulikschema des Warmwasser-Systems auf Kunststoffbasis

Drain Back Systeme erfordern durchgängig vom höchsten Punkt der Anlage in Richtung des Drain-Back-Tanks fallende Rohrleitungen. Da sich der Vorratsbehälter im Inneren des Hauses befindet, kann Wasser als Wärmeträgermedium verwendet werden. Das Wasser ist einerseits vor Frost geschützt und nimmt nach einem Entleerungsvorgang das Raum-Temperaturniveau an. Weiters ist reines Wasser ein sehr günstiges, langzeitbeständiges Wärmeträgermedium und weist bessere Wärmeübertragungseigenschaften (spez. Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Dyn. Viskosität) auf als ein Wasser-Glykolgemisch. Der Einsatz von Wärmeträgern mit Frostschutz ist dennoch üblich, da das Medium Zusätze enthält, die Korrosion hemmend wirken.

Durch die Entleerung des Systems auf das Niveau des Vorratsbehälters muss die Solarkreispumpe nicht nur den Strömungswiderstand im Normalbetrieb aufwenden, sondern auch den Höhenunterschied (ausgehend vom Niveau des Drain-Back Tanks), zur Füllung bis zur Kollektoroberkante überwinden.

Um die Wirkungsweise eines entleerenden Solarsystems näher zu erläutern, wurde das Warmwassersystem auf Kunststoffbasis am Standort Graz (Drain-Back) mit Polysun simuliert und ein Tagesverlauf erstellt. Es wurde wie bei den Systemen mit Überhitzungsschutz der 26. Mai für die Darstellung gewählt.

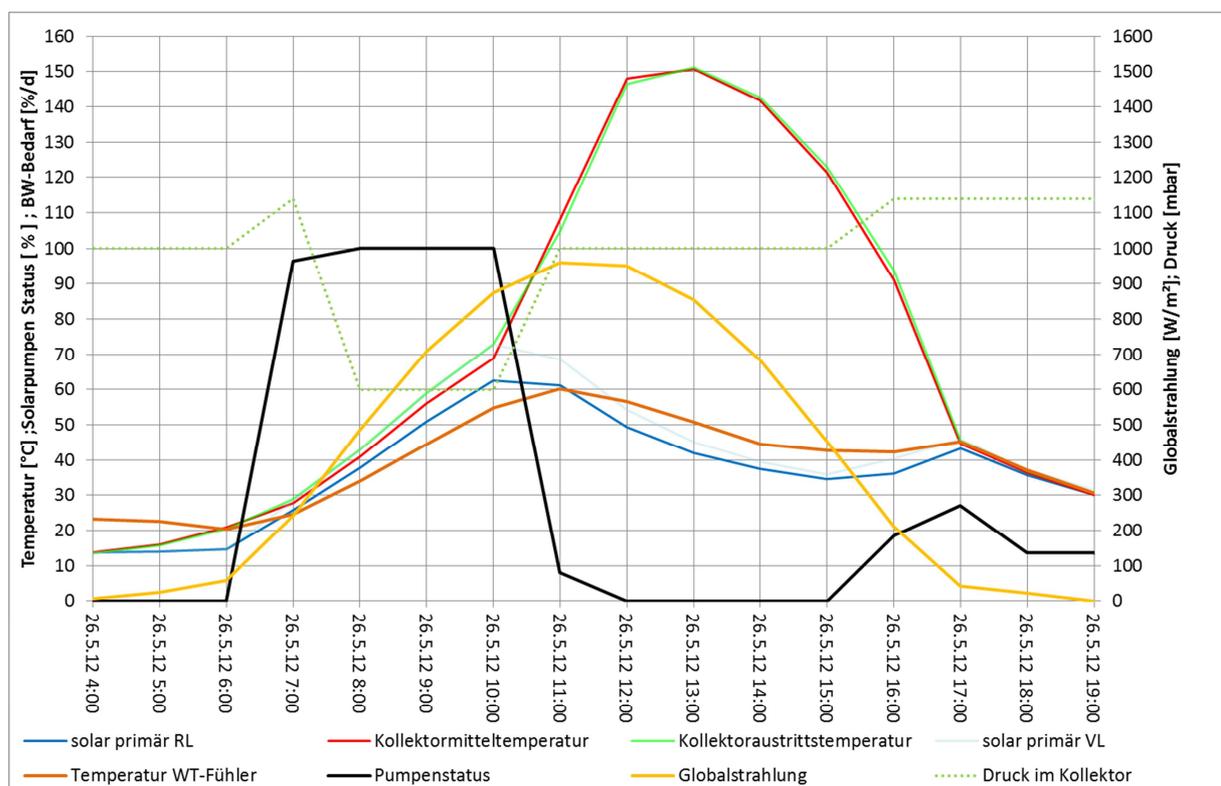


Abbildung 6-8: Tagesverlauf WW-Drain-Back-System auf Kunststoffbasis am Standort Graz

Mit zunehmender Einstrahlung nehmen die Kollektortemperaturen stetig zu. Ab ca. sieben Uhr erkennt man am besten anhand des Pumpenstatus (prozentuelle Laufzeit der Pumpe während

einer Stunde), dass die Einschaltkriterien erfüllt sind (genügend großes ΔT zwischen Kollektor und Temperurfühler) und der Speicher mit solarer Energie gespeist wird. Dieser Zustand hält sich bis 10 Uhr an, bzw. bis in der darauffolgenden Stunde die Kollektor-Maximaltemperatur von 90 °C überschritten wird und die Regelung die Solarpumpe ausschaltet. Mit dem Beenden der Zirkulation entleert sich der Kollektor in den Drain-Back Tank und es tritt der Stagnationszustand ein. Die Kollektortemperaturen steigen bis etwa 150 °C weiter an, bis die Einstrahlung wieder abnimmt. Fällt die Kollektortemperatur unter 90 °C (16 Uhr), ist ein neuerliches Starten des Systems durch die Regelung möglich.

Durch die hohen Temperaturen am Kollektor (150 °C) sind Kunststoffkollektoren im Drain-Back-System aus Hochleistungspolymeren bzw. technischen Polymeren zu fertigen.

6.4 Bestimmung der Kollektorfläche in Kunststoffausführung

Ausgehend vom gleichen Deckungsgrad sollen die Belastungen der Referenzsysteme mit jenen von Kunststoffsystemen verglichen werden. Da Kunststoffsysteme eine etwas geringere Effizienz als Systeme mit beispielsweise einem selektiv beschichteten Kollektor aufweisen, ist mehr Kollektorfläche zur Erreichung des gleichen Deckungsgrades notwendig.

Um die benötigte Kollektorfläche zu ermitteln, wurde im ersten Schritt das zu simulierende Referenzsystem mit den Simulationsprogrammen Polysun und SHW_2012 abgebildet. In beiden Simulationsumgebungen wurden alle Parameter (z.B.: 6 m² Kollektorfläche, 300 Liter Speichervolumen, Dämmung, Regelungsparameter, Warmwasserbedarf, Klimadaten, usw.) gleich definiert, und anschließend das System simuliert.

Da es Abweichungen zwischen den ermittelten solaren Deckungsgraden der Referenzsysteme gegeben hat, wurden die zwei Simulationsumgebungen getrennt voneinander behandelt. Drain-Back-Systeme sowie Thermosiphon-Systeme können nur mit Polysun und nicht mit SHW_2012 abgebildet werden. Daher wurde die Kollektorfläche der auf Kunststoff basierenden Systeme (Drain-Back, Thermosiphonsystem mit Kunststoffkollektor) an den Deckungsgrad des jeweiligen Referenzsystems von Polysun angepasst. Hingegen können Systeme mit Überhitzungsschutz (Rückkühlfunktion, thermotrope Schicht) nur mit SHW_2012 abgebildet werden. Es wurden die Kollektorflächen der Kunststoffsysteme mit Überhitzungsschutz an den Deckungsgrad des jeweiligen Referenzsystems von SHW_2012 angepasst.

Anhand des Warmwasserbereitungssystems für ein Einfamilienhaus am Standort Graz soll diese Vorgehensweise bei der Ermittlung der Kollektorfläche für Kunststoffsysteme nochmals beschrieben werden.

Beginnend mit Polysun wurde im ersten Schritt das Warmwasserbereitungssystem mit 6 m² Kollektorfläche simuliert. Wie in Abbildung 6-9 ersichtlich, ergab sich ein solarer Deckungsgrad (SF_i) von etwa 73 Prozent. Im zweiten Schritt wurde die Kollektorfläche der auf Kunststoff

basierenden Drain-Back-Systeme variiert und wurden Simulationen durchgeführt (blaue Kurve). Ausgehend von den 73 Prozent solarer Deckung wurde eine horizontale Linie (violett gepunktet) gezogen und wurde der Schnittpunkt mit der blauen Kurve ermittelt. Projiziert man den Schnittpunkt vertikal nach unten auf die x-Achse, erhält man die benötigte Kollektorfläche (8,75 m²). Mit dieser ermittelten Kollektorfläche wurde das Warmwasserbereitungssystem in Kunststoffausführung simuliert und in weiterer Folge die Temperatur- und Druckbelastungen analysiert.

Dieses Prozedere wurde für die in SHW_2012 abgebildeten Systeme ebenfalls durchgeführt. Es wurde wiederum das Referenzsystem mit 6 m² Kollektorfläche simuliert und der solare Deckungsgrad, der definitionsgemäß dem von Polysun (SFi) entspricht, ermittelt (etwa 68 Prozent). Im zweiten Schritt wurde wiederum die Kollektorfläche der auf Kunststoff basierenden Systeme mit Überhitzungsschutz (Überhitzungsschutz durch Konvektion, thermotrope Schicht) variiert und Simulationen durchgeführt (orange, gelb). Ausgehend von den 68 Prozent solarer Deckung, wurde eine horizontale Linie (grün gepunktet) gezogen und der Schnittpunkt mit der grünen beziehungsweise mit der gelben Kurve ermittelt. Projiziert man die Schnittpunkte vertikal nach unten auf die x-Achse erhält man die benötigte Kollektorfläche (8,8 m² für Kunststoff-Systeme mit Konvektion, 9,8 m² für Kunststoff-Systeme mit thermotroper Schicht). Mit diesen ermittelten Kollektorflächen wurde das Warmwasserbereitungssystem in Kunststoffausführung simuliert und in weiterer Folge die Temperatur- und Druckbelastungen analysiert.

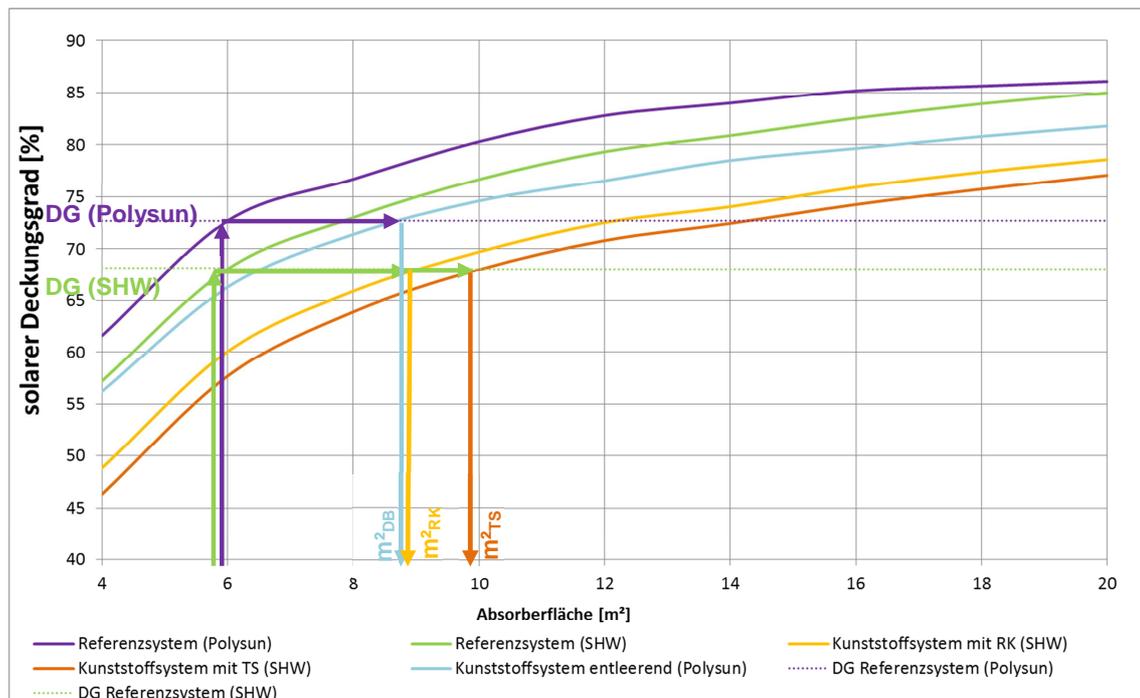


Abbildung 6-9: Ermittlung der benötigten Kollektorfläche für solarthermische Systeme in Kunststoffausführung am Beispiel „Warmwasserbereitung Einfamilienhaus“ am Standort Graz

Diese Prozedur wurde für alle Kunststoff-Systeme durchgeführt. In den nachfolgenden Tabellen 8 und 9 sind die so ermittelten Kollektorflächen sowie allgemeine Systemresultate wie Deckungsgrad und spezifischer Kollektorertrag zusammenfassend dargestellt. Hierbei wurde wieder eine Unterscheidung zwischen den simulierten Systemen mit Polysun und SHW_2012 gemacht.

Tabelle 8: Übersicht der Systemresultate der mit Polysun simulierten Systeme

		Graz			Athen1			Athen2			Pretoria		Fortaleza		Peking			
		WW-EFH	Kombi-EFH	WW-MFH	WW-EFH	Kombi-EFH	WW-MFH	WW-EFH	Kombi-EFH	WW-MFH	WW-EFH	WW-MFH	WW-EFH	WW-MFH	WW-EFH	Kombi-EFH	WW-MFH	Einheit
Referenz	Nettofläche	6	16	40	3,6	16,2	40	3,6	16,2	40	2,35	35	2,2	20	3,6	16	50	[m ²]
	Deckungsgrad	72,7	43,3	51,5	63,8	37,1	59,7	70,1	40,1	62	59,8	74,1	93,4	48,6	75,4	36,3	66,7	[%]
	spezifischer Solarertrag	438	275,9	553,8	544,7	306,7	566,1	616,8	332,7	590,2	844,1	826,5	770	591,6	476,1	290,6	575,6	[kWh/m ² a]
KS - DB	Nettofläche	8,75	24	55	-	14,7	38	-	17,7	44,5	-	39	-	38	-	14,4	46,5	[m ²]
	Deckungsgrad	72,7	43,4	51,7	-	37,2	59,7	-	40	62	-	74,1	-	48,6	-	36,3	66,7	[%]
	spezifischer Solarertrag	297,7	184,5	404	-	339,4	597,1	-	303,8	531,8	-	741,7	-	310,8	-	324,5	618,9	[kWh/m ² a]
KS - TS	Nettofläche	-	-	-	3,11	-	-	3,77	-	-	2,47	-	2,6	-	3,2	-	-	[m ²]
	Deckungsgrad	-	-	-	63,7	-	-	70,1	-	-	59,8	-	93,6	-	75,5	-	-	[%]
	spezifischer Solarertrag	-	-	-	629,7	-	-	590	-	-	805,3	-	739,8	-	544	-	-	[kWh/m ² a]

Die Bezeichnungen „KS-DB“ und „KS-TS“ in Tabelle 8 stehen für Kunststoffsysteme (KS) in Drain-Back-Ausführung (DB) sowie für Thermosiphon-Systeme (TS).

Tabelle 9: Übersicht der Systemresultate der mit SHW_2012 simulierten Systeme

		Graz			Athen1		Athen2		Pretoria	Fortaleza	Peking		
		WW-EFH	Kombi-EFH	WW-MFH	Kombi-EFH	WW-MFH	Kombi-EFH	WW-MFH	WW-MFH	WW-MFH	Kombi-EFH	WW-MFH	Einheit
Referenz	Nettofläche	6	16	40	16,2	40	16,2	40	35	20	16	50	[m ²]
	Deckungsgrad	68,1	45,6	46,8	35	60,6	37	63,8	81,2	48,6	32,8	68	[%]
	spezifischer Solarertrag	385,9	264,7	442,8	291,3	599,2	308,1	664	862,9	552,8	190,3	563,8	[kWh/m ² a]
KS - Konv.	Nettofläche	8,8	25	56	16,3	42	20	49	39	38	15,4	54	[m ²]
	Deckungsgrad	68,1	45,6	46,8	35	60,6	36,7	63,6	81,4	48,7	33,1	68	[%]
	spezifischer Solarertrag	263,3	169,4	315	290,2	599,2	253,4	540	776,6	290,7	199,3	563,1	[kWh/m ² a]
KS - TTS	Nettofläche	9,8	28	46,6	18,8	45	22,5	53	41,5	42	18,6	46,5	[m ²]
	Deckungsgrad	68,2	45,2	46,6	35,1	60,7	37,2	63,7	81,1	48,6	32,8	68	[%]
	spezifischer Solarertrag	236,3	149,7	286,5	251	559,4	222,3	499,7	727,3	262,5	163,2	522	[kWh/m ² a]

Die Bezeichnungen „KS-Konv.“ und „KS-TTS“ in Tabelle 9 stehen für Kunststoffsysteme (KS) mit Überhitzungsschutz durch Konvektion (Konv.) sowie für Überhitzungsschutz durch Einsatz einer thermotrope Schicht (TTS).

In der folgenden Abbildung werden die solarthermischen Systeme am Standort Graz anhand der Kollektorflächen über die Anwendungsgebiete verglichen.

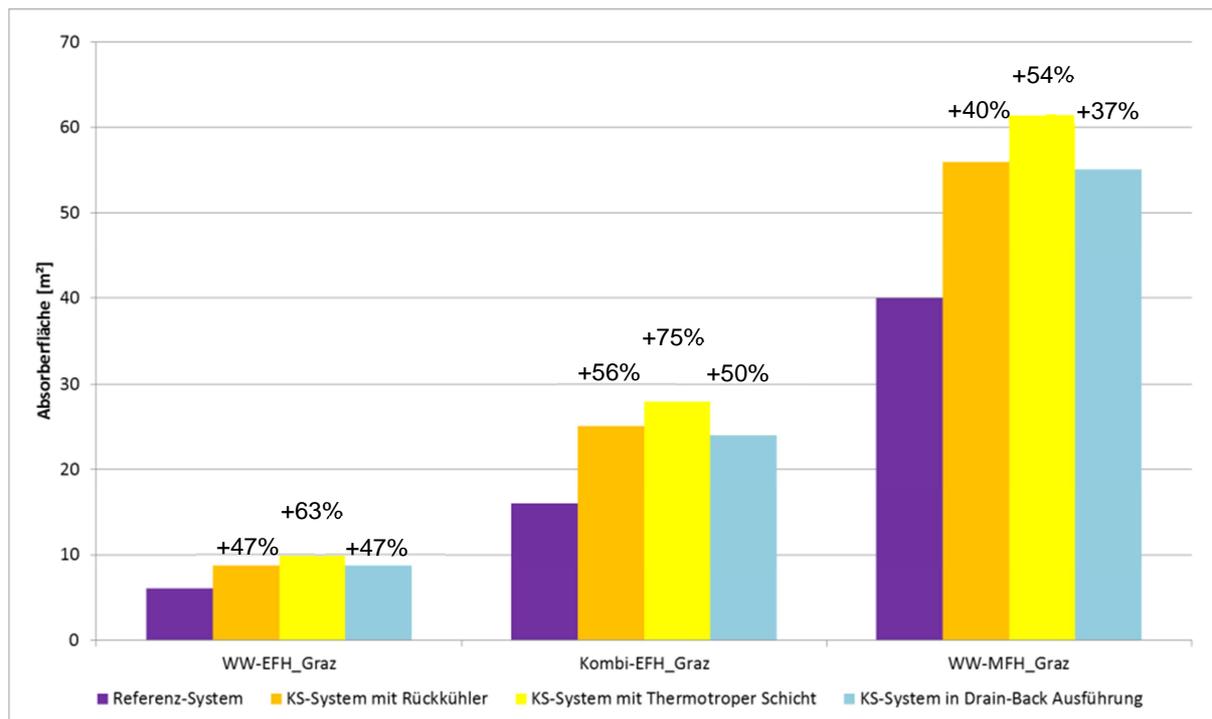


Abbildung 6-10: Vergleich der Kollektorflächen am Standort Graz

Anhand dieses Vergleiches sind die absolut benötigten Kollektorflächen und die Zunahmen in Prozent für in Kunststoff ausgeführte Systeme zu erkennen. Im Vergleich zu den Referenzsystemen am Standort Graz werden im Durchschnitt rund 50 Prozent mehr Kollektorfläche benötigt, um den Deckungsgrad des Referenzsystems zu erreichen. Die Grafik zeigt, dass die Systeme mit Rückkühlfunktion und die auf Kunststoff basierenden entleerenden Systeme (Drain-Back) in etwa dieselbe Kollektorfläche benötigen. Kunststoffsysteme mit einer thermotropen Schicht benötigen nochmals rund 10 Prozent mehr Kollektorflächen. Dies ist auf die schlechtere Kennlinie (siehe Abbildung 6-3) des Kunststoffkollektors mit thermotroper Schicht zurückzuführen. Diese Flächenverhältnisse sind an den anderen Standorten und bei den anderen Anwendungen nahezu gleich.

7 Temperaturbelastungen

Nach Abschluss der Definition der Referenzsysteme sowie der auf Kunststoff basierenden Systeme mit und ohne Überhitzungsschutz wird nun auf die Methodik zur Bestimmung der Temperaturhäufigkeiten eingegangen und werden ausgewählte Ergebnisse aus der Simulation abgebildet und analysiert. Abschließend werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Häufigkeitsauswertung der Temperaturbelastungen zusammenfassend dargestellt.

7.1 Methodik zur Bestimmung der Temperaturhäufigkeiten

In diesem Kapitel wird auf die Bestimmung der Temperaturhäufigkeiten im gefüllten und im ungefüllten Zustand eingegangen.

7.1.1 Gefüllter Zustand

Polysun und SHW_2012 liefern nach einer Jahressimulation eine Vielzahl von Stundenwerten bzw. detaillierteren Werten (SHW_2012). In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt in der Auswertung der Kollektortemperaturen und den Schicht-Temperaturen des jeweils verwendeten Speichers. Mit diesen Temperaturen wurden in Microsoft Excel Häufigkeitsauswertungen in den Klassen von -20 bis 200 °C in 5 Kelvin Schritten durchgeführt. Ausgewertet werden die Kollektortemperaturen vor Eintritt in den Kollektor, also die Temperaturen der solaren Rücklaufleitung, die Mittel- wie Austrittstemperatur aus dem Kollektor sowie die Temperaturen der solaren Vorlaufleitung in Richtung Wärmesenke (Speicher). Weiters wurden die Speichertemperaturen im unteren, mittleren und oberen Speicherbereich verglichen.

7.1.2 Ungefüllter Zustand

Unter einem „ungefüllten Zustand“ ist zu verstehen, dass sich im Kollektor kein Wärmeträgermedium befindet. Dieser Zustand tritt häufig bei der erstmaligen Installation von solarthermischen Systemen auf. Hierbei wird der Kollektor am Dach montiert, aber oftmals nicht sofort in Betrieb genommen.

Die Ermittlung der Kollektortemperaturen im ungefüllten Zustand können nicht direkt aus Polysun ermittelt werden, da dieses nur den gefüllten Zustand abbilden kann. Mit Hilfe der Kollektorkennlinie, die im Abschnitt 2.2.3 erläutert wurde, kann die Stagnationstemperatur im ungefüllten Zustand näherungsweise ermittelt werden. Setzt man η_{Koll} der Gleichung 2-7 gleich Null und löste man die quadratische Gleichung nach der mittleren Flüssigkeitstemperatur $\bar{T}_{\text{Abs.,fl}}$ auf, erhält man die folgende Gleichung 6.2.

$$\bar{T}_{Abs,fl12} = T_a - \frac{c_1 \pm \sqrt{c_1^2 - 4 \cdot c_2 \cdot c_0 \cdot I_g}}{2 \cdot c_2} \quad (\text{Gl. 7-1})$$

Mit den Stundenwerten der Klimadaten aus Polysun (Globalstrahlung in Kollektorebene sowie Umgebungstemperatur), kann der ungefüllte Anlagenzustand für jede Stunde näherungsweise berechnet und eine Häufigkeitsauswertung gleich jener im gefüllten Zustand durchgeführt werden.

Der ungefüllte Zustand kann nach Gleichung 7-1 ohne Überhitzungsschutz ermittelt werden. Eine Ausnahme bildet das System mit Rückkühler. Da kein Medium zirkuliert, kann auch keine Wärme über den Rückkühler abgeführt werden. Die Stagnationstemperatur des Systems mit Rückkühler im ungefüllten Zustand entspricht jener ohne Überhitzungsschutz.

Die Temperaturhäufigkeiten eines Kollektors mit Hinter-Lüftung beziehungsweise mit thermotroper Schicht im ungefüllte Zustand können nicht durch Null setzen der Kollektorkennlinie berechnet werden, da der Korrekturfaktor von der zu berechnenden Kollektortemperatur abhängig ist und werden daher in dieser Arbeit nicht betrachtet.

7.2 Ergebnisse der Temperaturbelastungen

Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Ergebnisse aus der Simulation mit Polysun und SHW_2012 abgebildet und analysiert. Dazu wurden Temperaturklassen von –20 bis 205 °C in 5 Kelvin Schritten aufgestellt und die relevanten Temperaturreihen (Speichertemperaturen, Kollektortemperaturen) anhand dieser Klassen ausgewertet.

7.2.1 Temperaturbelastungen des Referenzsystems zur Warmwasserbereitung am Standort Graz

Die Gesamtansicht der Systemtemperaturhäufigkeiten des Referenz Systems zur Warmwasserbereitung stellt die vier Häufigkeitsverteilungen der Temperaturen des solaren Primärkreises sowie die drei Häufigkeitsverteilungen der Temperaturen im verwendeten Speicher dar.

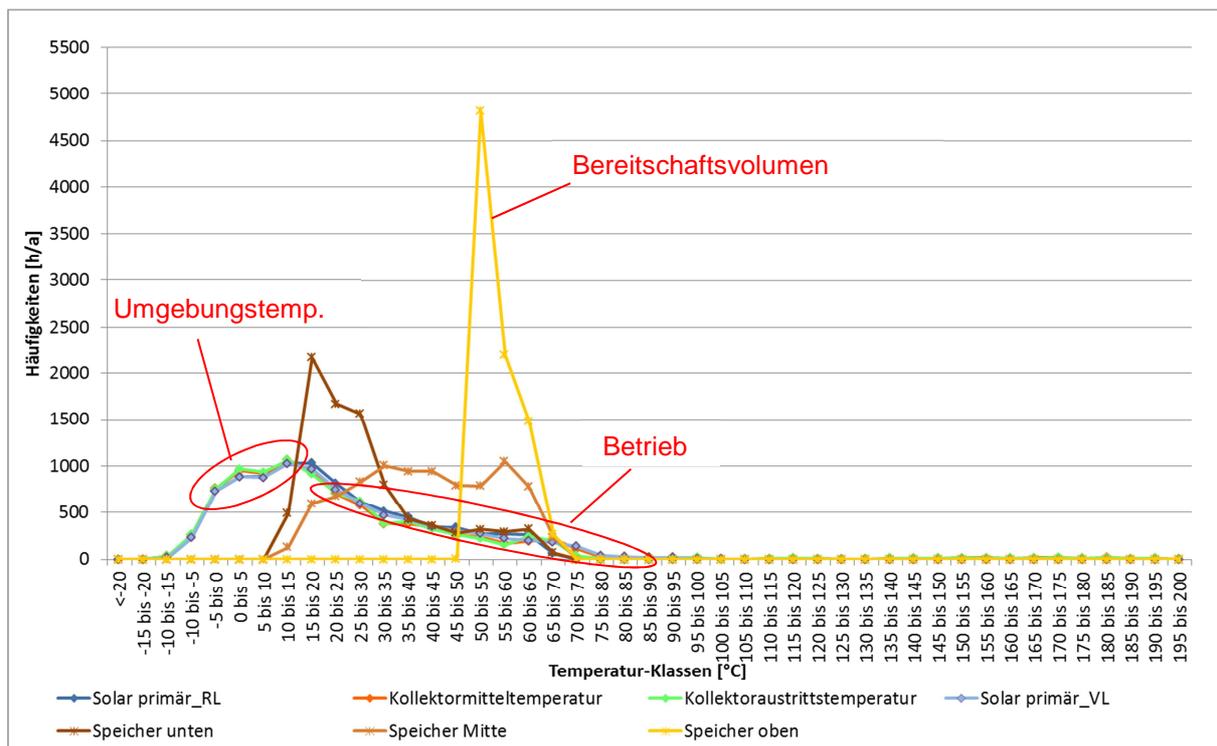


Abbildung 7-1: Systemtemperaturhäufigkeiten des Referenz WW-Systems am Standort Graz

Beginnend mit dem solaren Primärkreis ist klar die Korrelation zwischen Außenlufttemperatur (-20 bis etwa 20 °C) und den sich im Freien befindlichen Systemkomponenten (Kollektor und Rohrleitungen) zu erkennen. Die Temperaturhäufigkeiten an dieser Stelle, sind durch den Stillstand der Anlage in den Nachtstunden geprägt.

Betrachtet man nun die Temperaturbelastungen des Speichers, so erkennt man einen ersten Peak der Schicht „Speicher unten“ in den Temperaturklassen von 15 bis 20 °C. Diese hohe Häufigkeit ist durch die Kaltwassertemperatur (11 bis 15 °C) und die Wärme, die über das Wasser von oben übertragen wird, zurückzuführen.

Die Schicht „Speicher Mitte“ bildet das ganze Spektrum von wenigen Stunden bei Kaltwassertemperatur bis wenige Stunden in der Klasse 65 bis 70 °C ab. Durch Zapfungen werden die Temperaturschichten im Speicher durchmischt, wodurch sich annähernd konstante Häufigkeiten in den Klassen zwischen 20 und 65 °C ergeben.

Die Schicht „Speicher oben“ stellt die Temperaturverteilung im Bereitschaftsvolumen dar. Eine E-Patrone, die ein Einschaltsignal ab einer Solltemperatur von 50 °C und ein Ausschaltsignal bei 55 °C (Hysterese 5 Kelvin) erhält, definiert die Klasse in der sich die meisten Häufigkeiten befinden.

Die Systemtemperaturen während des Betriebes, in dem die Voraussetzungen für eine solare Beladung des Warmwasserspeichers erfüllt sind, liegen in etwa im Bereich 25 bis 130 °C. Mit zunehmender Temperatur setzt eine Dampfbildung bei gegebenem Systemdruck von 1,5 bar im Kollektor ein. Auf die Temperaturbelastungen bei Stagnation, welche über den genannten

130 °C auftreten und der Kollektor den höchsten Belastungen ausgesetzt ist, wird in der folgenden Detail-Ansicht der Systemtemperaturhäufigkeiten des Referenz WW-Systems am Standort Graz eingegangen.

Die folgende Abbildung zeigt eine vergrößerte Ansicht der Häufigkeitsverteilungen der diversen Systemtemperaturen im Bereich der Stagnation.

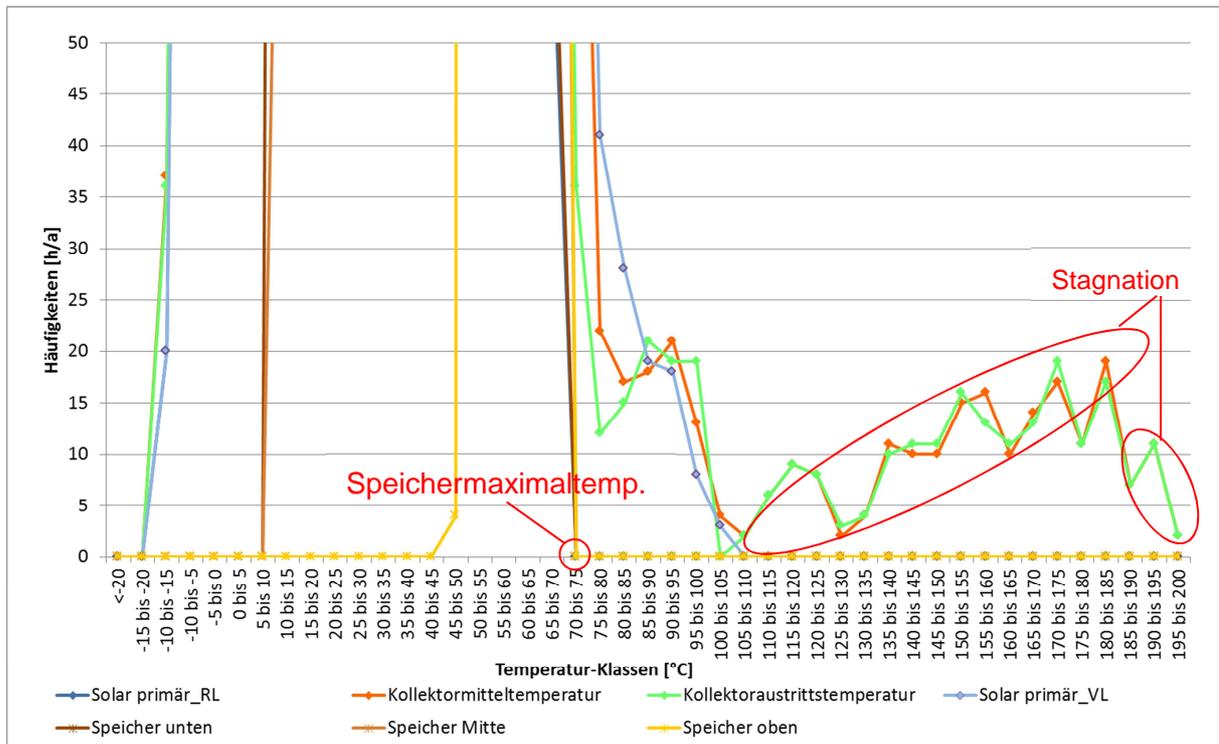


Abbildung 7-2: Systemtemperaturhäufigkeiten des Referenz WW-Systems am Standort Graz; „Zoom“

Als Stagnation wird wie bereits erwähnt jener Zustand bei thermischen Solaranlagen bezeichnet, bei dem es bei gleichzeitig hoher Einstrahlung und Stillstand der Solar-Pumpe zur Verdampfung des Wärmeträgers im Kollektor kommt. Aus dem Betriebszustand heraus können die Mediums-Temperaturen im flüssigen Zustand ca. 130 °C erreichen. Darüber hinaus setzt die Verdampfung bei einem vorhandenen Betriebsdruck von 1,5 bar im Kollektor ein.

Es ist zu erkennen, dass durch den hoch selektiv-beschichteten Kollektor Stunden-Häufigkeiten bis in der Temperaturklasse 195 bis 200 °C auftreten. Diese hohen Temperaturen werden jedoch nur bei gleichzeitig hoher Einstrahlung und hoher Außenlufttemperatur erreicht und weisen daher nur eine Häufigkeit von weniger als fünf Stunden verteilt auf das Jahr auf. Durch die hohe Bandbreite der auftretenden Einstrahlung und Außenlufttemperatur treten vermehrt Stagnationstemperaturen in den niedrigeren Temperatur-Klassen (100 bis 190 °C) auf.

Die auftretenden Jahresstunden werden in den folgenden Abbildungen dargestellt, indem die Stundenwerte der einzelnen Temperatur-Häufigkeitsklassen beginnend mit der höchsten addiert werden.

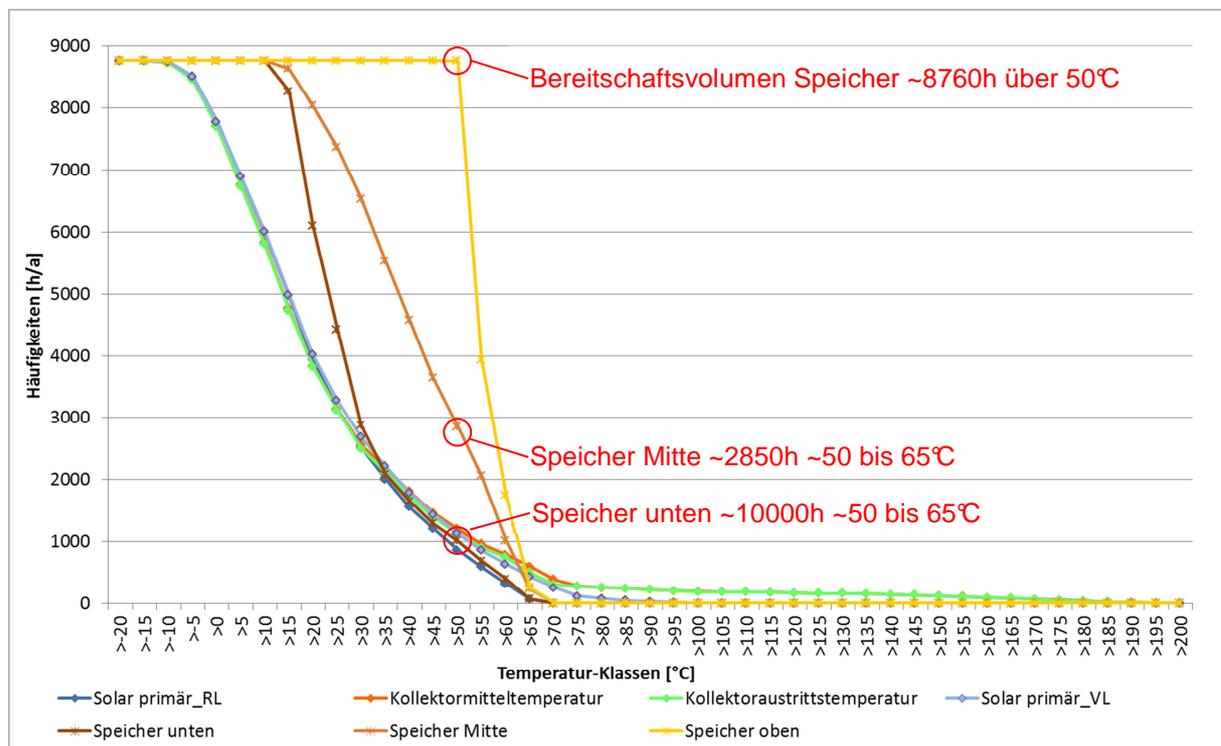


Abbildung 7-3: Summenhäufigkeiten der Systemtemperaturen des Referenz WW-Systems am Standort
Graz

In diesem Diagramm sind die Jahres-Häufigkeiten in den drei Speicherschichten gut zu erkennen. Es ist klar ersichtlich, dass beispielsweise die Temperatur des Bereitschaftsvolumens (Speicher oben), durch die Nachheizung das ganze Jahr über 50 °C Solltemperatur gehalten wird. Ebenfalls liegen die Häufigkeitswerte der beiden unterhalb liegenden Schichten (Speicher Mitte und Speicher unten) mit rund 2900 Stunden sowie rund 1000 Stunden über dem Temperaturbereich von 50 °C.

Auf die Summenhäufigkeiten der weiteren betrachteten Systemkomponenten wird in der folgenden vergrößerten Abbildung 7-4 eingegangen.

Interpretiert man nun den Verlauf der Kollektormitteltemperatur, so lässt sich die Aussage treffen, dass der Kollektor rund 190 Stunden im Jahr mit Temperaturen über 100 °C belastet wird und diesen standhalten muss. Konventionelle, aus Metall gefertigte Kollektoren können bedenkenlos diesen auftretenden Temperaturen ausgesetzt werden. Bei Einsatz von Kunststoffen müsste auf langfristig temperaturresistente Hochleistungspolymere zurückgegriffen werden.

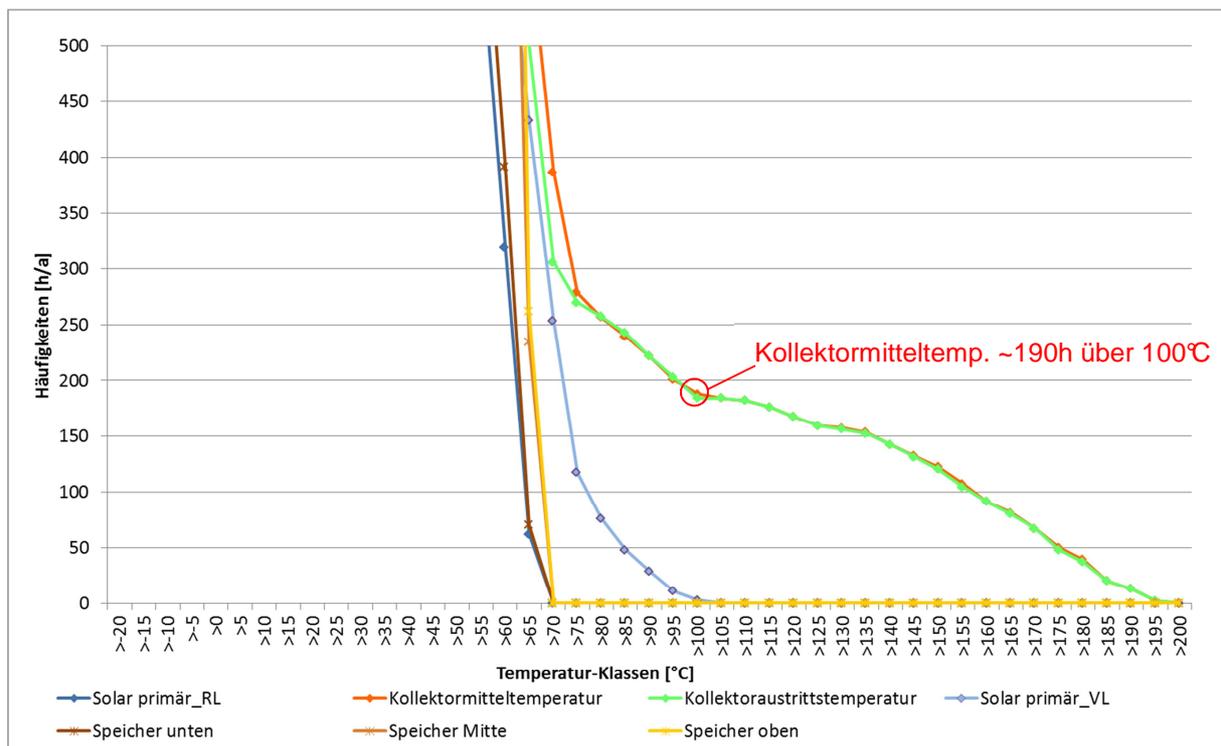


Abbildung 7-4: Summenhäufigkeiten der Systemtemperaturen des Referenz WW-Systems am Standort Graz; „Zoom“

7.2.2 Temperaturbelastungen der Kunststoffsysteme zur Warmwasserbereitung am Standort Graz

Im Abschnitt 7.2.1 wurden die einzelnen Komponententemperaturen (Kollektor, Rohrleitungen, Speicher) und die auftretenden Häufigkeiten des Referenzsystems zur Warmwasserbereitung am Standort Graz detailliert analysiert. In diesem Abschnitt werden nun die Belastungen der Kollektormitteltemperaturen der auf Kunststoff basierenden Systeme mit (Rückkühlfunktion RK, thermotrope Schicht TS) und ohne Überhitzungsschutz (Drain-Back-System), mit dem Referenzsystem verglichen.

Die folgende Abbildung 7-5 stellt die Häufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen über ein Jahr dar.

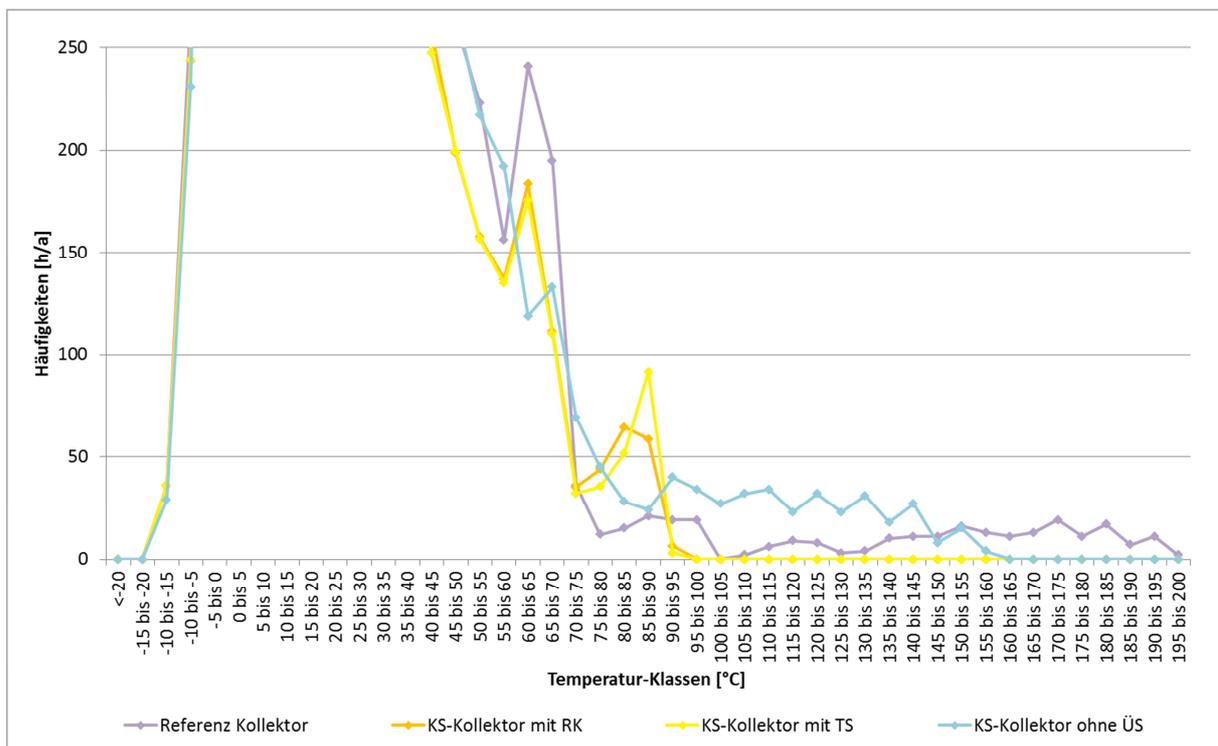


Abbildung 7-5: Vergleich der Kollektormitteltemperaturhäufigkeiten des WW-Systems mit und ohne Überhitzungsschutz am Standort Graz; „Zoom“

Unter Zugrundelegung der erhobenen Kollektormitteltemperaturen lässt sich in Abbildung 7-5 feststellen, dass Kunststoffsysteme ohne Überhitzungsschutz am Standort Graz etwa 165 °C Stagnationstemperaturen und mit Überhitzungsschutz rund 90 °C erreichen. Dadurch kann das gesamte Spektrum von Standard-Polymeren bis Hochleistungs-Polymeren eingesetzt werden. Soll die Herstellung des Kollektors (speziell der Absorber) auf ein günstiges Ausgangsmaterial wie beispielsweise Polypropylen (<3€/kg) ausgelegt werden, so muss auf einen Überhitzungsschutz (Rückkühlprinzip (aktiv) bzw. thermotrope Schicht (passiv)) zurückgegriffen werden.

7.2.3 Vergleich der Temperaturbelastungen von Kunststoffsystemen anhand der Anwendungsgebiete am Standort Graz

In der nachfolgenden Abbildung 7-6 sind die Temperaturhäufigkeiten der mittleren Kollektortemperaturen anhand der Summenhäufigkeit dargestellt. Diese Darstellungsform eignet sich am besten für eine Auswahl möglicher einsetzbarer Polymerwerkstoffe.

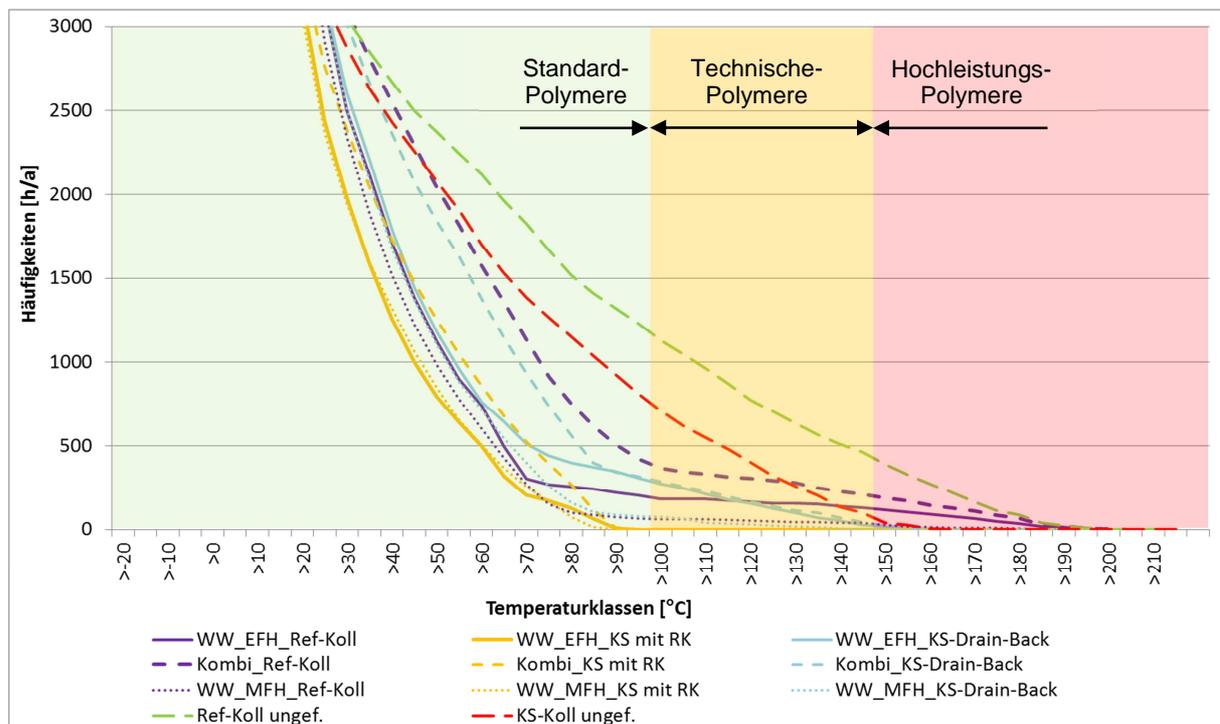


Abbildung 7-6: Vergleich der Summenhäufigkeiten der Kollektormitteltemperatur von Referenz und Kunststoffsystemen anhand der Anwendungsgebiete am Standort Graz

Vergleicht man die Temperaturbelastungen und Häufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen über die Anwendungsgebiete (Warmwasserbereitung EFH/MFH, Kombi-Systeme), so lässt sich sagen, dass solarthermische Anlagen zur teilsolaren Heizungsunterstützung am häufigsten hohen thermischen Belastungen ausgesetzt sind. Daraus ist zu schließen, dass die betrachteten Kombi-Systeme am Standort Graz durch den geringeren Energiebedarf in den Sommermonaten (keine Heizungsunterstützung) öfter in Stagnation gehen als Systeme zur alleinigen Warmwasserbereitung.

Betrachtet man die auf Kunststoff basierenden Systeme mit Rückkühlfunktion (KS mit RK), lässt sich erkennen, dass das Anwendungsgebiet (WW_EFH, Kombi, WW_MFH) keinen Einfluss auf die maximal erreichten Temperaturbelastungen (rund 90 °C) im Kollektor hat. Um das Diagramm nicht zu überladen, wurde auf die Darstellung der Kunststoffsysteme mit thermotroper Schicht verzichtet, da sie wie in Abbildung 7-5 ersichtlich war, keine wesentlichen Abweichungen der Häufigkeiten von jenen mit Rückkühlfunktion aufweisen.

Weiters sind in diesem Diagramm die Summenhäufigkeiten der Drain-Back-Systeme in Kunststoff-Ausführung sowie der ungefüllte Kunststoffkollektor für den Referenzstandort Graz abgebildet. Man erkennt, dass die Kollektormitteltemperaturen in beiden Fällen etwa 160 °C erreichen.

Anhand der färbig hinterlegten Bereiche (Klassifizierung der Polymerwerkstoffe (Pyramide) siehe Kapitel 3), kann man den Kunststoffsystemen eine Klasse der verwendbaren Polymere

zuteilen. Entleerenden Systeme müssen auf Hochleistungspolymere zurückgegriffen. Während in Kunststoff Systemen mit Überhitzungsschutz (Rückkühlfunktion, thermotrope Schicht) im gefüllten Zustand Standard Polymere einsetzbar wären, muss man die Materialanforderungen eines Kollektors im ungefüllten Zustand anhand des Rückkühlprinzips differenziert betrachten. Ist der Kunststoffkollektor mit nachgeschaltetem Rückkühler ungefüllt, zirkuliert kein Medium, wodurch auch keine Wärme über den Rückkühler abgeführt werden kann. Die Temperaturhäufigkeiten sowie die maximal erreichbare Kollektormitteltemperatur des Systems mit Rückkühler entsprechen demnach jenen des ungefüllten Kollektors. Kann genügend Luft über den Absorber strömen (ECO-Flare Prinzip siehe Kapitel 3.2.1) wird der Kollektor gekühlt.

Bei Kollektor mit einer thermotropen Schicht wird der Transmissionskoeffizient mit zunehmender Temperatur verringert, unabhängig davon ob sich Wärmeträgermedium im Absorber befindet oder nicht. Die Temperaturhäufigkeiten der Systeme mit thermotroper Schicht beziehungsweise mit Hinterlüftung im ungefüllten Zustand werden in dieser Arbeit nicht betrachtet, jedoch steigen die maximal Temperaturen nicht über 90 °C. Demzufolge können für diese beiden Varianten Standardpolymere in der Kollektorherstellung eingesetzt werden.

7.2.4 Temperaturbelastungen des Zweikreis-Thermosiphonsystems zur Warmwasserbereitung am Standort Athen

In diesem Abschnitt werden beispielhaft die Ergebnisse des in Polysun simulierten Zweikreis Thermosiphonsystems zur Warmwasserbereitung mit dem Referenzkollektor Athen 1 dargestellt. Dieser Vergleich soll repräsentativ für die Vorgehensweise bei Thermosiphon-Systemen und die Bestimmung der Temperaturhäufigkeiten der Systemkomponenten stehen.

Die folgende Abbildung zeigt die auftretenden Temperaturhäufigkeiten des Zweikreis Thermosiphonsystems am Standort Athen.

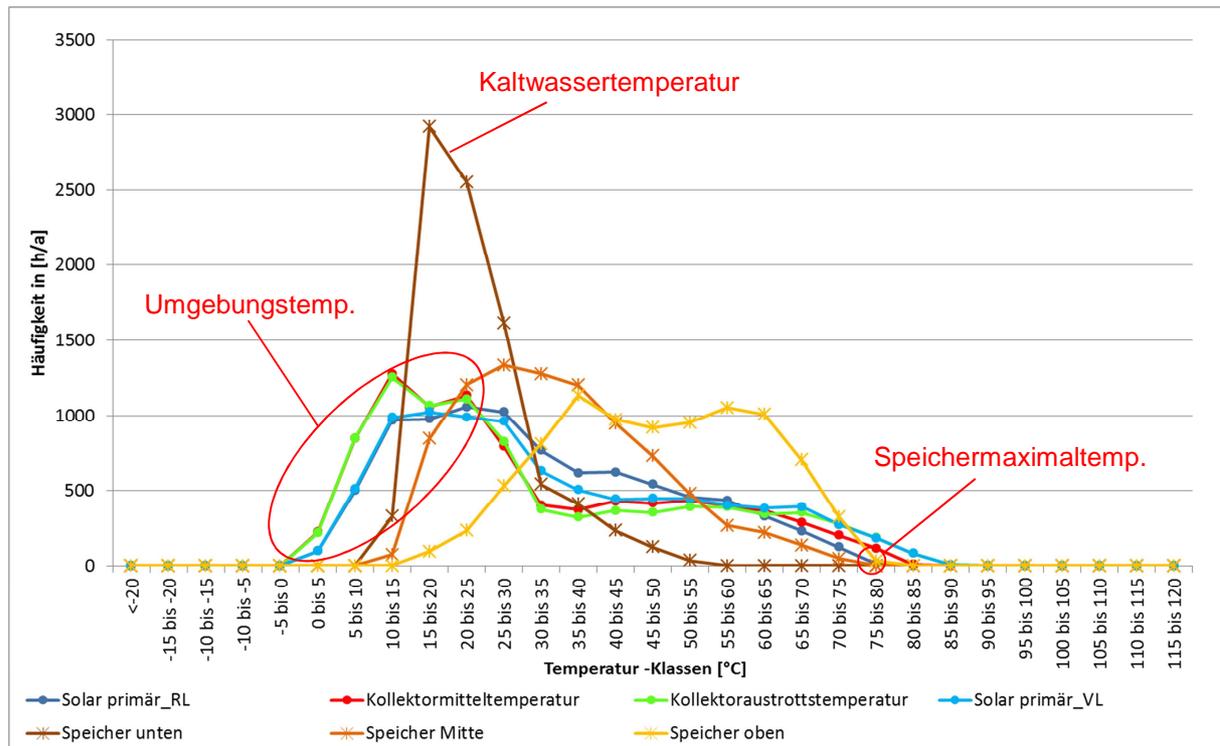


Abbildung 7-7: Systemtemperaturhäufigkeiten des Zweikreis WW-Thermosiphon Systems am Standort Athen (Athen1)

In der Gesamtansicht der ausgewählten Systemtemperaturen des Thermosiphon-Systems sind im Vergleich zu den Zwangsumlauf-Systemen durchaus unterschiedliche Verläufe der Temperatur-Häufigkeiten zu erkennen.

Betrachtet man im ersten Schritt die Speicherschicht-Temperaturen, erkennt man klar den Einfluss der Kaltwassertemperatur (rund 15 bis 21 °C für Athen) auf die Häufigkeitsverteilung in der untersten betrachteten Schicht (Speicher unten).

Die Schichten in der Mitte beziehungsweise im oberen Abschnitt des Speichers erreichen Temperaturen bis rund 80 °C, was um circa 10 Kelvin über jenen der gepumpten Warmwasserbereitungssysteme mit Trinkwasser-Speichern liegt. Dies ist auf die fehlende Temperaturbegrenzung und Eingriffsmöglichkeit in die Zirkulation (Naturzirkulation) des Wärmeträgers durch eine Regelung zurückzuführen.

Die niedrigen Temperaturen sind nicht ausschließlich auf die schlechte Kennlinie des mit Solarlack beschichteten Kollektors (Athen1) zurückzuführen, der in einem gepumpten System (Kombi-System Athen) durchaus Temperaturen bis etwa 140 °C erreicht. Vielmehr spielt der generelle Aufbau des Systems eine entscheidende Rolle.

Unter der Voraussetzung, dass ein täglicher konstanter Warmwasserbedarf von 150 Litern gegeben ist, kommt es in der Regel nicht zu Temperaturen über 100 °C im Kollektor. Wird der Bedarf auf Null reduziert, kann in folgender Abbildung die Häufigkeitsverteilung der Kollektortemperaturen im Vergleich zum System mit regelmäßigem Warmwasserverbrauch abgelesen werden.

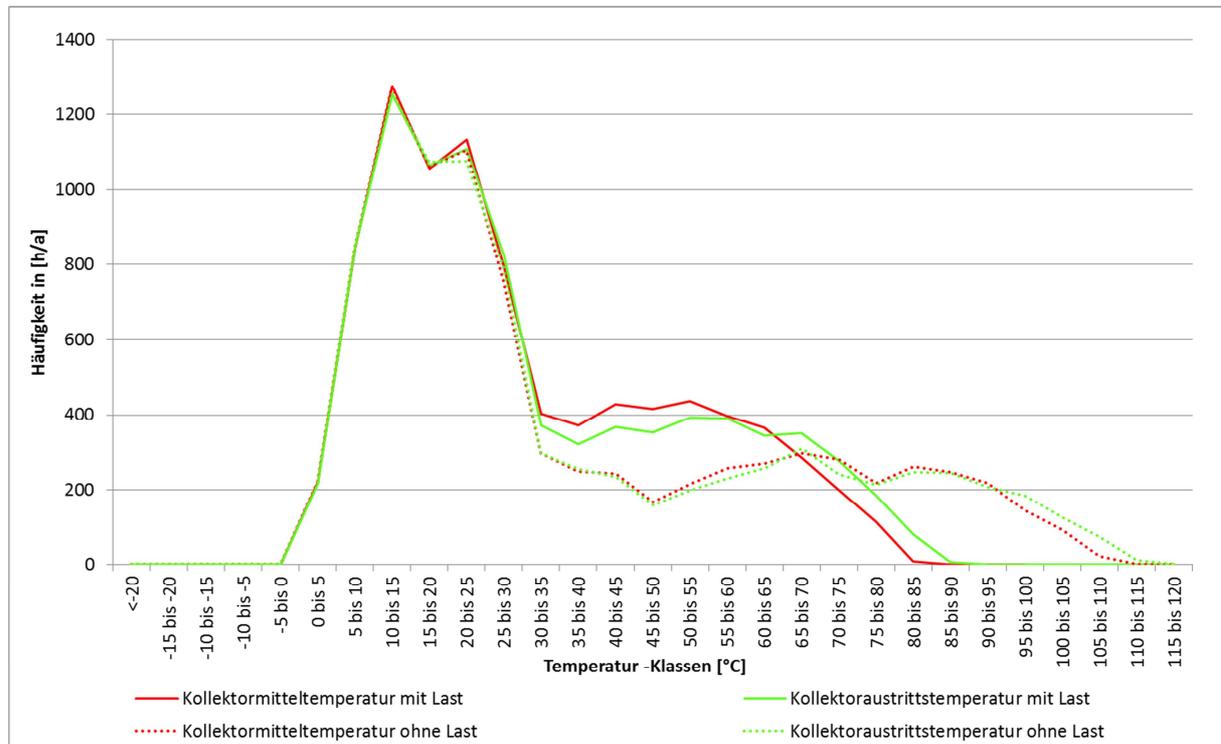


Abbildung 7-8: Temperaturhäufigkeiten im Warmwasserbereitungs-Thermosiphon System mit Referenzkollektor Athen1, mit und ohne Warmwasserbedarf an Standort Athen

Durch das Zweikreisprinzip befindet sich einerseits ein Wasserfrostschutz-Gemisch im Solarkreislauf und andererseits hängt der Speicher direkt am Wasserkreislauf. Diese zwei Medien haben bei selbem Druck unterschiedliche Siedetemperaturen. Im Mantelwärmetauscher befindet sich ein Luftpolster, der wie ein Ausdehnungsgefäß fungiert und die Volumsänderung durch die Wärmedehnung aufnimmt und den Druck dadurch stabil hält. Der Wasserkreislauf wird über ein Sicherheitsventil ohne Ausdehnungsgefäß vor zu hohen Drücken geschützt. Eine Volumsänderung durch die Wärmedehnung im Wasserkreislauf bewirkt bei Erreichen des Ansprechdruckes des Sicherheitsventiles ein Abblasen des heißen Wassers. Gleichzeitiges wird der Speicher über die Kaltwasserleitung nachspeist. Dadurch wird der Kollektor indirekt immer wieder mit kaltem Wasser versorgt und es kommt zu keiner Dampfbildung; die Temperaturen im Solarkreislauf erreichen maximal rund 115 °C.

In der folgenden Grafik sind die Systemtemperaturhäufigkeiten des Warmwasser-Systems mit konstantem Warmwasserbedarf am Standort Athen in Form der Summenhäufigkeit dargestellt.

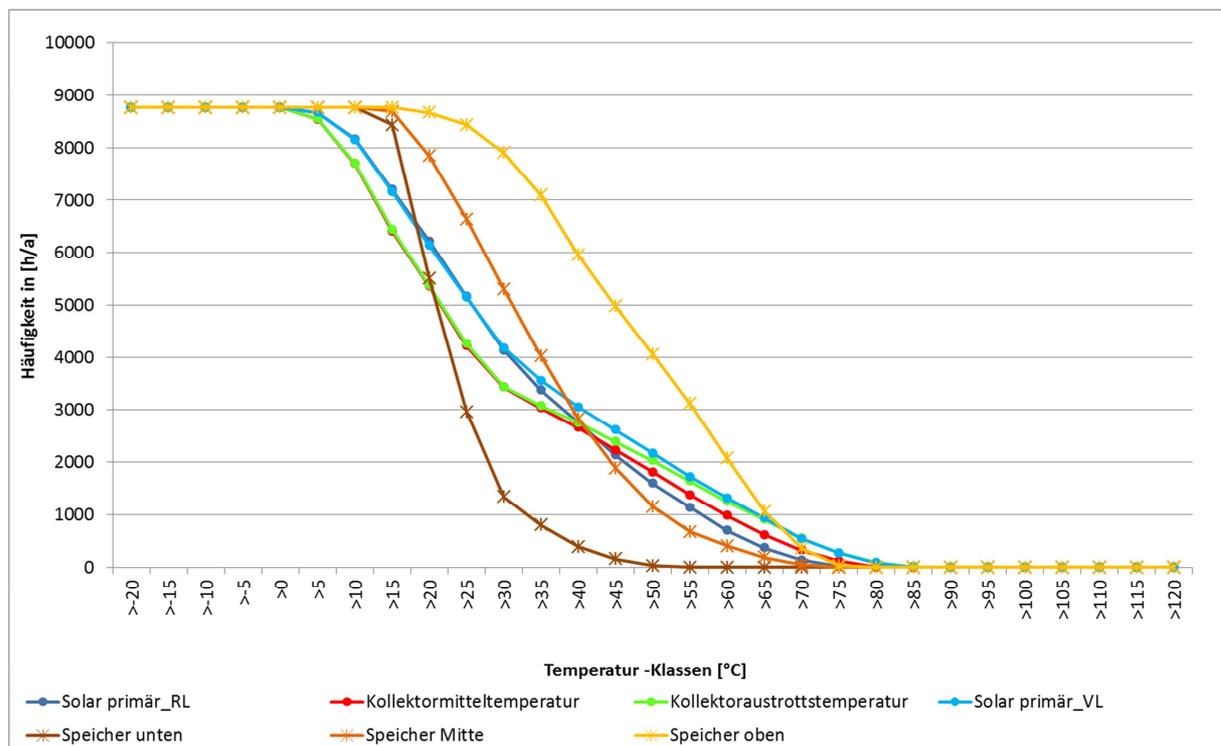


Abbildung 7-9: Summenhäufigkeiten der Systemtemperaturen des WW-Thermosiphon Systems am Standort Athen (Athen1)

In dieser Darstellung der Speichertemperaturen ist anhand des Verlaufes der obersten Speicherschicht zu erkennen, dass im Thermosiphonsystem am Standort Athen kein Bereitschaftsvolumen permanent auf Solltemperatur (60 °C) gehalten wird. Die Brauchwassersolltemperatur wird wie es im Anlagenschema (Thermosiphon-System Zweikreissystem) abgebildet ist, durch einen nachgeschalteten, elektrischen Durchlauferhitzer erreicht.

7.2.5 Vergleich der Temperaturbelastungen von Kunststoff-Thermosiphonsystemen zur Warmwasserbereitung an den verschiedenen Referenzstandorten

Von besonderem Interesse sind im Hinblick auf die Leistungsanforderungen von Polymermaterialien in solarthermischen Systemen die Verläufe und die Häufigkeiten der mittleren Kollektortemperaturen. Die folgende Abbildung 7-10 zeigt die mit Polysun simulierte, und danach mit Excel ausgewertete Temperaturhäufigkeiten der Thermosiphonsysteme auf Kunststoffbasis zur Warmwasserbereitung an den Standorten Athen, Pretoria, Fortaleza und Peking. KS-Athen1 steht in dieser Abbildung beispielsweise für das Thermosiphonsystem auf Kunststoffbasis, das mit seiner Kollektorfläche auf den Deckungsgrad des Referenzsystems mit dem Referenzkollektor Athen 1 aufbaut. Bis auf das Einkreis-Thermosiphonsystem in Fortaleza

sind alle anderen dargestellten Systeme nach dem Zweikreis-Prinzip aufgebaut. Warum das der Fall ist wurde bereits im Kapitel 4.2 erwähnt.

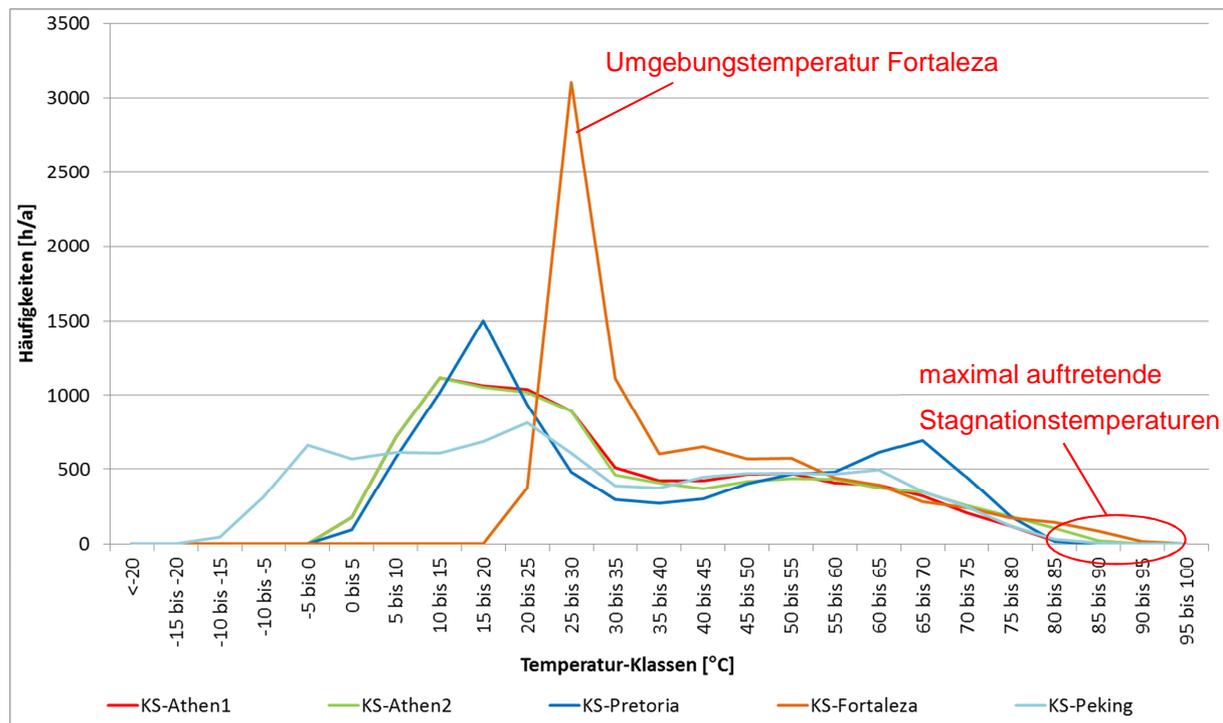


Abbildung 7-10: Häufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen von Thermosiphon-Systemen auf Kunststoffbasis an den Standorten Athen, Pretoria, Fortaleza und Peking

Auffallend ist die hohe Häufigkeit der Kollektormitteltemperatur des Thermosiphonsystems von Fortaleza in der Klasse 25 bis 30 °C. Dies ist auf die Umgebungstemperatur in Fortaleza zurückzuführen die im Mittel bei rund 27 °C liegt. Wesentlicher für Thermosiphonsysteme auf Kunststoffbasis sind jedoch die Temperaturen in den oberen Klassen, um eine entsprechende Materialauswahl für die Herstellung der Kollektoren treffen zu können. Wie an den Kollektormitteltemperaturen zu erkennen ist, überschreiten diese bei einer gesicherten Warmwasserentnahme nicht die 100 °C Marke. In Abbildung 7-9 war jedoch ersichtlich, dass die Temperaturen bei einer fehlenden Entnahme um die 115 °C erreichen können. Das bedeutet für die Auswahl von geeigneten Kunststoffen, dass bei gefüllten Thermosiphonsystemen zumindest Technische Polymere in der Kollektorfertigung zum Einsatz kommen müssen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sofern eine gesicherte Wasserentnahme vorliegt die Systemkomponenten mit deutlich niedrigeren Maximaltemperaturen im Vergleich zum gepumpten Warmwasserbereitungssystem (z.B. in Graz) belastet werden. Diese Erkenntnis hilft bei der Auswahl der entsprechenden Polymerwerkstoffe.

7.2.6 Vergleich der Temperaturbelastungen des Kunststoffkollektors im ungefüllten Zustand an den verschiedenen Referenzstandorten

Die Temperaturbelastungen des Kunststoffkollektors im ungefüllten Zustand können wie bereits erwähnt durch Null-Setzen der Wirkungsgradkennlinie mit den Klimadaten des entsprechenden Standortes (Einstrahlung auf geneigte⁴ Kollektorfläche, Umgebungstemperatur) berechnet werden. In der nachfolgenden Abbildung 7-11 sind die Summenhäufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen des Kunststoffkollektors im ungefüllten Zustand an den Referenzstandorten dargestellt.

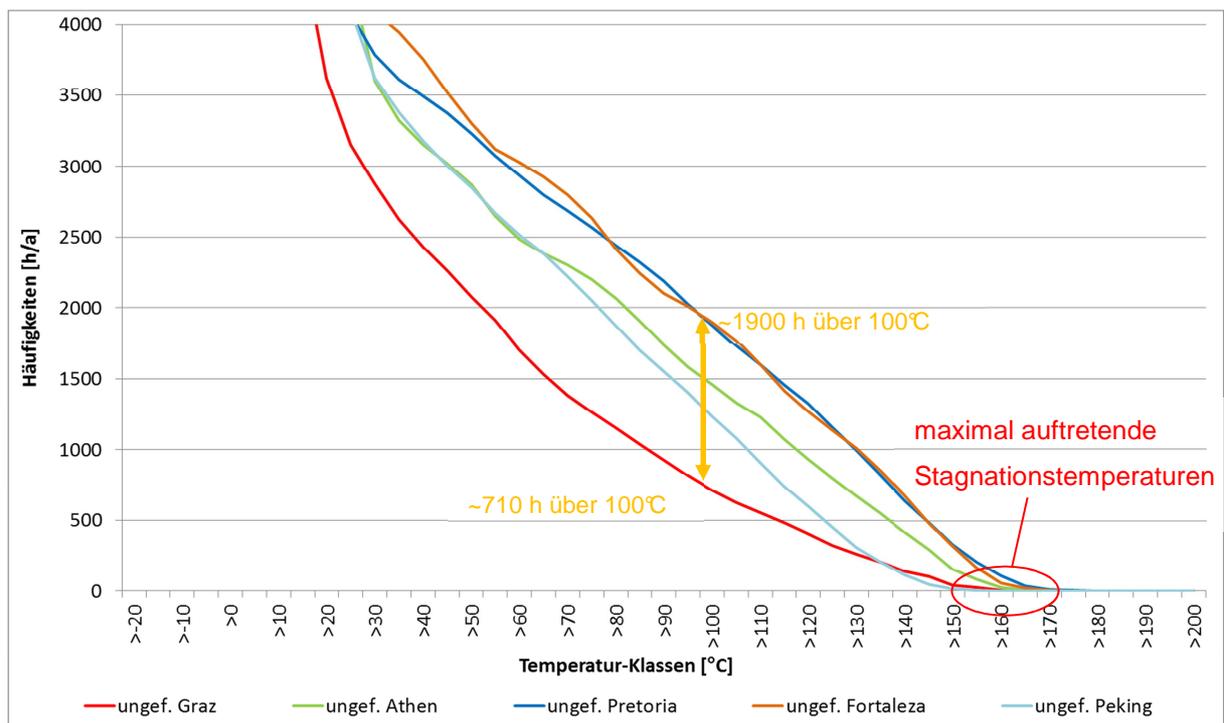


Abbildung 7-11: Summenhäufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen des Kunststoffkollektors im ungefüllten Zustand an den Referenzstandorten

Um beispielsweise die Alterungseigenschaften von Polymerwerkstoffen für die jeweiligen Standorte bestimmen zu können (Teil des Projektes SolPol1 Arbeitspaket 2), benötigt man sowohl die klimatischen Rahmenbedingungen als auch die Temperaturbelastungen, denen der Kunststoff ausgesetzt wird. In der Abbildung 7-11 ist neben der maximalen Stagnationstemperatur die zwischen rund 155 °C (Peking) und 175 °C (Fortaleza, Graz) schwankt, auch die Bandbreite bei einer Temperaturbelastung über 100 °C zu erkennen. Graz liegt mit seiner Häufigkeit von rund 710 Stunden über 100 °C weit unter jener von Pretoria und Fortaleza (1900 Stunden über 100 °C)

⁴ Die Neigung der Kollektorfläche entspricht dem jeweiligen Breitengrad des Standortes

7.3 Zusammenfassung der Temperaturbelastungen

Nachdem alle Referenzsysteme und auf Kunststoff basierenden Systeme mit und ohne Überhitzungsschutz simuliert wurden, werden signifikante Werte (Minima, Maxima) und Häufigkeitsverteilung der Kollektormitteltemperaturen im gefüllten und ungefüllten (ungef.: ganzjährig leerer, nicht mit Flüssigkeit gefüllter Kollektor) Zustand zusammenfassend dargestellt. Diese Werte stellen die wichtigsten Ergebnisse im Rahmen der durchgeführten Ermittlung der Systemtemperaturen für die weitere Entwicklung von Kollektoren in Kunststoffausführung dar. In der nachfolgenden Tabelle 10 sind die Ergebnisse für die Referenzstandorte angeführt.

Tabelle 10: Häufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen an den Referenzstandorten

		min	<0	0 bis 75	75 bis 100	100 bis 125	125 bis 150	150 bis 175	175 bis 200	>200	max		
		[°C]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[h/a]	[°C]		
Graz	WW_EFH	Referenz Koll.	-17	1059	7431	86	25	39	72	48	0	199	
		KS Koll mit RK	-21	1125	7462	173	0	0	0	0	0	92	
		KS Koll mit TS	-21	1129	7450	182	0	0	0	0	0	91	
		KS Koll DB	-21	978	7337	171	148	107	19	0	0	159	
	Kombi	Referenz Koll.	-17	1054	6791	547	73	106	101	86	2	201	
		KS Koll mit RK	-21	1123	7243	394	0	0	0	0	0	92	
		KS Koll mit TS	-21	1128	7230	402	0	0	0	0	0	91	
		KS Koll DB	-21	970	7047	455	149	116	23	0	0	165	
	WW_MFH	Referenz Koll.	-17	1058	7550	92	11	20	21	8	0	167	
		KS Koll mit RK	-21	1124	7465	172	0	0	0	0	0	90	
		KS Koll mit TS	-21	1128	7446	186	0	0	0	0	0	94	
		KS Koll DB	-21	975	7524	186	54	21	0	0	0	144	
	ungef.	Referenz Koll.	-17	1141	5781	598	430	351	321	134	4	204	
		KS Koll	-21	1151	6111	614	461	352	71	0	0	167	
	Athen1	WW_EFH	Referenz Koll.	-8	0	8637	123	0	0	0	0	0	82
			KS Koll	-8	0	8625	135	0	0	0	0	0	83
Kombi		Referenz Koll.	-8	0	7747	716	174	123	0	0	0	142	
		KS Koll mit RK	-8	0	7871	889	0	0	0	0	0	95	
		KS Koll mit TS	-8	0	7903	857	0	0	0	0	0	92	
		KS Koll DB	-8	0	7800	465	222	241	32	0	0	162	
WW_MFH		Referenz Koll.	-8	0	8178	493	43	46	0	0	0	142	
		KS Koll mit RK	-8	0	8511	250	0	0	0	0	0	95	
		KS Koll mit TS	-8	0	8522	238	0	0	0	0	0	92	
		KS Koll DB	-8	0	8206	274	187	92	1	0	0	150	
ungef.		Referenz Koll.	-8	0	6942	748	700	370	0	0	0	148	
		KS Koll	-8	0	6562	739	661	646	152	0	0	166	

Tabelle 10 (1. Forts.)

Athen2	WW_EFH	Referenz Koll.	-7	0	8489	271	0	0	0	0	0	87	
		KS Koll	-9	0	8456	304	0	0	0	0	0	0	88
	Kombi	Referenz Koll.	-7	0	7608	618	219	268	47	0	0	0	159
		KS Koll mit RK	-9	0	7836	924	0	0	0	0	0	0	95
		KS Koll mit TS	-9	0	7840	920	0	0	0	0	0	0	92
		KS Koll DB	-9	0	7697	484	267	268	44	0	0	0	162
	WW_MFH	Referenz Koll.	-7	0	8036	431	224	67	2	0	0	0	151
		KS Koll mit RK	-9	0	8415	345	0	0	0	0	0	0	95
		KS Koll mit TS	-9	0	8429	331	0	0	0	0	0	0	92
		KS Koll DB	-9	0	8062	267	235	191	5	0	0	0	157
	ungef.	Referenz Koll.	-7	0	6636	733	653	609	129	0	0	0	165
		KS Koll	-9	0	6562	739	661	646	152	0	0	0	166
Pretoria	WW_EFH	Referenz Koll.	-4	0	8639	121	0	0	0	0	0	83	
		KS Koll	-9	0	8564	196	0	0	0	0	0	0	85
	WW_MFH	Referenz Koll.	-4	0	7929	600	178	48	5	0	0	0	162
		KS Koll mit RK	-9	0	8589	171	0	0	0	0	0	0	92
		KS Koll mit TS	-9	0	8555	205	0	0	0	0	0	0	91
		KS Koll DV	-9	0	7862	482	227	175	14	0	0	0	174
	ungef.	Referenz Koll.	-4	0	6133	686	730	865	344	2	0	0	176
		KS Koll	-9	0	6190	687	725	831	325	2	0	0	176
Fortaleza	WW_EFH	Referenz Koll.	18	0	8381	379	0	0	0	0	0	90	
		KS Koll	16,5	0	8347	413	0	0	0	0	0	0	93
	WW_MFH	Referenz Koll.	18	0	7660	409	166	314	211	0	0	0	175
		KS Koll mit RK	16,5	0	7688	1072	0	0	0	0	0	0	92
		KS Koll mit TS	16,5	0	7704	1056	0	0	0	0	0	0	92
		KS Koll DV	16,5	0	7040	374	538	659	149	0	0	0	174
	ungef.	Referenz Koll.	18	0	5883	759	795	955	368	0	0	0	173
		KS Koll	16,5	0	5874	736	781	939	429	1	0	0	175
Peking	WW_EFH	Referenz Koll.	-19	1120	7525	115	0	0	0	0	0	85	
		KS Koll	-23	1021	7589	150	0	0	0	0	0	0	86
	Kombi	Referenz Koll.	-19	1116	6949	343	233	119	0	0	0	0	147
		KS Koll mit RK	-23	1195	6754	811	0	0	0	0	0	0	91
		KS Koll mit TS	-23	1196	6748	816	0	0	0	0	0	0	90
		KS Koll DB	-23	997	6995	343	241	166	17	0	0	0	160
	WW_MFH	Referenz Koll.	-19	1101	7390	203	62	4	0	0	0	0	133
		KS Koll mit RK	-23	1194	7462	104	0	0	0	0	0	0	90
		KS Koll mit TS	-23	1196	7458	105	0	0	0	0	0	0	89
		KS Koll DB	-23	1007	7413	183	139	18	0	0	0	0	141
	ungef.	Referenz Koll.	-19	1249	5634	872	772	233	0	0	0	0	146
		KS Koll	-23	1246	5464	815	784	438	13	0	0	0	156

8 Druckbelastungen

Nach Abschluss der Analyse der Temperaturbelastungen wird in diesem Kapitel im ersten Unterpunkt auf die Methodik zur Bestimmung der Drücke eingegangen. Weiters werden ausgewählte Ergebnisse aus der Simulation abgebildet und analysiert. Abschließend werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Druckbelastungen zusammenfassend dargestellt.

8.1 Methodik zur Bestimmung der Druckhäufigkeiten

Im Kapitel 7 wurden die Temperaturbelastungen an den Referenz- sowie Kunststoff-Systemen mit und ohne Überhitzungsschutz betrachtet. Für die Leistungsanforderungen an Polymermaterialien sind neben den Temperaturen ebenso die auftretenden Drücke von Interesse. Polymermaterialien weisen tendenziell grundsätzlich eine geringere Druckbeständigkeit als Metalle auf. Berücksichtigt man noch zusätzlich die speziellen Absorbergeometrien (strömungstechnisch und fertigungstechnisch bedingt), wird deutlich, dass die Druckbelastungsgrenzen wesentlich niedriger liegen. Hierzu kommt weiters eine starke Abhängigkeit der Druckbelastungsgrenze von der Temperatur.

Wie bereits anhand des Aventa-Kollektors beschrieben (vgl. Kapitel 3.2.2), werden die Absorber-Kanäle durch Extrusion mit einer Wandstärke von rund ein bis zwei Millimetern hergestellt. Es gibt aber neben der Extrusion auch weitere Verfahren wie zum Beispiel das Twin-Sheet-Thermoformen, bei dem Strömungsgeometrien und Anschlüsse des Absorbers in einem Arbeitsschritt geformt werden können. Die Verbindungsflächen mit dem Gegenstück des Absorbers können bei zu hohen Drücken gelöst werden, wodurch eine definierte Durchströmung zweier nebeneinander liegender Kanäle nicht mehr gegeben ist, oder im schlimmsten Falle eine Leckage auftritt.

Zur Ermittlung der auftretenden Systemdrücke wurde ein vereinfachtes Berechnungsmodell bei unterschiedlichen Betriebszuständen herangezogen. Die entstehenden Drücke sind im wesentlichen von den herrschenden Temperaturen (Dampfbildung) im Kollektor und dessen Entleerungsverhalten abhängig. Weiters spielt der hydraulische Aufbau des Gesamtsystems und die Größe des Membranausdehnungsgefäßes eine wesentliche Rolle. In den nächsten drei Unterkapiteln wird die Berechnungsmethode für gepumpte geschlossene und offene (Drain-back) sowie Thermosiphonsysteme beschrieben

8.1.1 Systemdrücke in geschlossenen gepumpten Systemen

Bei der Berechnung der Drücke wird ausgehend von den drei unterschiedlichen Systemzuständen (Füllzustand, Betrieb und Stagnation) in den nächsten Abschnitten genauer eingegangen.

Drücke im Füllzustand

- Konventionelles System

Der Systemdruck wird bereits bei der hydraulischen Auslegung des solarthermischen Systems und bei der erstmaligen Befüllung des solaren Primärkreises maßgebend beeinflusst.

Über das Ausdehnungsgefäß wird das Niveau des Systemdruckes erstmalig eingestellt. Im Membranausdehnungsgefäß muss auf der Gasseite ein Vordruck (p_{vor}) vorherrschen, damit sich bei einer Abkühlung des Wärmeträgermediums, ausgehend vom Füllzustand, kein Unterdruck am höchsten Anlagenpunkt einstellt. Somit wird einerseits ein Ansaugen von Luft in die Anlage verhindert und andererseits am Pumpenzulauf ein ausreichender Druck um Kavitationserscheinungen zu vermeiden, bereitgestellt. Dieser Vordruck sollte mindestens der statischen Anlagenhöhe entsprechen und wird in der folgenden Abbildung 8-1 dargestellt. (Fink et al., 1997)

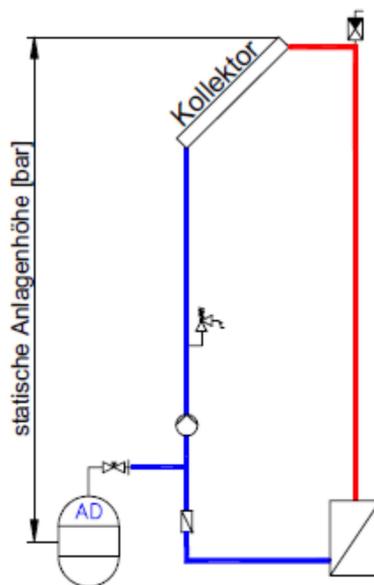


Abbildung 8-1: Vordruck im MAG (Fink et al., 1997)

Neben einer entsprechenden Dimensionierung nach den üblichen Richtlinien, hier sei für nähere Informationen auf einschlägige Fachliteratur z.B. Fink, Ch., Riva, R. (2004) und Wurm (2012) hingewiesen, ist der Nutzeffekt des Membranausdehnungsgefäßes ein weiterer hier wesentlicher Parameter. Der Nutzeffekt gibt an, welches Volumen des gesamten Ausdehnungsgefäßes tatsächlich genutzt werden kann, ohne dass die Membran einen

Schaden erleidet. Dieser wird vom Hersteller des Membranausdehnungsgefäßes angegeben und sollte gewöhnlicher Weise unter dem Wert 0,5 liegen. Eine Variantenrechnung ergibt nach der Gleichung 8-1 (Hausner et al., 2003), um einerseits einen Nutzeffekt $<0,5$ und andererseits aus Kostengründen ein möglichst kleines Ausdehnungsgefäß zu haben, folgende optimale Konfiguration wenn das Sicherheitsventil und das Ausdehnungsgefäß auf ungefähr derselben Höhe liegen ($P_{diff} = 0$):

- Ansprechdruck des Sicherheitsventiles: 6 bar
- Gefäßvordruck 2 bar (Überdruck)
- Nutzeffekt von 0,43 erreicht wird,

$$N = \frac{P_e + P_{diff} + 1 - \frac{(P_0 + 1)}{0,9}}{P_e + P_{diff} + 1} \quad \text{Gl. (8-1)}$$

mit

P_e Anlagendruck am Sicherheitsventil [bar]

P_{diff} Druckdifferenz [bar]

P_0 Vordruck im MAG [bar]

In der linken Darstellung 1 der Abbildung 8-2 wird ein Membranausdehnungsgefäß vor dem Füllvorgang dargestellt. Die Membran liegt im ungefüllten Zustand der Anlage am Ausdehnungsgefäß an. Das Gasvolumen nimmt somit das gesamte Volumen des Ausdehnungsgefäßes ein und weist gasseitig den Vordruck (p_{vor}) auf. Beim Befüllen der Anlage werden in der Praxis, geringe Überdrücke von 0,5 bis 1 bar am höchsten Punkt der Anlage erzeugt ($p_{füll}$), um bei einem Entweichen von Luft (durch Entlüfter) den gewünschten Vordruck sicherzustellen. Dadurch ergibt sich ein Druckniveau von rund 2,5 bar (Überdruck) am Ausdehnungsgefäß und dementsprechend abzüglich der statischen Höhe ein gewisser Druck am Kollektor.

Durch den Füllvorgang wird ein gewisser Flüssigkeitsinhalt (mediumsseitig) in das Membranausdehnungsgefäß gepresst (siehe Abbildung 8-2 rechte Darstellung 2). Dieser stellt sicher, dass jederzeit genügend Flüssigkeit in der Anlage vorhanden ist. Des Weiteren kühlt und schützt diese Flüssigkeitsvorlage V_v somit die Membran vor einem unzulässig heißen Flüssigkeitsschwall (größer 90 °C) aus dem Kollektor (bei Stagnation).

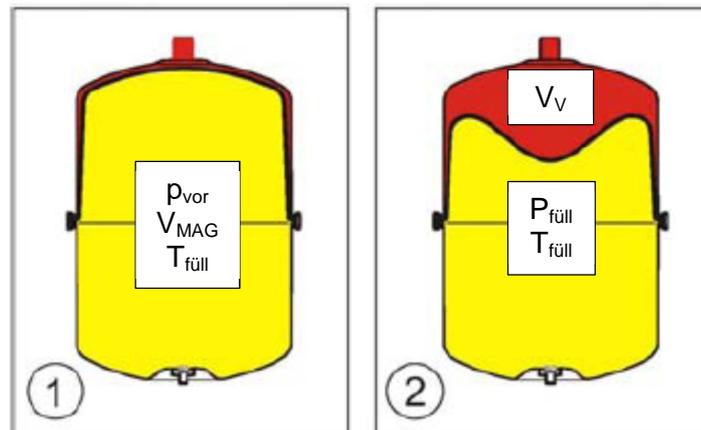


Abbildung 8-2: Zustände im MAG vor dem Füllen (links) und nach dem Füllen (rechts)
(in Anlehnung an Fink et al. 1997)

Die Flüssigkeitsvorlage kann wie in Gleichung 5-1 beschrieben, durch Umformen der idealen Gasgleichung berechnet werden.

- Solarthermisches System in Kunststoffausführung

Wie im konventionellen System wird auch der Systemdruck in solarthermischen Systemen in Kunststoffausführung maßgeblich vom Vordruck (p_{vor}) bei der erstmaligen Befüllung des solaren Primärkreises beeinflusst. In dieser Arbeit wurde der Vordruck im Kollektor entsprechend der statischen Höhe des Ausdehnungsgefäßes unter dem Kollektor (6 m entsprechen 0,6 bar) als Basiswert herangezogen. Dadurch wird das Druckniveau im Kollektor gering gehalten.

Drücke im Betrieb

- Konventionelles System

Wie bereits erwähnt, nimmt das Ausdehnungsgefäß die Flüssigkeitsausdehnung des Wärmeträgermediums während des Normalbetriebs auf. Die Ausdehnung im Betrieb kann über die nachfolgende Gleichung 8-2 (Fink, Riva, 2004), für jeden Zustand mit den aus der Simulation erreichten Systemtemperaturen bestimmt werden.

$$Ausdehnung\ Betrieb = \frac{\rho_{füll}}{\rho_{Betrieb}} - 1 \quad \text{Gl. (8-2)}$$

mit

$\rho_{füll}$ Dichte des Mediums beim Befüllen bei Fülltemperatur [kg/m³]

$\rho_{Betrieb}$ Dichte des Mediums im Betrieb bei Betriebstemperatur [kg/m³]

Um den Betriebsdruck zu ermitteln, wird mit der nachfolgenden Gleichung 8-3 nach Hausner (2001), mit den zugrunde liegenden Volums-Ausdehnungen durch Temperaturänderungen

sowie mit dem Gesamtvolumen des Ausdehnungsgefäßes der Nutzeffekt während des Betriebes (N_{Betrieb}) berechnet.

$$N_{\text{Betrieb}} = \frac{(V_G \cdot \text{Ausdehnung}_{\text{Betrieb}} + V_V)}{V_{\text{MAG}}} \quad \text{Gl. (8-3)}$$

mit

V_G Volumen des Mediums bei Füllbedingungen (20 °C) [l]

$\text{Ausdehnung}_{\text{Betrieb}}$ Ausdehnungsfaktor des Mediums im Normalbetrieb [-]

V_V Volumen der Flüssigkeitsvorlage [l]

V_{MAG} Volumen des MAG [l]

Formt man die Gleichung 8-4 (Fink, Riva, 2004), welche aus der Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes stammt, mit dem Nutzeffekt während des Betriebes entsprechend um, erhält man den Betriebsdruck am Membranausdehnungsgefäß.

$$N_{\text{Betrieb}} = \frac{P_{\text{Betrieb}} + P_{\text{diff}} + 1 - \frac{(P_{\text{vor}} + 1)}{0,9}}{P_{\text{Betrieb}} + P_{\text{diff}} + 1} \quad \text{Gl. (8-4)}$$

mit

P_{Betrieb} Betriebsdruck [bar]

P_{diff} Druckdifferenz [bar]

P_{vor} Vordruck im MAG [bar]

Vereinfacht wird wieder angenommen, dass der Differenzdruck (p_{diff}) auf Null gesetzt wird. Als weitere Vereinfachung kann der Faktor 0,9 in der Gleichung auf den Wert 1 gesetzt werden, da dieser Faktor nur im Zuge der Dimensionierung des Membranausdehnungsgefäßes berücksichtigt wird. Daraus ergibt sich eine reduzierte Schreibweise, wie in Gleichung 8-5 dargestellt.

$$p_{\text{Betrieb}} = \frac{(N_{\text{Betrieb}} + p_{\text{vor}})}{(1 - N_{\text{Betrieb}})} \quad \text{Gl. (8-5)}$$

- Solarthermisches System in Kunststoffausführung

Wie bei einem konventionellen solarthermischen System muss das Ausdehnungsgefäß in Systemen in Kunststoffausführung ebenso die Flüssigkeitsausdehnung des Wärmeträgermediums während des Normalbetriebs aufnehmen. Im Unterschied zu den konventionellen Systemen, bei denen für die Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes ein Dampfvolumen mit eingerechnet werden muss, kann in Systemen mit Überhitzungsschutz

dieses Dampf-Volumen in der Berechnung vernachlässigt werden. Dadurch kann beispielsweise das Volumen des Ausdehnungsgefäßes, im System zur Warmwasserbereitung am Standort Graz von 30 auf 12 Liter reduziert werden. Auch der Fülldruck ($p_{\text{füll}}$) unterscheidet sich. Dieser wird auf rund 0,3 bar über dem Vordruck begrenzt. Dies begünstigt wiederum das Druckniveau im Kollektor, bietet aber dennoch einen genügend großen Überdruck.

Druck bei Stagnation

- Konventionelles System

Im Stagnationszustand muss das Ausdehnungsgefäß neben der Flüssigkeitsdehnung auch die verdrängte Flüssigkeit (Dampfvolumen) aus dem Kollektor und aus den Rohrleitungen aufnehmen. Die Dampfbildung und die daraus folgende Dampfreichweite ist maßgebend vom Entleerungsverhalten des Kollektors, wie bereits im Kapitel 2.4.2 erwähnt, abhängig.

Mit der spezifischen Dampfleistung eines Kollektors kann die Dampfreichweite eines Systems bestimmt werden. Die Dampfleistung ist vom Entleerungsverhalten, der Einstrahlung auf den Kollektor sowie vom Systemdruck und von der Umgebungstemperatur abhängig. (Hausner et al., 2003)

Im Rahmen des Projektes „Entwicklung von thermischen Solarsystemen mit unproblematischem Stagnationsverhalten“ nach Hausner et al (2003), wurden anhand real gemessener Kollektoren mit verschiedenen Entleerungsverhalten, Funktionen entwickelt, um die spezifische Dampfleistung P_d zu ermitteln. Die nachfolgende Abbildung 8-3 zeigt die in dieser Arbeit verwendeten Funktionen bei unterschiedlichem Entleerungsverhalten von sehr gut, gut und schlecht entleerenden Kollektoren.

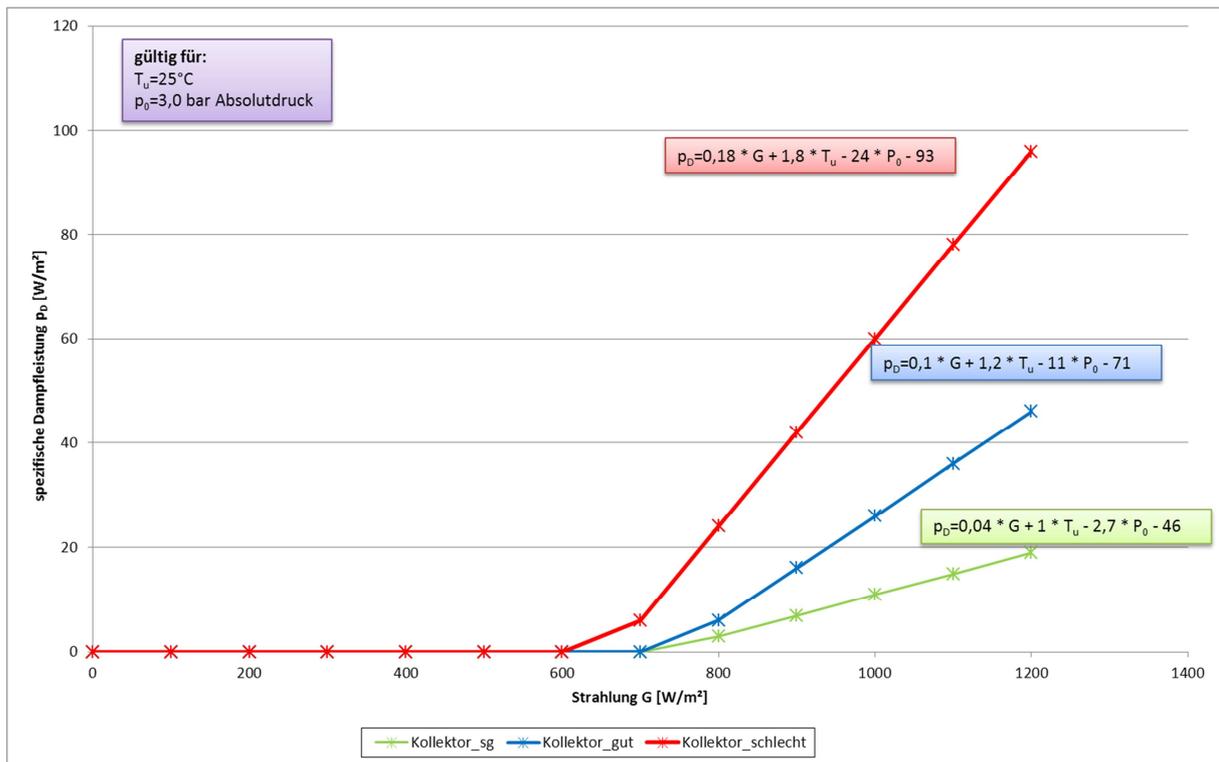


Abbildung 8-3: Spezifische Dampfleistung in Abhängigkeit der Strahlung bei konstanter Temperatur und Vordruck für unterschiedlich gut entleerende Kollektoren; (Wurm, 2012)

Multipliziert man die spezifische Dampfleistung eines Kollektors mit der Gesamtkollektorfläche, erhält man die gesamt abgegebene Dampfleistung (Dampfleistung_{Koll}). Die Dampfreichweite, also die unter Dampf stehende Rohrleitung (RuD vgl. Gl. 8-6) (Hausner et al., 2003), ergibt sich aus dem Gleichgewichtszustand der gesamt abgegebene Dampfleistung zur Verlustleistung der Rohrleitungen (Verlustleistung_{Rohr}), die mit 25 Watt pro Meter angesetzt werden und somit einem durchschnittlichen Wert entsprechen.

$$RuD = \frac{\text{Dampfleistung}_{\text{Koll}}}{\text{spezifische Verlustleistung}_{\text{Rohr}}} \quad \text{Gl. (8-6)}$$

mit

Dampfleistung_{Koll}

gesamte Dampfleistung des Kollektorfeldes [W]

spezifische Verlustleistung_{Rohr}

spez. Verlustleistung einer gedämmten Rohrleitung [W/m]

In der vorliegenden Arbeit wird für die Berechnung der Drücke der Stagnationszustand vereinfachend in zwei Phasen (Phase 3 und Phase 4) eingeteilt.

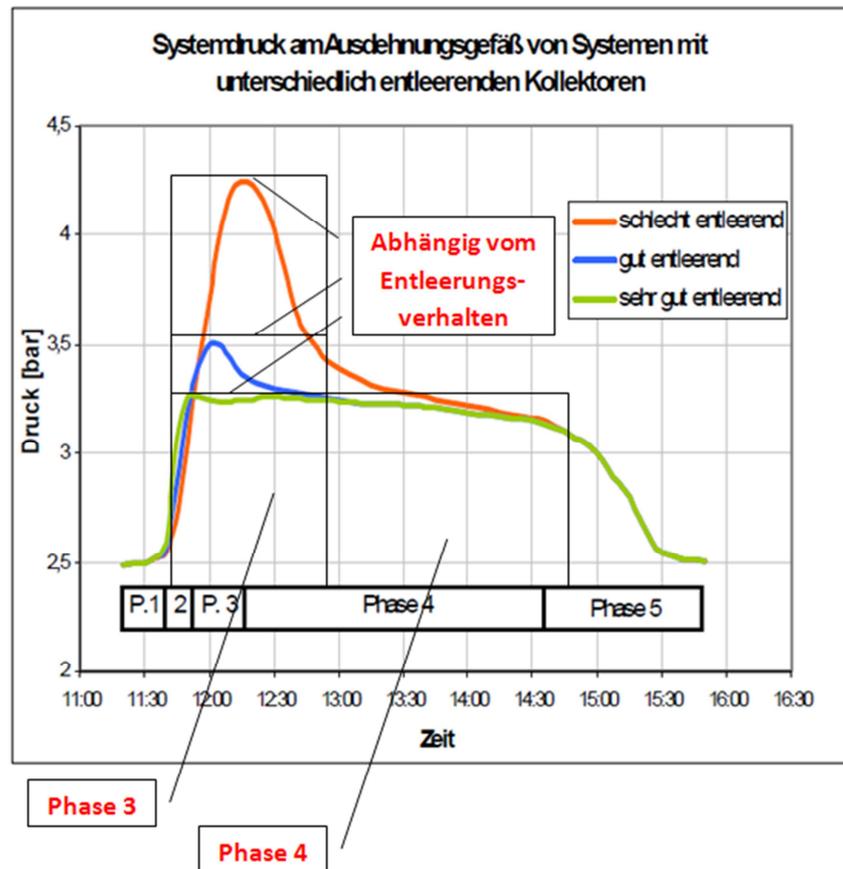


Abbildung 8-4: Darstellung der vereinfachten Annahmen zur Ermittlung des Systemdrucks am MAG (Wurm, 2012)

In der Berechnung wurde angenommen, dass der Druck am Ausdehnungsgefäß in der ersten Stunde der Stagnation auf seinen maximalen Wert ansteigt. Abhängig vom Entleerungsverhalten stehen sowohl der Kollektor als auch die Rohrleitungen teilweise unter Dampf. Diese Phase entspricht näherungsweise der Phase 3.

Mit dem Rohrrinnendurchmesser wird in weiterer Folge das Volumen der unter Dampf stehenden Rohrleitungen errechnet und es ergibt sich als Summe mit dem Kollektorvolumen das gesamte Dampfvolumen (vgl. Gl. 8.7).

$$V_D = V_{\text{Koll}} + V_{\text{RuD}} \quad \text{Gl. (8-7)}$$

mit

V_{Koll} Volumen des Kollektorfeldes [m³]

V_{RuD} Volumen Rohrleitungen unter Dampf [m³]

Für die nachfolgenden Stunden ab Stunde 2 (Phase 4) des Stagnationsvorgangs wird angenommen, dass sich die Rohrleitungen wieder langsam mit Medium bis zur Unterkante des Kollektors füllen, sodass nur noch der Kollektor unter Dampf steht.

$$V_D = V_{Koll} \quad \text{Gl. (8-8)}$$

Wendet man die Gleichung 8-9 (Hausner, 2001) mit den entsprechenden Dampfvolumenta an, so ergibt sich der Nutzeffekt bei Stagnation, der wiederum üblicherweise unter 0,5 liegen soll.

$$N_{Stag} = \frac{(V_G \cdot \text{Ausdehnung} + V_V + V_D)}{V_{MAG}} \quad \text{Gl. (8-9)}$$

Der berechnete Nutzeffekt bei Stagnation (N_{Stag}) ersetzt $N_{Betrieb}$ in der Gleichung 8-4. Durch Umformung und Treffen der selbigen Vereinfachungen ($p_{diff}=0$; Faktor 0,9 \rightarrow 1) erhält man die entsprechenden Drücke während der Stagnationsphasen drei und vier.

$$p_{Stag} = \frac{(N_{Stag} + p_{vor})}{(1 - N_{Stag})} \quad \text{Gl. (8-10)}$$

Durch die Dampfbildung bleibt die Druckdifferenz zwischen Kollektor und Ausdehnungsgefäß nicht konstant. Sie ändert sich mit der unter Dampf stehenden Rohrleitungslänge. In der dritten Phase der Stagnation wird die maximale Dampfreichweite erreicht, wodurch sich das Druckniveau des Kollektors an das des Ausdehnungsgefäßes annähert. In der zweiten Phase werden, wie bereits erwähnt, die Vor- sowie Rücklaufleitungen durch einen Teil der sich im Ausdehnungsgefäß befindlichen Flüssigkeit wieder bis zur Unterkante des Kollektors gefüllt.

Im nächsten Abschnitt wird anhand des Warmwassersystems am mitteleuropäischen Standort die Druckentwicklung im Ausdehnungsgefäß sowie im Kollektor über einen Tag näher beschrieben.

Hydraulikkonzept des Primär-Solarkreises des Warmwassersystems Graz

Das Referenz-Warmwasserbereitungssystem ist als geschlossener Kreislauf ausgeführt. Das Kollektorfeld mit rund 6,6 m² Brutto beinhaltet ein Flüssigkeitsvolumen von rund 4,8 Liter. Das Ausdehnungsgefäß sowie das Sicherheitsventil befinden sich ca. 10 Meter unter dem Kollektorniveau. Das Ausdehnungsgefäß weist ein Fassungsvermögen von 30 Liter auf.

In der nachfolgenden Abbildung 8-5 ist der Druckverlauf des Grazer Referenzsystems an einem Tag bei guter Einstrahlung zu sehen.

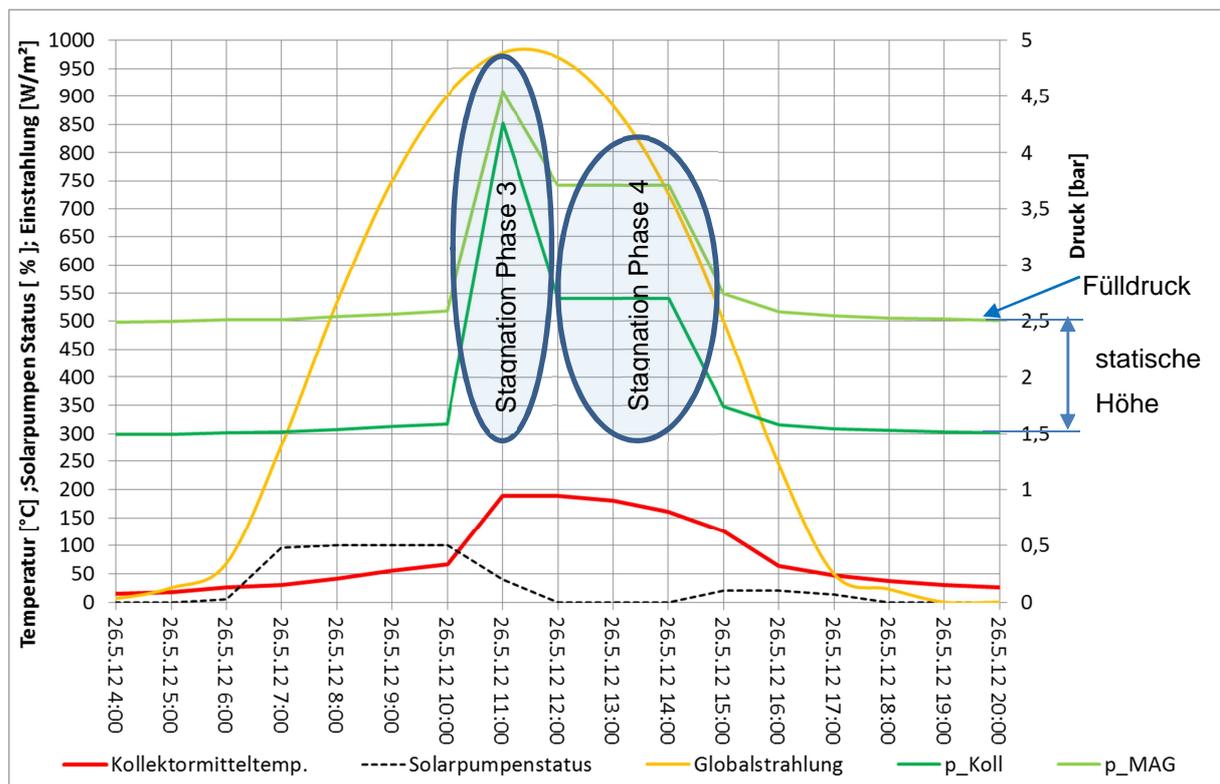


Abbildung 8-5: Druckentwicklung des Referenz-Warmwassersystems am Standort Graz

In dieser Darstellung ist der Druckverlauf im Ausdehnungsgefäß (p_{MAG}) sowie im Kollektor (p_{Koll}) abgebildet. Im Referenzsystem zur Warmwasserbereitung am Standort Graz wurde ein Fülldruck im Ausdehnungsgefäß von 2,5 bar angenommen, woraus sich der Basisdruck im Kollektor von 1,5 bar (10 Meter Bauhöhe entsprechen rund 1 bar Druckdifferenz) ergibt. Ab circa 6:00 Uhr erkennt man, dass mit zunehmender Einstrahlung die Kollektortemperaturen steigen und die Anlage in Betrieb geht, was am Solarpumpenstatus zu erkennen ist. Dieser gibt an, wie lange die primäre Solarpumpe während einer Stunde im Betrieb war. Von 7:00 bis 10:00 Uhr ist eine geringe Druckentwicklung zu erkennen, die maßgeblich durch die Flüssigkeitsdehnung des Wärmeträgermediums beeinflusst wird. In der darauffolgenden Stunde sinkt der Wert des Solarpumpenstatus auf rund 40 Prozent. Dies bedeutet, dass die Pumpe in dieser Stunde nur rund 25 Minuten in Betrieb war und die restliche Stunde die Anlage in Stagnation ging. In dieser Zeit (ab Stagnationsphase 3) werden die Höchstwerte für diesen Tag der Kollektortemperaturen von etwa 190 °C erreicht. Gleichzeitig bedeutet dies, dass es zur Dampfbildung durch Überschreitung der Siedetemperatur im Kollektor kommt. Abhängig vom Entleerungsverhalten (in dieser Abbildung wurde ein schlecht entleerender Kollektor simuliert), wird die maximale Dampfleistung des Kollektorfeldes erreicht, wodurch sich dementsprechend die höchste Dampfreichweite ergibt. Dies ist in der Darstellung durch die geringer werdende Druckdifferenz zwischen Ausdehnungsgefäß und Kollektor zu erkennen. Es werden dabei Drücke im Ausdehnungsgefäß von rund 4,5 bar Überdruck und im Kollektor von rund 4,3 bar erreicht. In den nachfolgenden Stunden (Stagnationsphase 4) füllen sich die Rohrleitungen bis

zur Unterkante des Kollektors, wodurch die Flüssigkeitssäule wieder annähernd die 10 Meter erreicht. Dies führt zu einem relativ konstanten Druckniveau im Ausdehnungsgefäß von rund 3,7 bar und rund 2,7 bar im Kollektor. Dieser Zustand wird so lange gehalten, bis um 15:00 Uhr die Kollektortemperaturen durch die abnehmende Einstrahlung unter die Siedetemperatur fallen und sich der Kollektor von unten zu füllen beginnt. Gleichzeitig erkennt man, dass, der Pumpenstatus in dieser Stunde einen Wert von etwa 20 Prozent erreicht. Dies bedeutet, dass nachdem das Wärmeträgermedium kondensiert und der Kollektor zur Gänze gefüllt ist, eine weitere solare Beladung des Speichers durchgeführt wurde. Der Druck im Ausdehnungsgefäß sowie Kollektor ist in dieser Phase wiederum nur von der Wärmedehnung des Wärmeträgermediums abhängig und erreicht Drücke um den Fülldruck (2,5 bar im MAG).

Die auftretenden Systemdrücke sowohl am Ausdehnungsgefäß wie auch jene des Kollektors wurden mit dem jeweiligen Temperaturstundenwert (siehe Abschnitt 7.1) über ein Jahr ermittelt, in Klassen eingeteilt und einer Häufigkeitsanalyse unterzogen.

Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, spielt das Entleerungsverhalten des Kollektors eine wesentliche Rolle für die Dampfbildung. In der folgenden Abbildung 8-6 sind für das Referenzsystem zur Warmwasserbereitung am Standort Graz die Druckentwicklungen unterschiedlich gut entleerender Kollektoren an einem Tag dargestellt.

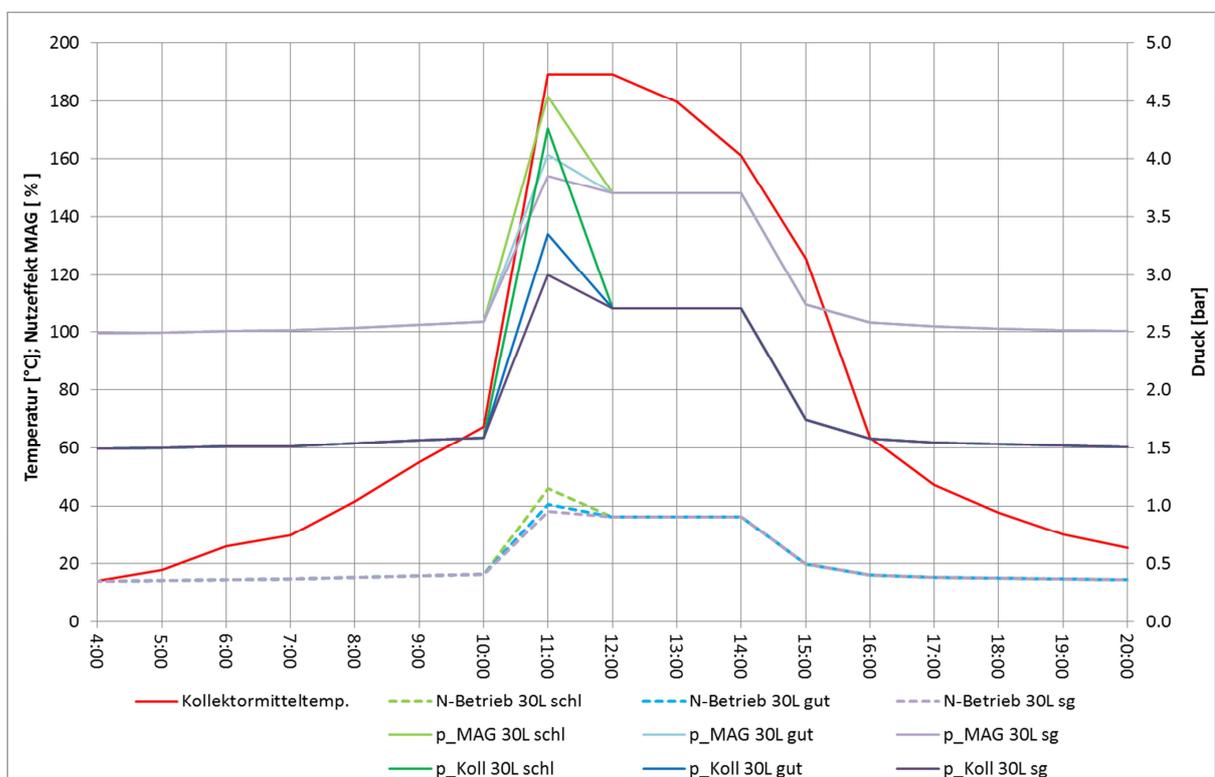


Abbildung 8-6: Darstellung der Systemdrücke und Nutzeffektes in Abhängigkeit des Entleerungsverhaltens

Betrachtet man die Spitzendrücke der unterschiedlich entleerenden Kollektoren erkennt man, dass mit verbessertem Entleerungsverhalten weniger (gut) bis nahezu kein Dampf (sg) in die Rohrleitungen gedrückt wird und dadurch die Druckbelastung im System reduziert werden kann. Dieses Ergebnis ist in Hinblick auf die Entwicklung günstiger Strömungs- sowie Entleerungsgeometrien von Absorbern in Kunststoffausführung von enormer Bedeutung.

Eine weitere Möglichkeit die Druckbelastungen zu minimieren besteht in der Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes. Die Abbildung 8-7 zeigt die Druckentwicklung über einen Tag des Referenzsystems zur Warmwasserbereitung am Standort Graz mit unterschiedlichen Volumina des Ausdehnungsgefäßes.

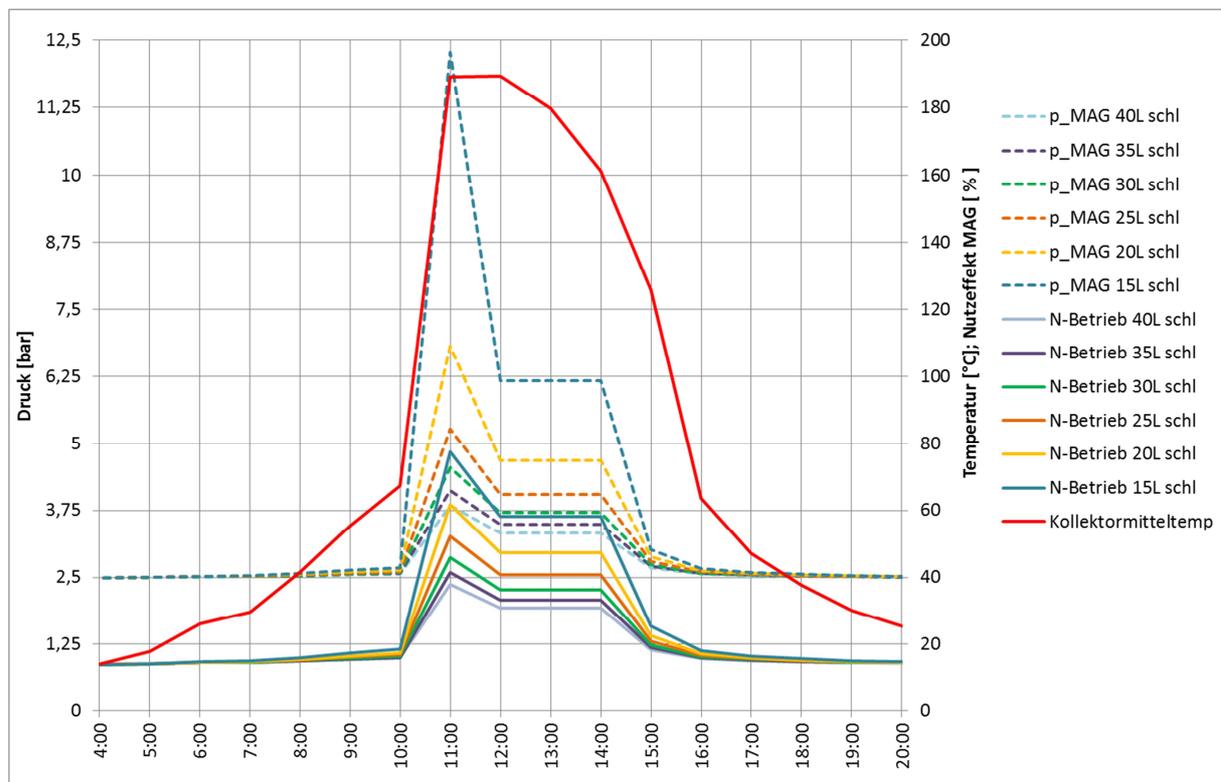


Abbildung 8-7: Einfluss der Größe des MAG auf den Systemdruck

Wird das Ausdehnungsgefäß nach den verbreiteten Richtlinien ausgelegt, erhält man ein Volumen von 30 Litern als Optimum. Der Nutzeffekt während des Stagnationsfalles liegt unter dem bereits erwähnten Wert von 0,5. Dimensioniert man das Ausdehnungsgefäß zu klein, werden die Belastungen entsprechend höher. Es können Drücke bis über den Ansprechdruck des Sicherheitsventiles erreicht werden, wodurch es zu einem Abblasen des Wärmeträgermediums kommt. Vergrößert man hingegen das Volumen um rund 30%, kann die Druckspitze in diesem Fall um etwa 1 bar reduziert werden. Dies ist in den meisten Fällen nicht nur eine Kostenfrage, sondern auch eine Frage des zur Verfügung stehenden Platzes im Technikraum.

In weiterer Folge wurden die gängigen Richtlinien (vergleich Brandstetter et al., 2004) für die Dimensionierung von Ausdehnungsgefäßen für gepumpte, geschlossene Systeme herangezogen.

- Solarthermisches System in Kunststoffausführung

Wie bereits mehrfach erwähnt, kommt es in Systemen mit einer Rückkühlfunktion oder thermotropen Schicht als Überhitzungsschutz nicht zu Dampfbildungen im Kollektor. Daher wird der Stagnationsfall nur für das konventionelle System betrachtet.

8.1.2 Systemdrücke in entleerenden Systemen(Drain-Back)

Das Drain-Back System ist im Gegensatz zu einem geschlossenen und druckbehafteten System ein zur Atmosphäre offener Kreislauf und weist hinsichtlich der Druckentwicklung bei Stagnation sehr günstige Systemkonstellationen auf. In dieser Arbeit werden Drain-Back Systeme, wie bereits im Abschnitt 6.1 erwähnt, für Solarsysteme in kunststoffgerechter Ausführung eingesetzt. Die folgende Abbildung 8-8 zeigt den solaren Primärkreis eines solchen Systems.

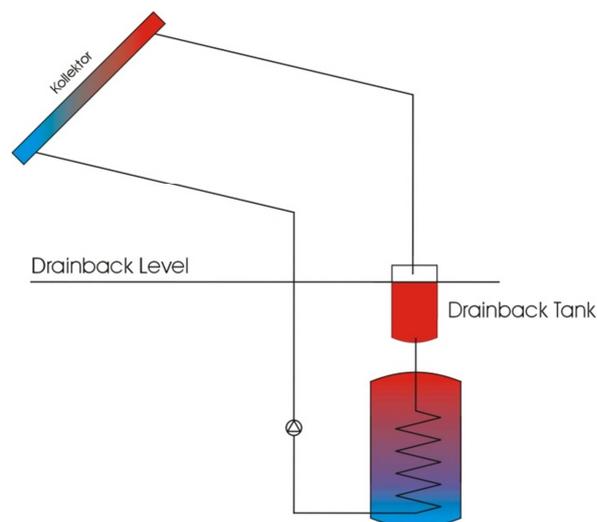


Abbildung 8-8: Hydraulischeschema eines Drain-Back-Systems in Kunststoffausführung

Anhand der nächsten Abbildung 8-9, die einen Tagesverlauf von Kollektortemperatur, Druck im Kollektor und den Pumpenstatus in einem Drain-Back-Systems darstellt, wird die Methodik für die Bestimmung der Systemdrücke aufgezeigt.

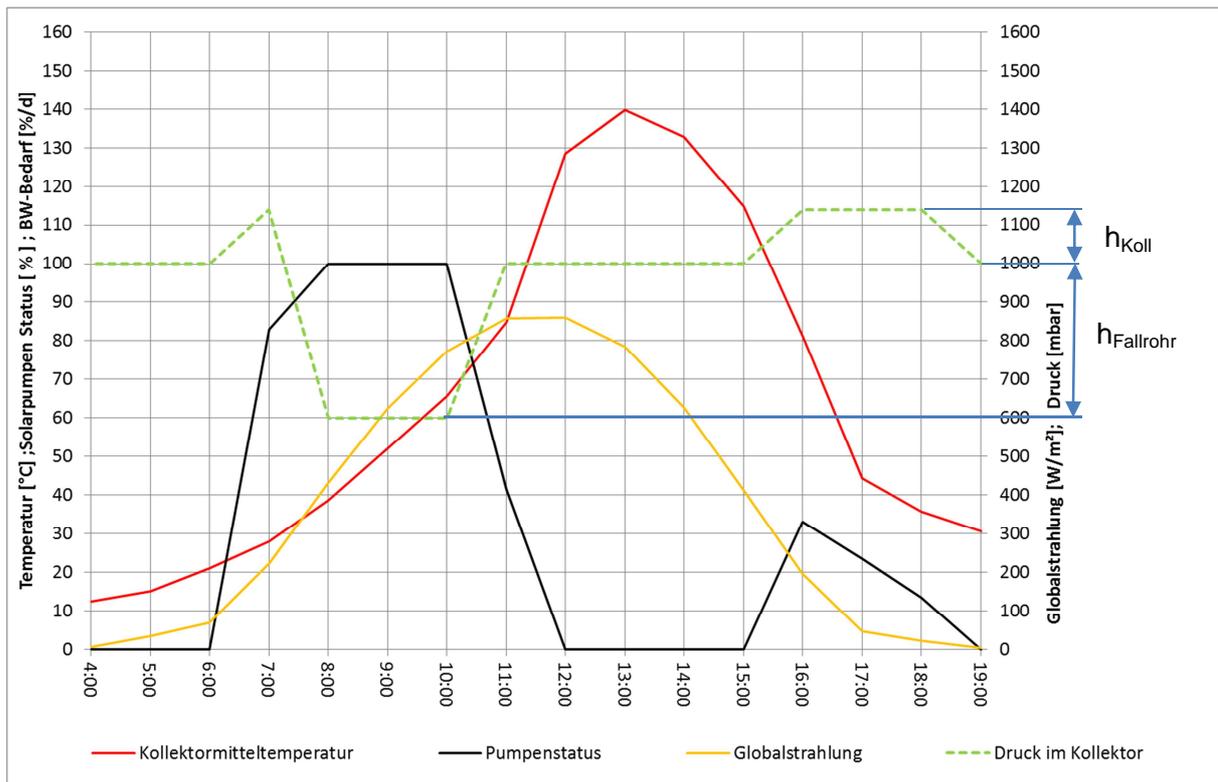


Abbildung 8-9: Druckentwicklung des Kunststoffsystems in Drain-Back Ausführung am Standort Graz

Bei Drain-Back-Systemen entstehen im Kollektor drei Druckniveaus. Wie bereits im Abschnitt 6.1 erwähnt, sind der Kollektor und Teile der Rohrleitungen (bei Stillstand der Pumpe) entleert. Die Entleerung erfolgt in den Drain-Back-Tank, der zur Atmosphäre hin geöffnet ist. Dies bedeutet, dass sich im Kollektor im entleerten Zustand, der entsprechende Atmosphärendruck einstellt. Um 6:00 Uhr reichen die Temperaturen im Kollektor noch nicht aus um eine solare Beladung des Speichers zu starten. In der nachfolgenden Stunde wird ein Pumpenstatus von etwa 85 Prozent erreicht. Beim Anfahren der Pumpe müssen die Rohrleitungen sowie der Kollektor über die Rücklaufleitung erstmals gefüllt werden. Bis der Kollektor voll gefüllt ist, und der Überschuss in die Vorlaufleitung fließt, baut sich ein geringer Überdruck an der Unterkante des Kollektors von etwa 0,14 bar auf. Die Dauer eines Füllvorganges kann nur schwer abgeschätzt werden.

Es dauert in realen Systemen einige Zeit, bis sich das System in einem eingeschwungenen Zustand befindet. Erst nach mehrmaligen Einschaltvorgängen liegt im System ein stationärer Betrieb vor. Um die maximale Belastung zu ermitteln, wurde daher für die Häufigkeitsauswertung angenommen, dass dieser Vorgang eine ganze Stunde andauert.

Ist die Vorlaufleitung vollständig gefüllt, wirkt diese wie ein Saugrohr. Dies bedeutet für den Druck im Kollektor, dass sich abhängig von der Positionierung des Drain-Back-Tanks (Entfernung vom Kollektor), ein Unterdruck entsprechend der Flüssigkeitssäule ergibt. Der Drain-Back-Tank befindet sich im vorliegenden Beispiel vier Meter unter dem Kollektor,

wodurch sich ein Betriebsdruck von 0,6 bar abs. (Absolutdruck) im oberen Bereich des Kollektors ergibt. Bei diesen Drücken liegt der Siedepunkt des Wärmeträgermediums bei rund 90 °C.

Drain-Back Anlagen sollen nie über diese (Siede-) Temperatur kommen. Werden diese Temperaturen dennoch überschritten, sollte die Regelung die Pumpe ausschalten, damit sich Fluid in den Drain-Back-Tank entleeren kann.

In der nächsten Darstellung wird die Abhängigkeit des Druckes von der Temperatur am Beispiel des Kunststoffsystems in Drain-Backausführung zur Warmwasserbereitung am Standort Graz abgebildet. Die grünen und blauen Balken spiegeln die Häufigkeitsauswertung der Kollektormitteltemperatur wider und beziehen sich auf die linke Achse. Die Drücke sowie die Siedelinie beziehen sich auf die rechte Achse.

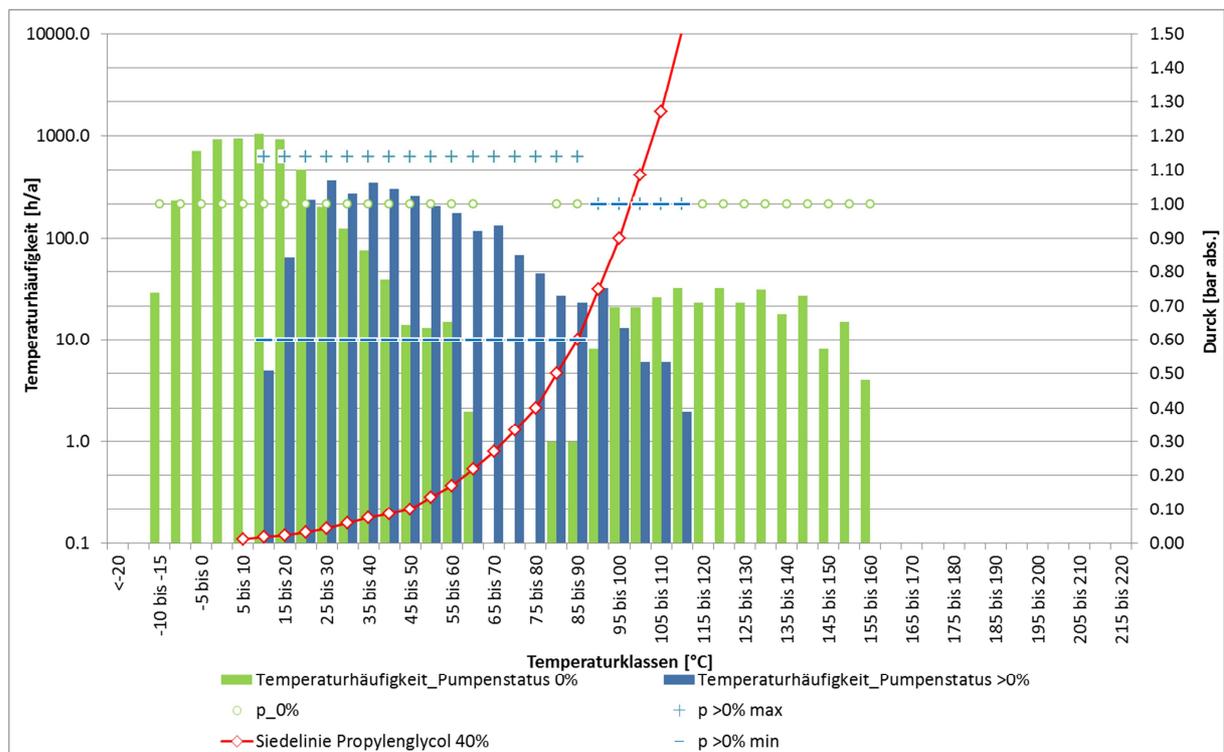


Abbildung 8-10: Druck-Temperatur Korrelation des entleerenden Drain-Back WW-Systems am Standort Graz

Die grünen Häufigkeitsblöcke bilden einerseits die Nachtstunden und Vormittagsstunden im Stillstand (linker Bereich) sowie andererseits die Temperaturhäufigkeiten des ungefüllten Kollektors bei Stagnation ab. Zudem sind ebenfalls die Drücke im Kollektor ($p_{0\%}$) protokolliert, die sich wie erwähnt am Umgebungsdruck orientieren.

Die blau gefärbten Blöcke zeigen die Häufigkeiten während des Betriebes. Erkennbar ist der Zusammenhang zwischen Siedepunkt des Wärmeträgermediums und den Drücken. Überschreitet die Kollektortemperatur die Siedetemperatur bei dem gegebenen Druck entleert

sich das System und geht in Stagnation. Die Häufigkeiten über der Klasse 85 bis 90 °C entstehen durch die Mittelwertbildung von Polysun über eine Stunde.

8.1.3 Systemdrücke in Thermosiphon-Systemen

Im Abschnitt 7.1 wurde anhand eines geschlossenen Zweikreis-Thermosiphonsystems die Temperaturbelastung ermittelt. Aus dieser Untersuchung ist hervorgegangen, dass es im gefüllten Zustand zu keiner Dampfbildung kommt.

Im Mantelwärmetauscher befindet sich wie erwähnt ein Luftpolster, der wie ein Ausdehnungsgefäß funktioniert. Dieser Luftpolster wurde für die Druckberechnung wie folgt ermittelt:

Im ersten Schritt wurde das Thermosiphonsystem am jeweiligen Standort simuliert und wurden daraus die maximal auftretenden Temperaturen im Kollektor (t_{\max}) ermittelt. Durch die Systemkonfiguration ist das gesamte Flüssigkeitsvolumen im Solarkreis bekannt (Kollektorzvolumen, Mantelwärmetauscher, Rohrleitungen). Es wurde angenommen, dass die erstmalige Befüllung des Solarkreises bei einer Umgebungstemperatur ($t_{\text{füll}}$) von 20 °C stattfindet. Mit der Temperaturdifferenz ($t_{\text{füll}}$ zu t_{\max}) und dem Flüssigkeitsvolumen wurde die maximale Flüssigkeitsausdehnung ermittelt. Dieses Volumen ist wichtig für die weitere Berechnung des Luftpolsters. Dadurch wurde ein Thermosiphonsystem ohne ein externes Ausdehnungsgefäß simuliert. Die auftretenden Systemdrücke wurden mit Hilfe der idealen Gasgleichung bestimmt. Ausgehend von einem definierten Füllzustand (Flüssigkeitsvolumen, Temperatur im Füllzustand, Gaspolstervolumen) wurde mit den ermittelten Kollektortemperaturen aus Polysun die Wärmedehnung des Mediums im Kollektorkreis berechnet. Durch die Volumenänderung der Flüssigkeit wird der Gaspolster komprimiert, wodurch sich ein neuer Druck zum jeweiligen Zeitpunkt ergibt. Die auftretenden Systemdrücke wurden über ein Jahr ermittelt, in Klassen eingeteilt und einer Häufigkeitsanalyse unterzogen.

Neben den Zweikreis-Systemen wurde am Standort Fortaleza ein offenes Einkreis-Thermosiphon-System abgebildet. In diesem zur Atmosphäre offenen System, wie es das Anlagenschema im Abschnitt 2.3.1 zeigt, wurde angenommen, dass sich die Unterkante des Kollektors etwa 4 Meter unter der Füllstandshöhe des Speichers befindet. Durch diese statische Höhe beträgt der Druck am Kollektor über das ganze Jahr konstant rund 1,4 bar.

Die nächste Abbildung zeigt die Abhängigkeit des Druckes von der Temperatur in Einkreis- und Zweikreis-Thermosiphon System. Die Grafik enthält auch die Häufigkeitsauswertung der mittleren Kollektortemperaturen des Athener (mit Referenzkollektor Athen1) Zweikreis-Thermosiphonsystems sowie jene des Einkreis-Systems in Fortaleza.

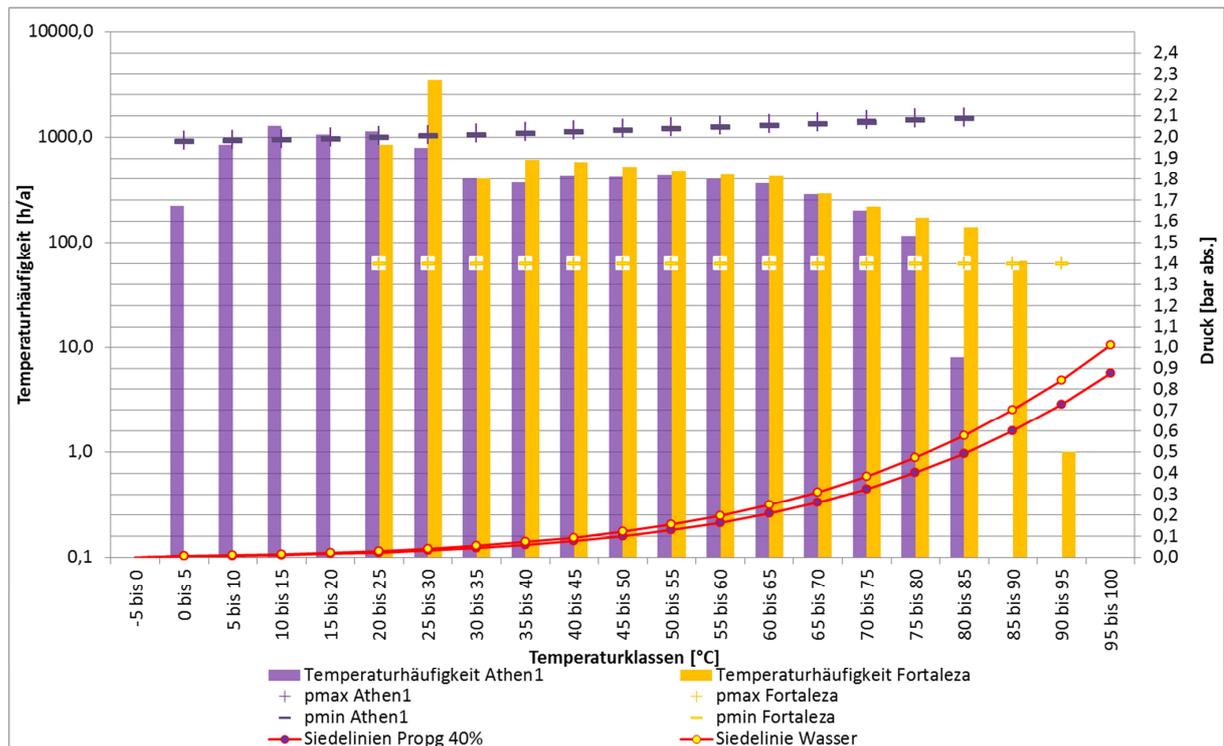


Abbildung 8-11: Druck-Temperatur Korrelation von Einkreis- und Zweikreis-Thermosiphon Systemen

Man sieht, dass der Druck im offenen Einkreisystem wie bereits erwähnt nur vom Füllstand des Speichers abhängig ist und sich somit nicht wesentlich mit der Wasser-Temperatur verändert. Es ist zusätzlich zu erkennen, dass sich der Druck im Zweikreisystem durch den Gaspolster nicht wesentlich ändert.

Da sich in Zweikreis-Thermosiphonsysteme in Kunststoffausführung ebenfalls keine Temperaturen über 95 °C bilden, hängt der Druck am Kollektor fast ausschließlich vom Fülldruck ab. Polymerwerkstoffe eignen sich daher drucktechnisch hervorragend für den Einsatz in Thermosiphon-Anlagen.

8.2 Druck-Belastungen im Systemvergleich

In diesem Abschnitt werden die Druckbelastungen des Kollektors (mit und ohne Überhitzungsschutz) über die Anwendungsgebiete verglichen.

Die folgende Abbildung 8-12 stellt die Häufigkeiten der Drücke im Kollektor des Referenzsystems sowie der auf Kunststoff basierenden Systeme zur Warmwasserbereitung mit und ohne Überhitzungsschutz am Standort Graz über ein Jahr dar.

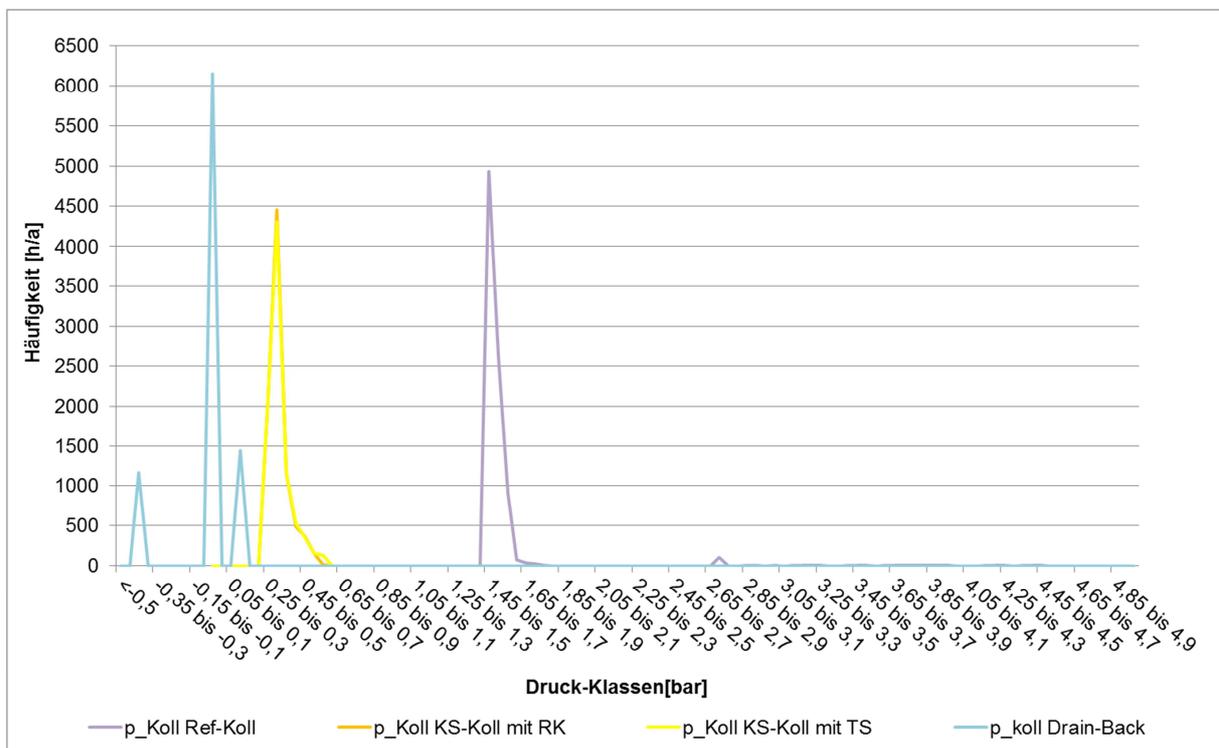


Abbildung 8-12: Vergleich der Druckhäufigkeiten im Kollektor der WW-Systeme mit und ohne Überhitzungsschutz am Standort Graz

Wie bereits in der Methodik zur Bestimmung der Druckhäufigkeiten beschrieben, erkennt man in der oberen Abbildung die grundlegenden Druckniveaus der unterschiedlichen Systeme anhand der höchsten Peaks des jeweilig betrachteten Systems. Durch die geeignete Wahl des Fülldruckes bzw. durch die Systemwahl des entleerenden Prinzips, kann das Druckniveau auf solarthermische Systeme in Kunststoffausführung angepasst werden.

Abbildung 8-13 zeigt einen Detailausschnitt, wodurch die Druckhäufigkeit auch in den höheren Klassen erkennbar wird.

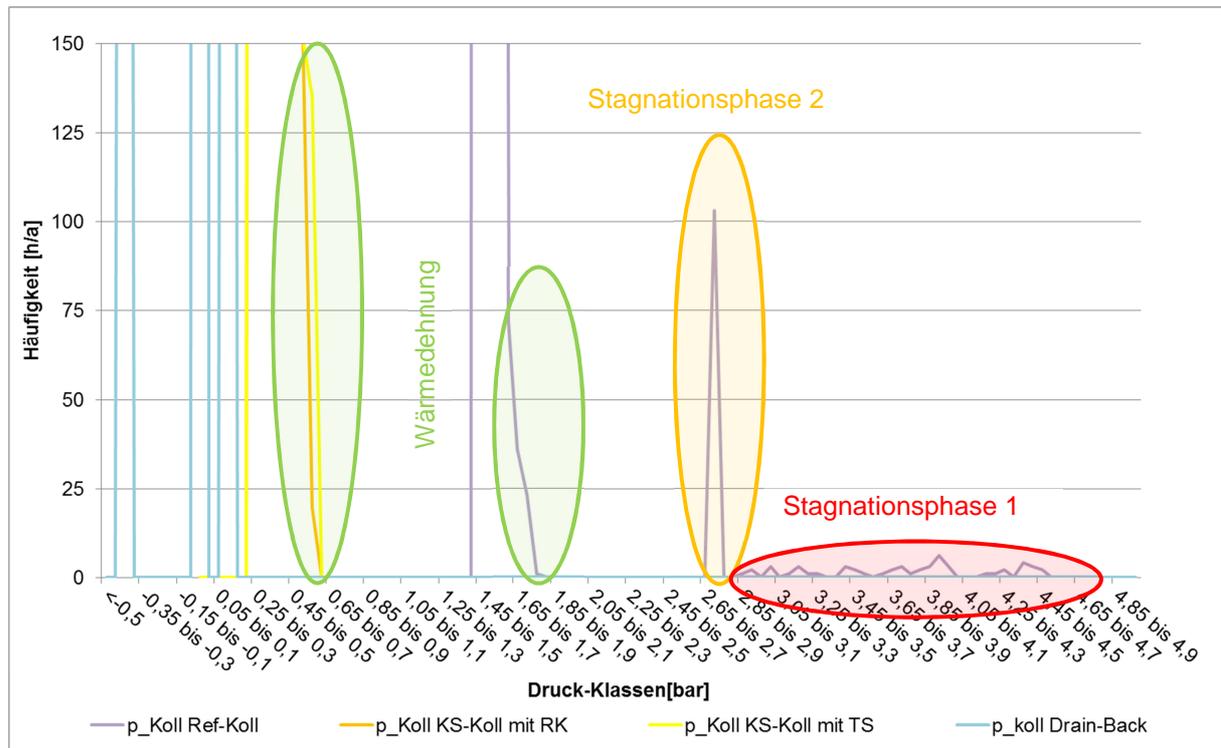


Abbildung 8-13: Vergleich der Druckhäufigkeiten im Kollektor der WW-Systeme mit und ohne Überhitzungsschutz am Standort Graz, „Zoom“

In der vergrößerten Darstellung sind in den grün markierten Bereichen die Druckerhöhungen des Referenzsystems ohne Überhitzungsschutz, sowie jene des in Kunststoff ausgeführten Warmwasserbereitungssystems mit einem Rückkühler beziehungsweise einer thermotropen Schicht als Überhitzungsschutz zu erkennen.

In Orange ist jener Bereich markiert, der die Häufigkeiten der Drücke im Kollektor nach der ersten Stunde der Stagnation darstellt. Die Häufigkeiten in der Druckklasse 2,7 bis 2,75 bar ergeben sich ausschließlich aus der Wärmedehnung und dem Dampfvolumen des gesamten Kollektorfeldes, das vom Ausdehnungsgefäß aufgenommen wird und einen entsprechenden Druck im Kollektor erzeugt.

Der in Rot markierte Bereich bildet die Häufigkeiten der ersten Stagnationsphase ab. In dieser Phase können je nach den klimatischen Bedingungen (Außenlufttemperatur, Einstrahlung) für einen schlecht entleerenden Kollektor Drücke von etwa 2,8 bis 4,5 bar entstehen.

Anhand der Abbildung 8-14 wird ein Vergleich der Druckhäufigkeiten des Referenzkollektors bei unterschiedlichen Entleerverhalten gezogen. Für die hier aufgetragenen Summenhäufigkeiten wurden die Stundenwerte der einzelnen Temperatur-Häufigkeitsklassen addiert. Die Anzahl der Stunden in den einzelnen Klassen werden von rechts nach links aufsummiert.

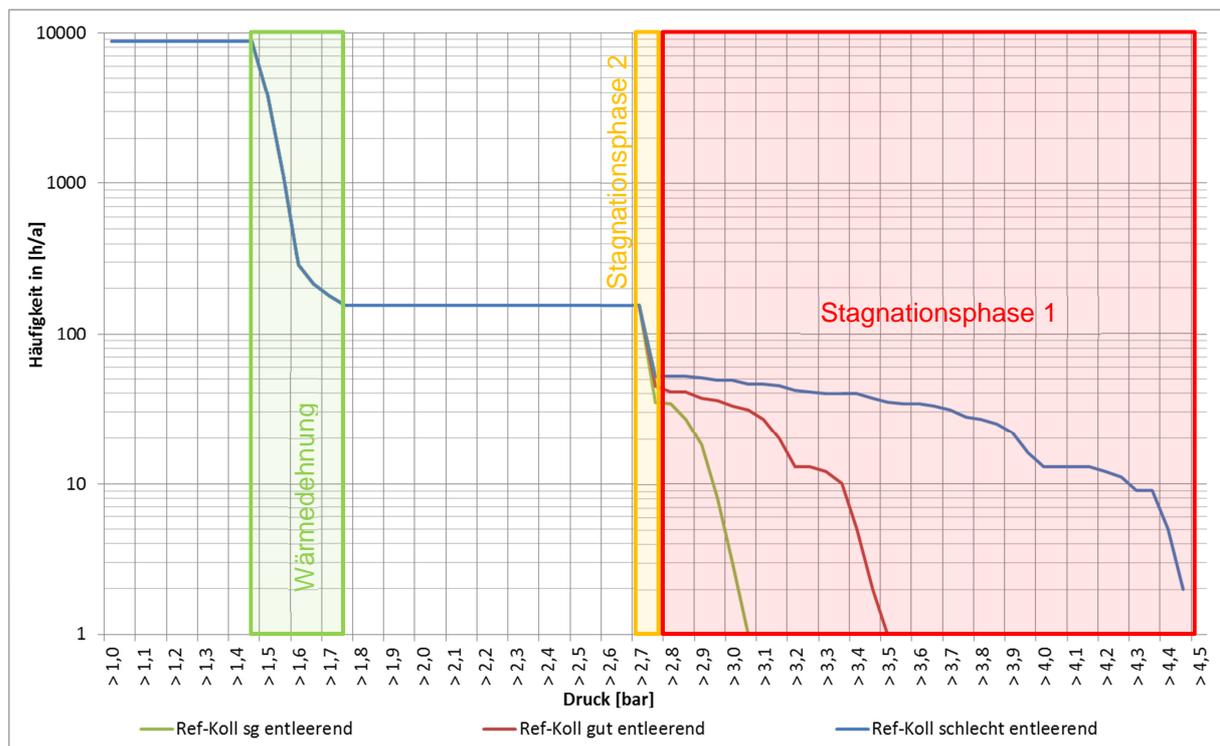


Abbildung 8-14: Vergleich der Summenhäufigkeiten der Kollektordrücke des Referenz WW-Systems bei unterschiedlichem Entleerungsverhalten am Standort Graz

In dieser Abbildung werden besonders gut die Materialanforderungen des Kollektors anhand der Drücke aufgezeigt. Klar zu erkennen ist, dass ein Kollektor mit sehr gut entleerendem Verhalten eine Maximalbelastung von unter 3,1 bar aufweist. Im Vergleich zu diesem, erreichen Kollektoren mit einem gut beziehungsweise einem schlechten Entleerungsverhalten durch die höheren Dampfleistungen in etwa 3,5 beziehungsweise 4,45 bar. Anhand dieses Diagrammes ist nochmals die Relevanz eines gut designten Strömungsverhaltens beim Entleer-Vorgang zu erkennen, wodurch eine erhebliche Reduzierung der Druckspitzen auf die druckbelasteten Bauteile in Kunststoffausführung erzielt werden kann, sollten Systeme ohne Überhitzungsschutz und nicht als entleerende Systeme ausgeführt werden.

Im nächsten Abschnitt wird ein Vergleich der Druckhäufigkeiten über die Anwendungsgebiete durchgeführt. Die nachfolgende Abbildung 8-15 zeigt die statistische Auswertung der Drücke im Kollektor anhand der Kunststoffsysteme zur Warmwasserbereitung für Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie für Systeme mit teilsolarer Raumheizung am mitteleuropäischem Standort.

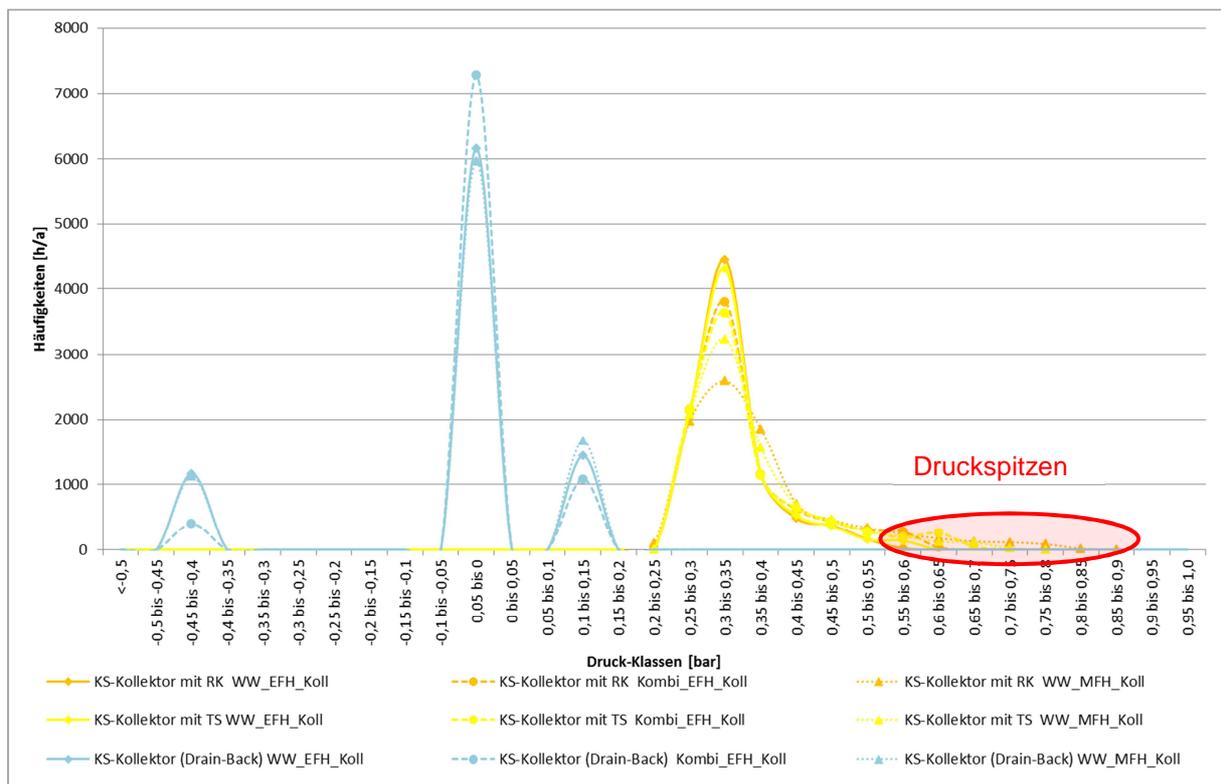


Abbildung 8-15: Vergleich der Druckhäufigkeiten im Kollektor anhand der Anwendungsgebiete der solarthermischen Systeme in Kunststoffausführung am Standort Graz

Der Vergleich der Druckspitzen zeigt, dass sich mit zunehmender Kollektorfläche und dadurch auch mit zunehmendem Flüssigkeitsvolumen in der Anlage (WW-EFH ~ 50 Liter; Kombi-EFH ~ 100 Liter; WW-MFH ~ 250 Liter), keine wesentlichen Druckveränderungen ergeben.

Bei entleerenden Systemen treten nur die drei fixen Druckniveaus beim Befüllen, im Betrieb sowie im Stillstand auf.

8.3 Zusammenfassung der hydraulischen Parameter und Druckbelastungen

In diesem Kapitel werden die hydraulischen Parameter der simulierten solarthermischen Anlagen sowie die Druckbelastungen auf Kollektorniveau und im Ausdehnungsgefäß für die Referenz sowie auf Kunststoffbasierenden Systeme zusammengefasst

8.3.1 Hydraulische Parameter der gepumpten Systeme

In den nachfolgenden Tabellen wird ein Überblick über die wesentlichen hydraulischen Parameter der gepumpten Referenz- sowie der auf Kunststoff basierenden Systeme mit und ohne Überhitzungsschutz gegeben. In der Übersicht werden beispielsweise die berechneten Ergebnisse aus der Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes, sowie maximale und minimale Drücke auf Kollektorebene aus der Simulation zusammengefasst. Weiters ist die Bauhöhe der Anlage angegeben. Diese stellt den Höhenunterschied zwischen Kollektor und

Ausdehnungsgefäß beziehungsweise bei Kunststoffsystemen in Drain-Back Ausführung die Höhe der Saugleitung von Kollektor bis zum Drain-Back Tank dar.

Tabelle 11: hydraulische Parameter der gepumpten Referenz und Kunststoffsysteme an den Referenzstandorten

			Referenz-System	KS-System mit RK	KS-System mit TS	KS-System Drain-Back	
Graz	Parameter	Abkürzung	Einheit	Wert			
				WW-EFH	Ausdehnungsgefäß	MAG	[L]
Flüssigkeitsvolumen Anlage	vanl	[L]	19,50	47,60	51,60	36,20	
Flüssigkeitsvorlage MAG	vf_l_v	[L]	4,3	1,9	1,9	-	
Wärmeträgerfluid		[-]	Propg 40%				
Ansprechdruck Sicherheitsventil	psafe	[bar]	5,4	5,4	5,4	-	
Fülldruck MAG	pfüll	[bar]	2,50	0,90	0,90	-	
min Druck in Kollektorebene	pmin	[bar]	1,46	0,27	0,27	-0,40	
max Druck in Kollektorebene	pmax	[bar]	4,45	0,57	0,60	0,14	
Bauhöhe der Anlage	h	[m]	10	6	6	4	
Kombi-EFH	Ausdehnungsgefäß	MAG	[L]	60	25	25	-
Flüssigkeitsvolumen Anlage	vanl	[L]	19,00	102,60	114,60	97,21	
Flüssigkeitsvorlage MAG	vf_l_v	[L]	11,40	4,00	4,00	-	
Wärmeträgerfluid		[-]	Propg 40%				
Ansprechdruck Sicherheitsventil	psafe	[bar]	5,4	5,4	5,4	-	
Fülldruck MAG	pfüll	[bar]	2,70	0,90	0,90	-	
min Druck in Kollektorebene	pmin	[bar]	1,68	0,26	0,26	-0,40	
max Druck in Kollektorebene	pmax	[bar]	4,40	0,62	0,67	0,14	
Bauhöhe der Anlage	h	[m]	10	6	6	4	
WW-MFH	Ausdehnungsgefäß	MAG	[L]	140	60	80	-
Flüssigkeitsvolumen Anlage	vanl	[L]	44,90	236,40	258,40	221,88	
Flüssigkeitsvorlage MAG	vf_l_v	[L]	21,40	6,40	8,60	-	
Wärmeträgerfluid		[-]	Propg 40%				
Ansprechdruck Sicherheitsventil	psafe	[bar]	5,40	5,40	5,40	-	
Fülldruck MAG	pfüll	[bar]	2,50	1,80	1,80	-	
min Druck in Kollektorebene	pmin	[bar]	0,98	0,24	0,25	-0,40	
max Druck in Kollektorebene	pmax	[bar]	4,12	0,86	0,77	0,14	
Bauhöhe der Anlage	h	[m]	15	15	15	4	

Tabelle 11 (1. Forts.)

				Athen1				
Athen1	Kombi-EFH	Ausdehungsgefäß	MAG	[L]	60	18	18	-
		Flüssigkeitsvolumen Anlage	vanl	[L]	19,60	69,80	79,80	60,00
		Flüssigkeitsvorlage MAG	vf_v	[L]	8,60	2,80	2,80	-
		Wärmeträgerfluid		[-]	Proppg 40%			
		Ansprechdruck Sicherheitsventil	psafe	[bar]	5,40	5,40	5,40	-
		Fülldruck MAG	pfüll	[bar]	2,00	0,60	0,60	-
		min Druck in Kollektorebene	pmin	[bar]	1,49	0,29	0,29	-0,40
		max Druck in Kollektorebene	pmax	[bar]	2,98	0,60	0,65	0,14
	Bauhöhe der Anlage	h	[m]	10	6	6	4	
	WW-MFH	Ausdehungsgefäß	MAG	[L]	150	50	50	-
		Flüssigkeitsvolumen Anlage	vanl	[L]	47,60	181,80	193,80	153,90
		Flüssigkeitsvorlage MAG	vf_v	[L]	21,40	7,90	7,90	-
		Wärmeträgerfluid		[-]	Proppg 40%			
		Ansprechdruck Sicherheitsventil	psafe	[bar]	5,40	5,40	5,40	-
		Fülldruck MAG	pfüll	[bar]	2,00	0,60	0,60	-
		min Druck in Kollektorebene	pmin	[bar]	1,89	0,29	0,29	-0,40
max Druck in Kollektorebene		pmax	[bar]	3,90	0,58	0,59	0,14	
Bauhöhe der Anlage	h	[m]	6	6	6	4		
Athen2	Kombi-EFH	Ausdehungsgefäß	MAG	[L]	120	18	25	-
		Flüssigkeitsvolumen Anlage	vanl	[L]	39,20	82,60	1016,00	72,00
		Flüssigkeitsvorlage MAG	vf_v	[L]	21,4	2,8	4,0	-
		Wärmeträgerfluid		[-]	Proppg 40%			
		Ansprechdruck Sicherheitsventil	psafe	[bar]	5,4	5,4	5,4	-
		Fülldruck MAG	pfüll	[bar]	2,00	0,60	0,60	-
		min Druck in Kollektorebene	pmin	[bar]	1,49	0,29	0,29	-0,40
		max Druck in Kollektorebene	pmax	[bar]	3,81	0,68	0,59	0,14
	Bauhöhe der Anlage	h	[m]	10	6	6	4	
	WW-MFH	Ausdehungsgefäß	MAG	[L]	300	50	50	-
		Flüssigkeitsvolumen Anlage	vanl	[L]	96,00	210,00	225,80	179,90
		Flüssigkeitsvorlage MAG	vf_v	[L]	42,9	7,9	7,9	-
		Wärmeträgerfluid		[-]	Proppg 40%			
		Ansprechdruck Sicherheitsventil	psafe	[bar]	5,4	5,4	5,4	-
		Fülldruck MAG	pfüll	[bar]	2,00	0,60	0,60	-
		min Druck in Kollektorebene	pmin	[bar]	1,89	0,29	0,29	-0,40
max Druck in Kollektorebene		pmax	[bar]	3,82	0,64	0,67	0,14	
Bauhöhe der Anlage	h	[m]	6	6	6	4		
Pretoria	WW-MFH	Ausdehungsgefäß	MAG	[L]	300	35	35	-
		Flüssigkeitsvolumen Anlage	vanl	[L]	85,80	169,80	179,80	157,90
		Flüssigkeitsvorlage MAG	vf_v	[L]	42,9	5,5	5,5	-
		Wärmeträgerfluid		[-]	Proppg 40%			
		Ansprechdruck Sicherheitsventil	psafe	[bar]	5,4	5,4	5,4	-
		Fülldruck MAG	pfüll	[bar]	2,00	0,00	0,00	-
		min Druck in Kollektorebene	pmin	[bar]	1,89	0,29	0,29	-0,40
		max Druck in Kollektorebene	pmax	[bar]	3,95	0,69	0,72	0,14
Bauhöhe der Anlage	h	[m]	6	6	6	4		
Fortaleza	WW-MFH	Ausdehungsgefäß	MAG	[L]	50	35	35	-
		Flüssigkeitsvolumen Anlage	vanl	[L]	22,20	155,80	171,80	153,90
		Flüssigkeitsvorlage MAG	vf_v	[L]	7,1	5,5	5,5	-
		Wärmeträgerfluid		[-]	Proppg 10%			
		Ansprechdruck Sicherheitsventil	psafe	[bar]	5,4	5,4	5,4	-
		Fülldruck MAG	pfüll	[bar]	2,00	0,00	0,00	-
		min Druck in Kollektorebene	pmin	[bar]	1,90	0,30	0,30	-0,40
		max Druck in Kollektorebene	pmax	[bar]	3,62	0,53	0,56	0,14
Bauhöhe der Anlage	h	[m]	6	6	6	4		

Tabelle 11 (2. Forts.)

Peking	Kombi-EFH	Ausdehnungsgefäß	MAG	[L]	80	18	18	-
		Flüssigkeitsvolumen Anlage	vanl	[L]	21,50	70,60	78,60	58,80
		Flüssigkeitsvorlage MAG	vfl_v	[L]	15,1	2,8	2,8	-
		Wärmeträgerfluid		[-]	Propp 40%			
		Ansprechdruck Sicherheitsventil	psafe	[bar]	5,4	5,4	5,4	-
		Fülldruck MAG	pfüll	[bar]	2,70	0,90	0,90	-
		min Druck in Kollektorebene	pmin	[bar]	1,68	0,27	0,26	-0,40
		max Druck in Kollektorebene	pmax	[bar]	3,98	0,56	0,63	0,14
		Bauhöhe der Anlage	h	[m]	10	6	6	4
	WW-MFH	Ausdehnungsgefäß	MAG	[L]	200	50	50	-
		Flüssigkeitsvolumen Anlage	vanl	[L]	59,30	213,80	229,80	187,90
		Flüssigkeitsvorlage MAG	vfl_v	[L]	28,6	7,9	7,9	-
		Wärmeträgerfluid		[-]	Propp 40%			
		Ansprechdruck Sicherheitsventil	psafe	[bar]	5,4	5,4	5,4	-
		Fülldruck MAG	pfüll	[bar]	2,50	0,90	0,90	-
		min Druck in Kollektorebene	pmin	[bar]	1,90	0,26	0,26	-0,40
		max Druck in Kollektorebene	pmax	[bar]	3,32	0,63	0,66	0,14
		Bauhöhe der Anlage	h	[m]	6	6	6	4

Tabelle 11 bestätigt, dass die Druckbelastungen für Kunststoffsysteme durch einen Überhitzungsschutz (Rückkühlprinzip, thermotrope Schicht) und durch die Wahl eines entsprechenden hydraulischen Konzeptes (Drain-Back) wesentlich reduziert werden können. Weiters können die Ausdehnungsgefäße in Systemen mit Überhitzungsschutz aufgrund der Vermeidung von Dampf kleiner dimensioniert werden.

8.3.2 Druckbelastungen der gepumpten Systeme

Um auch die Häufigkeitsauswertungen der Druckbelastungen am Kollektor und im Ausdehnungsgefäß zusammenfassend darzustellen, sind diese in der nachfolgenden Tabelle 12 angeführt. Die Druckklassen beziehen sich auf Absolut Werte (bar abs.). Weiters wird bei den Referenzkollektoren zwischen sehr gutem (sg), gutem und schlechtem Entleerungsverhalten des Kollektors unterschieden.

Tabelle 12: Ergebnisse der Druckauswertungen der gepumpten Referenz und Kunststoffsysteme an den Referenzstandorten in Stunden pro Jahr

Druckklassen [bar abs.]		WW-EFH										Kombi-EFH										WW_MFH													
		-0,55 bis 0	0,05 bis 0,5	0,55 bis 1,0	1,05 bis 1,5	1,55 bis 2,0	2,05 bis 2,5	2,55 bis 3,0	3,05 bis 3,5	3,55 bis 4,0	4,05 bis 4,5	4,55 bis 5,0	-0,55 bis 0	0,05 bis 0,5	0,55 bis 1,0	1,05 bis 1,5	1,55 bis 2,0	2,05 bis 2,5	2,55 bis 3,0	3,05 bis 3,5	3,55 bis 4,0	4,05 bis 4,5	4,55 bis 5,0	-0,55 bis 0	0,05 bis 0,5	0,55 bis 1,0	1,05 bis 1,5	1,55 bis 2,0	2,05 bis 2,5	2,55 bis 3,0	3,05 bis 3,5	3,55 bis 4,0	4,05 bis 4,5	4,55 bis 5,0	
Graz	Referenz sg	p_MAG [h/a]	0	0	0	0	0	4936	3669	0	155	0	0	0	0	0	0	8507	0	0	253	0	0	0	0	0	0	0	0	4973	3737	0	44	6	0
		p_KoII [h/a]	0	0	0	4936	3669	0	152	3	0	0	0	0	0	8507	0	0	226	27	0	0	0	0	0	0	4973	3737	0	38	6	5	1	0	0
	Referenz gut	p_MAG [h/a]	0	0	0	0	0	4936	3669	0	142	13	0	0	0	0	0	8507	0	0	234	19	0	0	0	0	0	4973	3737	0	42	8	0	0	
		p_KoII [h/a]	0	0	0	4936	3669	0	122	32	1	0	0	0	0	8507	0	0	212	17	24	0	0	0	0	4973	3737	0	39	3	0	1	7	0	
	Referenz schlecht	p_MAG [h/a]	0	0	0	0	0	4936	3669	0	114	29	12	0	0	0	0	8507	0	0	203	50	0	0	0	0	4973	3737	0	31	19	0	0	0	
		p_KoII [h/a]	0	0	0	4936	3669	0	106	14	22	13	0	0	0	8507	0	0	193	9	51	0	0	0	0	4973	3737	0	22	10	3	4	11	0	
	KS-System mit RK	p_MAG [h/a]	0	0	7728	1032	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7103	1657	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		p_KoII [h/a]	0	8584	176	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8151	609	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7676	1084	0	0	0	0	0	0	0	0
	KS-System mit TS	p_MAG [h/a]	0	0	7587	1173	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6925	1835	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8023	737	0	0	0	0	0
		p_KoII [h/a]	0	8473	287	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7995	765	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8023	737	0	0	0	0	0	0	0	0
KS-System Drain-Back	p_KoII [h/a]	7249	1511	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7594	1166	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7093	1667	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Athen1	Referenz sg	p_MAG [h/a]											0	0	0	0	0	3410	5284	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		p_KoII [h/a]											0	0	0	3410	5284	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8681	62	0	11	6	0	0
	Referenz gut	p_MAG [h/a]											0	0	0	0	0	3410	5284	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		p_KoII [h/a]											0	0	0	3410	5284	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8681	62	0	11	6	0	0
	Referenz schlecht	p_MAG [h/a]											0	0	0	0	0	3410	5284	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		p_KoII [h/a]											0	0	0	3410	5284	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8681	62	0	11	6	0	0
	KS-System mit RK	p_MAG [h/a]											0	0	6363	2397	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7347	1413	0	0	0	0	0	0	0
		p_KoII [h/a]											0	7698	1062	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8521	239	0	0	0	0	0	0	0	0
	KS-System mit TS	p_MAG [h/a]											0	0	6140	2620	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7244	1516	0	0	0	0	0	0	0
		p_KoII [h/a]											0	7380	1380	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8485	275	0	0	0	0	0	0	0	0
KS-System Drain-Back	p_KoII [h/a]											7491	1269	1269	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7144	1616	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Athen2	Referenz sg	p_MAG [h/a]											0	0	0	0	2911	5588	0	261	0	0	0	0	0	0	0	2997	5715	0	0	48	0	0	
		p_KoII [h/a]											0	0	0	2911	5559	29	254	7	0	0	0	0	0	0	8584	128	0	0	48	0	0	0	
	Referenz gut	p_MAG [h/a]											0	0	0	0	2911	5588	0	258	3	0	0	0	0	0	0	2997	5715	0	0	48	0	0	
		p_KoII [h/a]											0	0	0	2911	5504	84	254	0	7	0	0	0	0	0	8584	128	0	0	48	0	0	0	
	Referenz schlecht	p_MAG [h/a]											0	0	0	0	2911	5588	0	254	7	0	0	0	0	0	0	2997	5715	0	0	48	0	0	
		p_KoII [h/a]											0	0	0	2911	5479	109	254	0	7	0	0	0	0	0	8573	139	0	0	48	0	0	0	
	KS-System mit RK	p_MAG [h/a]											0	0	6034	2726	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6972	1788	0	0	0	0	0	0	
		p_KoII [h/a]											0	7203	1557	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8201	560	0	0	0	0	0	0	0	
	KS-System mit TS	p_MAG [h/a]											0	0	6311	2449	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6868	1892	0	0	0	0	0	0	0
		p_KoII [h/a]											0	7617	1143	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8037	723	0	0	0	0	0	0	0	0
KS-System Drain-Back	p_KoII [h/a]											7557	1203	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7094	1666	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabelle 12 (1. Forts.)

Druckklassen [bar abs.]		WW-EFH											Kombi-EFH											WW_MFH											
		-0,55 bis 0	0,05 bis 0,5	0,55 bis 1,0	1,05 bis 1,5	1,55 bis 2,0	2,05 bis 2,5	2,55 bis 3,0	3,05 bis 3,5	3,55 bis 4,0	4,05 bis 4,5	4,55 bis 5,0	-0,55 bis 0	0,05 bis 0,5	0,55 bis 1,0	1,05 bis 1,5	1,55 bis 2,0	2,05 bis 2,5	2,55 bis 3,0	3,05 bis 3,5	3,55 bis 4,0	4,05 bis 4,5	4,55 bis 5,0	-0,55 bis 0	0,05 bis 0,5	0,55 bis 1,0	1,05 bis 1,5	1,55 bis 2,0	2,05 bis 2,5	2,55 bis 3,0	3,05 bis 3,5	3,55 bis 4,0	4,05 bis 4,5	4,55 bis 5,0	
Pretoria	Referenz sg	p_MAG [h/a]																							0	0	0	0	0	2973	5754	0	0	33	0
		p_Koll [h/a]																							0	0	0	0	8618	109	0	32	1	0	0
	Referenz gut	p_MAG [h/a]																							0	0	0	0	0	2973	5754	0	0	33	0
		p_Koll [h/a]																							0	0	0	0	8612	115	0	32	1	0	0
	Referenz schlecht	p_MAG [h/a]																							0	0	0	0	0	0	8715	0	43	2	0
		p_Koll [h/a]																							0	0	0	0	8624	19	119	0	2	0	0
	KS-System mit RK	p_MAG [h/a]																							0	0	6268	2492	0	0	0	0	0	0	0
		p_Koll [h/a]																							0	7595	1165	0	0	0	0	0	0	0	0
KS-System mit TS	p_MAG [h/a]																							0	0	6161	2599	0	0	0	0	0	0	0	
	p_Koll [h/a]																							0	7476	1284	0	0	0	0	0	0	0	0	
KS-System Drain-Back	p_Koll [h/a]																							7562	1198	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Fortaleza	Referenz sg	p_MAG [h/a]																							0	0	0	0	0	0	8259	0	501	0	0
		p_Koll [h/a]																							0	0	0	0	8092	61	498	8	101	0	0
	Referenz gut	p_MAG [h/a]																							0	0	0	0	0	0	8259	0	501	0	0
		p_Koll [h/a]																							0	0	0	0	8098	38	515	7	102	0	0
	Referenz schlecht	p_MAG [h/a]																							0	0	0	0	0	0	8259	0	501	0	0
		p_Koll [h/a]																							0	0	0	0	8092	29	530	0	109	0	0
	KS-System mit RK	p_MAG [h/a]																							0	0	7246	1514	0	0	0	0	0	0	0
		p_Koll [h/a]																							0	8377	383	0	0	0	0	0	0	0	0
KS-System mit TS	p_MAG [h/a]																							0	0	7012	1748	0	0	0	0	0	0	0	
	p_Koll [h/a]																							0	7868	892	0	0	0	0	0	0	0	0	
KS-System Drain-Back	p_Koll [h/a]																							6666	2094	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Peking	Referenz sg	p_MAG [h/a]	0	0	0	0	0	0	8715	0	43	2	0	0	0	0	0	3756	5003	0	1	0	0												
		p_Koll [h/a]	0	0	0	0	8675	40	43	0	2	0	0	0	0	0	0	8725	34	0	1	0	0												
	Referenz gut	p_MAG [h/a]	0	0	0	0	0	0	8715	0	43	2	0	0	0	0	0	3756	5003	0	1	0	0												
		p_Koll [h/a]	0	0	0	0	8655	57	46	0	2	0	0	0	0	0	0	8724	35	0	1	0	0												
	Referenz schlecht	p_MAG [h/a]	0	0	0	0	0	0	8715	0	43	2	0	0	0	0	0	0	8715	0	43	2	0												
		p_Koll [h/a]	0	0	0	0	8620	19	119	0	2	0	0	0	0	0	0	8624	19	119	0	2	0												
	KS-System mit RK	p_MAG [h/a]	0	0	6403	2357	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7026	1734	0	0	0	0												
		p_Koll [h/a]	0	7983	777	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8555	205	0	0	0	0	0												
KS-System mit TS	p_MAG [h/a]	0	0	6059	2701	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6885	1875	0	0	0	0													
	p_Koll [h/a]	0	7535	1225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8425	335	0	0	0	0	0													
KS-System Drain-Back	p_Koll [h/a]	7372	1388	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7205	1555	0	0	0	0	0														

8.3.1 Hydraulische Parameter der Thermosiphon-Systeme

In den nachfolgenden Tabellen wird ein Überblick über die wesentlichen hydraulischen Parameter der Referenz- sowie auf Kunststoff basierenden Thermosiphonsysteme gegeben. Das Flüssigkeitsvolumen in Zweikreissystemen umfasst den Kollektorinhalt, das Volumen der Vor- und Rücklaufleitungen und das Volumen des Mantelwärmetauschers abzüglich des Luftpolsters. Das Flüssigkeitsvolumen des Einkreis-Thermosiphonsystems ermittelt sich aus dem Kollektorinhalt den Rohrleitungen und dem Fassungsvermögen des Speichers. Weiters sind die maximal und minimal auftretenden Drücke im Kollektor angegeben.

Die entstehenden Drücke wurden bei einer gesicherten Warmwasserentnahme ermittelt.

Tabelle 13: hydraulische Parameter der Referenz- und Kunststoff-Thermosiphonsysteme an den Referenzstandorten

	Athen1		Athen2		Pretoria		Fortaleza		Peking		Einheit
	Referenz-System	KS-System									
System-Konfiguration	Zweikreis	Zweikreis	Zweikreis	Zweikreis	Zweikreis	Zweikreis	Einkreis	Einkreis	Zweikreis	Zweikreis	[-]
Flüssigkeitsvolumen Anlage	16,40	25,98	20,75	29,65	16,90	22,09	106,00	115,60	14,20	23,55	[L]
Flüssigkeitsvolumen MWT	12,40	12,40	12,40	13,40	11,10	11,10	-	-	9,60	9,60	[L]
Luftpolster im MWT	0,73	1,18	1,02	1,47	0,77	1,04	-	-	0,67	1,14	[L]
Wärmeträgerfluid	Propp 40%	Propp 40%	Propp 40%	Propp 40%	Propp 40%	Propp 40%	Wasser	Wasser	Propp 40%	Propp 40%	[-]
Ansprechdruck Sicherheitsventil	3	3	3	3	3	3	-	-	3	3	[bar]
Fülldruck Anlage	1	1	1	1	1	1	-	-	1	1	[bar]
min Druck in Kollektorebene	0,981	0,982	0,982	0,982	0,981	0,981	1,400	1,400	0,973	0,973	[bar]
max Druck in Kollektorebene	1,093	1,095	1,104	1,104	1,095	1,099	1,400	1,400	1,099	1,101	[bar]

8.3.1 Druckbelastungen der Thermosiphon-Systeme

In der nachfolgenden Tabelle 14 werden die ermittelten Häufigkeiten der Drücke im Kollektor nochmals für alle Thermosiphonsysteme dargestellt.

Tabelle 14: Ergebnisse der Druckauswertungen von Referenz- und Kunststoff-Thermosiphonsysteme an den Referenzstandorten in Stunden pro Jahr

Druckklassen [bar]	Athen1		Athen2		Pretoria		Fortaleza		Peking	
	Referenz-System	KS-System								
	p_Koll [h/a]	p_Koll [h/a]								
0 bis 0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,55 bis 1,0	3401	3073	2937	3061	2964	3191	0	0	3672	3495
1,05 bis 1,5	5359	5687	5823	5699	5796	5569	8760	8760	5088	5265
1,55 bis 2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,05 bis 2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Hersteller von solarthermischen Anlagen sind stetig um eine Senkung der Herstellungskosten, bemüht. Die massiv steigenden Weltmarktpreise für die derzeit eingesetzten Primärwerkstoffe wie Aluminium oder Kupfer wirken jedoch den Bemühungen nach weiteren Kostensenkungen in der Kollektorfertigung entgegen. Eine Verwendung von günstigeren Polymermaterialien hat neben der Einsparung von kostspieligem Kupfer und Aluminium auch Vorteile bei der Montage durch eine merkliche Gewichtsreduzierung. Weiters bieten Kunststoffe das große Potential der Realisierung von Massenproduktion, da teilweise ganze Komponenten aus einem Stück, in einem einzigen Arbeitsschritt (z.B.: Extrusion) hergestellt werden können. Dadurch können hohe Stückzahlen in kurzer Zeit produziert werden, was ein großes Kostensenkungspotential darstellt. Allerdings sind Solarkollektoren oftmals hohen thermischen als auch Druckbelastungen ausgesetzt, wodurch innovative Lösungen gefordert werden. Diese Herausforderungen sollen im Rahmen des Projektes „Solarthermische Systeme aus Polymerwerkstoffen (SolPol)“ bewältigt werden. Das Ziel ist es, neuartige Kollektoren und Systemkomponenten aus Kunststoffen zu entwickeln und diese in weiterer Folge zur Marktreife zu bringen. Im Rahmen des Subprojektes SolPol1 sollen die Leistungsanforderungen an Polymermaterialien in solarthermischen Systemen vor allem hinsichtlich Temperatur- und Druckbelastungen ermittelt werden.

In dieser Arbeit wurden solarthermische Referenz-Systeme an fünf repräsentativen Referenzstandorten untersucht. Durch das breite Spektrum an ortsüblichen hydraulischen Systemen (gepumpte, entleerende und Thermosiphon-Systeme) und Anwendungsbereichen (Warmwasserbereitung, Kombi-System) konnte ein breiter Markt abgedeckt werden.

Solarthermische Systeme in Kunststoffausführung benötigen innovative Lösungsansätze und kostengünstige Materialien. Es wurden die thermischen und Druckbelastungen bei Kunststoff-Systemen mit integriertem Überhitzungsschutz, in entleerenden Systemen und im ungefüllten Zustand des Kollektors untersucht und anhand des Referenzsystems verglichen.

Zusammenfassung der Ergebnisse der auf kunststoffbasierenden Systeme mit Rückkühlerfunktion:

- Der Einsatz eines Rückkühlers oder die Hinterlüftung des Absorbers kann ein wirksames Mittel zur Temperaturbegrenzung sein.
- Die Kollektorflächenvergrößerung zur Erreichung des Referenzdeckungsgrades ist grundsätzlich vom konkurrierenden Referenzsystem und dessen Wirkungsgrad abhängig. (Der Vergleich mit einem selektivbeschichteten Kollektor zeigt eine Flächenerhöhung von rund 40 bis 50 Prozent). Weites benötigt ein System mit einem Rückkühler eine Aufständigung, da der sich auf der Rückseite des Kollektors befindliche

Rückkühler seine Wärme durch Konvektion an die Umgebung abgeben muss. Dadurch ist eine Fassaden- oder Dachintegration nur schwer zu realisieren. Mit dem Hinterlüftungsprinzip nach ECO-Flare wäre eine Dachintegration durchaus möglich.

- Das Ventil zur Öffnung des Rückkühlkreislaufes weist in dieser Arbeit ein Schaltintervall im Bereich 85-90 °C auf (hier kann jedes Schaltintervall beliebig eingestellt werden). Ist das Ventil geöffnet, stellt sich annähernd ein Gleichgewicht zwischen aufgenommener Energie über den Absorber und abgegebener Energie über den Rückkühler ein. Dementsprechend wird die mittlere Kollektortemperatur auf rund 90 bis 95 °C begrenzt.
- Durch die Überhitzungsschutzmaßnahmen könnten Standardpolymere, die bis etwa 95 °C langzeittemperaturbeständig sind, bei der Herstellung verwendet werden
- Im ungefüllten Zustand (entleerter Kollektor ohne Anschluss an die Systemhydraulik), verliert der Rückkühler seine Wirkung, da kein Medium durch den Rückkühler fließt und dadurch ein Kühleffekt nicht erzielt werden kann. Die auftretenden mittleren Kollektortemperaturen sind vom Wirkungsgrad des Kunststoffkollektors und den klimatischen Rahmenbedingungen abhängig. Hierbei werden Temperaturen bei maximalen äußeren Belastungen (Einstrahlung und Umgebungstemperatur) von rund 175 °C erreicht. Das Prinzip der Hinterlüftung (ECO-Flare) funktioniert auch im ungefüllten Zustand und begrenzt die Kollektortemperatur.
- Die mechanischen Belastungen in Form von Druck sind minimal, da kein Wechsel zwischen flüssiger und gasförmiger Phase auftritt. Das Druckniveau während des Betriebes und im Stillstand ist fast ausschließlich vom Fülldruck abhängig.

Zusammenfassung der Ergebnisse der auf Kunststoff basierenden Systeme mit thermotroper Schicht:

- Der Einsatz einer thermotropen Schicht kann ein wirksames Mittel zur Temperaturbegrenzung sein. In der Solarthermie sind Anwendungen von thermotropen Schichten bis dato noch nicht bekannt.
- Die Transparenz der thermotropen Schicht sollte im ungeschalteten Zustand möglichst hoch sein, um eine möglichst hohe Kollektoreffizienz zu erreichen.
- Die Kollektorflächenvergrößerung zur Erreichung des Referenzdeckungsgrades hängt vom verglichenen Referenzsystem ab. Vergleicht man die Kollektorfelderhöhung des Kunststoffsystems mit einer thermotropen Schicht mit jener mit Rückkühlfunktion, muss bei einem Transmissionskoeffizienten von 95 Prozent (erstes Schaltintervall von 70 bis 85 °C) im ungeschalteten Zustand von rund 10 Prozent mehr Kollektorfläche ausgegangen werden.

- Im geschalteten Zustand (Hauptschaltintervall 85 bis 90 °C) kann mit einer Transmissionsverminderung auf rund 30 Prozent die mittlere Kollektortemperatur auf rund 90 bis 95 °C begrenzt werden.
- Durch die Überhitzungsschutzmaßnahme könnten theoretisch Standardpolymere (z.B.: Polypropylen), die bis etwa 95 °C langzeittemperaturbeständig sind, für die Herstellung herangezogen werden.
- Der ungefüllte Zustand eines Kollektors (Absorber oder Abdeckung) mit thermotroper Schicht wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.
- Die Druckbelastungen sind mangels Übergang von der flüssiger in die gasförmige Phase minimal. Das Druckniveau während des Betriebes und im Stillstand hängt fast ausschließlich vom Fülldruck ab.

Zusammenfassung der Ergebnisse der auf Kunststoff basierenden entleerenden Systeme:

- Die Kollektorflächenvergrößerung zur Erreichung des Referenzdeckungsgrades ist grundsätzlich vom Vergleichskollektor und dessen Wirkungsgrad abhängig. Vergleicht man das entleerende System mit einem auf kunststoffbasierendem System mit Rückkühlfunktion, benötigten annähernd die gleichen Kollektorflächen.
- Die Sogwirkung der Flüssigkeitssäule und der daraus folgende Unterdruck in der Vorlaufleitung senken den Siedepunkt der Flüssigkeit. Daher ist auf die Bauhöhendifferenz zwischen der Kollektoroberkante und dem offenem Drain-Back Tank zu achten.
- Die Stillstands-Temperatur wird durch das hydraulische Konzept der Entleerung nicht beeinflusst und ist daher vom Wirkungsgrad des Kunststoffkollektors und den klimatischen Rahmenbedingungen abhängig. Daraus ergab sich, dass Pretoria sowie Fortaleza bedingt durch die hohen Einstrahlungswerte und Außenlufttemperaturen die höchsten Kollektormitteltemperaturen im entleerten Zustand von rund 175 °C aufweisen.
- Durch die auftretenden hohen Temperaturen müssen langzeittemperaturbeständige Hochleistungspolymere (bis 175 °C) verwendet werden .
- Die Druckbelastungen sind gering und abhängig von der Länge der Vorlaufleitung bis zum Drain-Back Tank (Saugwirkung = Unterdruck) und dem Höhenunterschied beim Befüllen des Kollektors (Höhendifferenz zwischen Ober- und Unterkante des Kollektors)

Zusammenfassung der Ergebnisse der auf kunststoffbasierenden Systeme in Thermosiphon-Ausführung:

- Nach dem Prinzip der Naturzirkulation werden die Systemkomponenten mit deutlich niedrigeren Maximaltemperaturen im Vergleich zu gepumpten Systemen ohne Überhitzungsschutz belastet. Es werden bei einer gesicherten Entnahme maximale

mittlere Kollektortemperaturen je nach klimatischen Bedingungen von nur rund 90 bis 95 °C erreicht.

- Im ungefüllten Zustand (entleerter Kollektor ohne Anschluss an die Systemhydraulik), ist die Höhe der mittleren Kollektortemperaturen vom Wirkungsgrad des Kunststoffkollektors und von den klimatischen Rahmenbedingungen abhängig. Dabei werden Temperaturen bei maximalen äußeren Belastungen (Einstrahlung und Umgebungstemperatur) von rund 175 °C erreicht.
- Die Druckbelastungen sind minimal, da kein Dampf entsteht. Das Druckniveau während des Betriebes und im Stillstand ist fast ausschließlich vom Fülldruck abhängig.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch den Einsatz von Überhitzungsschutzmaßnahmen die Temperaturbelastungen auf ein gewünschtes Maß reduziert werden können. Abhängig vom vergleichbaren Referenzsystem (Referenzkollektor) sind jedoch Kollektorflächenvergrößerungen bis etwa 60 Prozent einzukalkulieren. Dies ist oftmals eine Frage des Platzangebotes. Die Druckbelastungen befinden sich in einem für Kunststoffe durchaus beherrschbaren Rahmen und sind prinzipiell vom Fülldruck und der Wärmedehnung des Mediums abhängig. Durch die Unterbindung von Dampfbildung kann ein verhältnismäßig kleines Ausdehnungsgefäß herangezogen werden. Kostentreiber sind der notwendige Rückkühler oder die thermotrope Beschichtung.

Entleerende Systeme (Drain-Back) in Kunststoffausführung benötigen im Vergleich zu europäischen Systemen mit selektiv beschichteten Kollektoren rund 50 Prozent mehr Kollektorfläche. Der fehlende Überhitzungsschutz stellt höhere Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit, so dass in dieser Konfiguration ausschließlich technische Polymerwerkstoffe Verwendung finden. Die Druckbelastungen in Drain-Back-Systemen sind prinzipiell gering, jedoch sollte der Einfluss der Druckschwankungen bei den Füllvorgängen in die Konstruktion der Kollektoren einfließen.

Die Leistungsanforderungen an Polymerwerkstoffe in solarthermischen Systemen wurden in Temperatur- und Druckmatrizen für die fünf Referenzstandorte zusammengefasst. Im Rahmen der detaillierten Simulation der unterschiedlichen Anlagen, konnten die Ergebnisse der Simulationsprogramme nicht mit realen vermessenen Anlagen validiert werden. Das korrespondierende Projekt SolPol2 sieht jedoch in seinen Arbeitspaketen eine Validierung der Rechenmodelle, mit Messdaten erster aus Kunststoff gefertigter Funktionsmuster vor. Die ermittelten Häufigkeiten in den definierten Klassen, mit ihren Minimal und Maximalwerten bieten jedoch bereits jetzt eine gute Basis für weiterführende Arbeiten und Materialentwicklungen.

Literaturverzeichnis

- Brandstetter, F., Fink C., Hackstock R., Lazslo G., Riva R., Steffens R. (2004). Ausbildungsskriptum- Solarwärme , Arsenal Research, 1. Auflage, Wien
- Brunold, S. (2010). Entwicklung von Kunststoffkollektoren: Grundlegende Fragestellungen und Ergebnisse eines Forschungsprojektes. 20. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein: Ostbayrisches Technologie und Transfer Institut e.V. (OTTI)
- Duffie, J. A., Beckman, W.A. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons
- Eicker, U. (2012). Solare Technologien für Gebäude, Vieweg+Teuber Verlag, 2. Auflage
- ESTIF (2011). Solar Thermal Markets in Europe- Trends and Market Statistics 2010. Brüssel: European Solar Thermal Industrie Federation
- Fink, Ch., Brunner, Ch. (2012). Solarthermievorlesung an der FH Pinkafeld
- Fink, Ch., Riva, R. (2004). Solarunterstützte Wärmenetze im Geschoßwohnbau. Gleisdorf: Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie GmbH
- Fink, Ch., Riva, R. (2005). In Solarwärmeausbildung. Wien: klima aktiv Solarwärme
- Green European Foundation (2010). 27 Nationale Aktionspläne = 1 Europäische Energiepolitik? Brüssel: Green European Foundation
- Hausner, R (2001). Bericht: Solarthermische Kunststoffkollektoren mit integriertem Überhitzungsschutz. Gleisdorf: AEE Institut für Nachhaltige Technologien
- Hausner, R., Fink, Ch., (2001). Bericht: Stagnation Technology for Thermal Solar Systems. Gleisdorf: AEE Institut für Nachhaltige Technologien
- Hausner, R., Wallner, G.M., Resch K. (2011). Bericht: Solarthermische Kunststoffkollektoren mit integriertem Überhitzungsschutz. Gleisdorf: AEE Institut für Nachhaltige Technologien
- Hausner, R., Fink, Ch., Wagner, W., Riva, R., Hillerns, F. (2003). Bericht: Entwicklung von thermischen Solarsystemen mit unproblematischem Stagnationsverhalten. Gleisdorf: AEE Institut für Nachhaltige Technologien
- Jordan, U., Vajen, K. (2001). Influence of the DHW Load Profile on the Fractional Energy Saving: A Case Study of a solar Combi-System with TRNSYS Simulation, Journal of the Int. Solar Energy Society
- Ladener, H., Späte, F. (1999). Solaranlagen- Handbuch der thermischen Solarenergienutzung, (6. Auflage). Staufen: ökobuch Verlag

-
- Meyer, J. P., Tshimankinda, M. (1997). Domestic Hot Water Consumption in South African Houses For Developed and Developing Communities. International Journal of Energy Research, Vol. 21, No. 7, pp.667-673.
- Mayer J.P. (2006). Frischer geht´s nicht, Sonne, Wind und Wärme, 7/2006
- Scheure, J. (2008). Untersuchungen zum Stagnationsverhalten solarthermischer Kollektorfelder; Kassel university press GmbH, Kassel
- Schildberger, A. (2008). Diplomarbeit: Thermisch Eigenschaften von Sonnenkollektoren, FH Pinkafeld
- Streicher W. (2009): Sonnenenergienutzung, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung, Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz
- Streicher, W., Schnedl, K., Thür, A., Puschnig, P. (2012). Programmbeschreibung SHW, Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz
- Sultan, E.-A. (2007). Study Plastics Demand in Europe. Wien: Borealis Group AG
- Vela Solaris, (2012). Benutzerdokumentation Polysun Simulationssoftware, Version 5.10, Vela Solaris AG
- Wallner, G.M., Resch, K., Hausner, R. (2006). Solarthermische Kunststoffkollektoren mit integriertem Überhitzungsschutz; 8. Internationales Symposium für Sonnenenergienutzung, Solar 2006; Gleisdorf: AEE Institut für Nachhaltige Technologien
- Weiss, W., Biermayr, P. (2009). Potential of Solar Thermal in Europe, Gleisdorf: AEE Institut für Nachhaltige Technologien
- Weiss, W., Eberl, M. (2011). Solarthermie Marktentwicklung in Österreich. Sonne, Wind & Wärme 2011/3. Gleisdorf: AEE – Arbeitsgemeinschaft Erneuerbarer Energie – Dachverband
- Weiss, W., Mathner, F., (2011). Solar Heat Worldwide- Markets and Contribution to the Energy Supply 2009, Edition 2011. Gleisdorf: AEE Institut für Nachhaltige Technologien
- Weiss, W., Mathner, F., (2012). Solar Heat Worldwide- Markets and Contribution to the Energy Supply 2010, Edition 2012. Gleisdorf: AEE Institut für Nachhaltige Technologien
- Weiss W., Streicher W., Suter J-M., Kovacs P., Vajen K., Jordan U., Letz T., Bales C., Bengt P., Drück H., Visser H., Jaehnig D., (2003). Solar Heating Systems For Houses - A Design Handbook For Solar Combisystems, James & James Ltd.
- Wurm, N. (2012). Anforderungen an Polymermaterialien in solarthermischen Systemen. Gleisdorf: AEE Institut für Nachhaltige Technologien (unveröffentlicht)

Anhang A

A.1 Tagesverbrauchsprofile an den Referenzstandort

In der dargestellten Abbildung ist der prozentuelle Anteil des Tagesverbrauches an Warmwasser für alle fünf Referenzstandorte dargestellt.

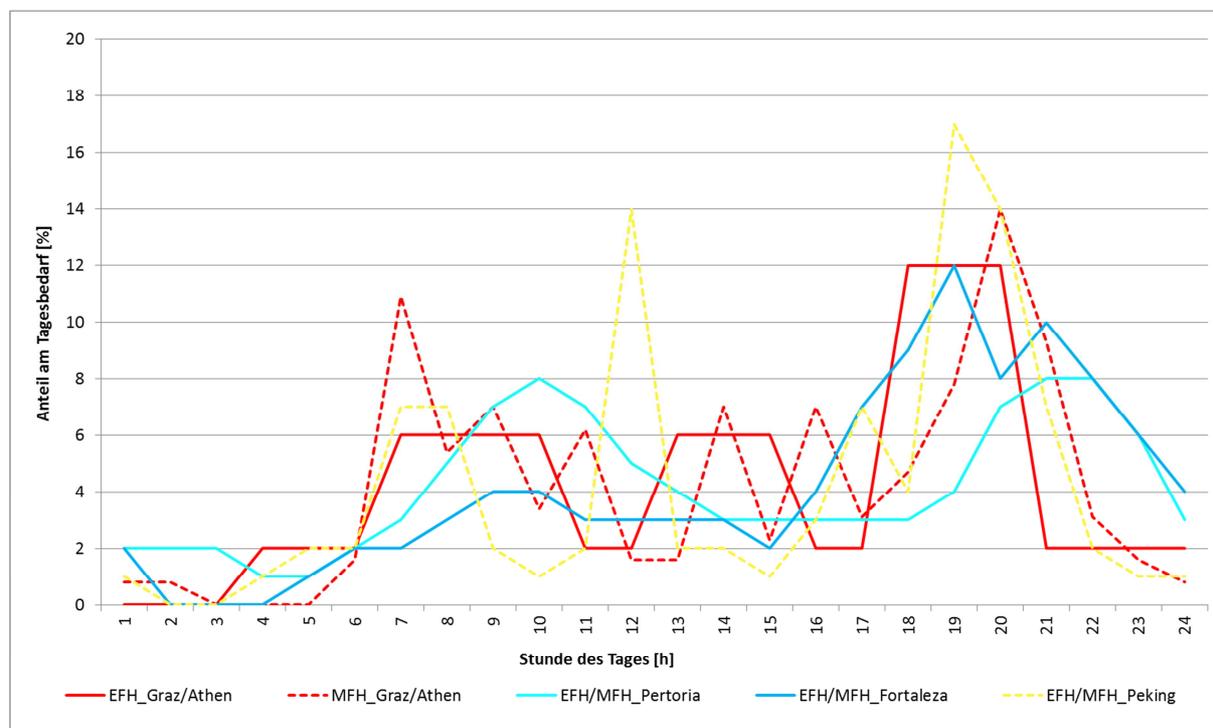


Abbildung 0-1: Tageslastprofile im Ein- und Mehrfamilienhaussektors für die Referenzstandorte

Dem Warmwasserbedarf für Graz und Athen im Einfamilienhaus-Sektor wurde ein Lastprofil mit Abendspitze zugrunde gelegt. Der verwendete Tagesverlauf im Mehrfamilienhaus-Sektor wurde von Jordan et al. (2001) aus umfangreichen Messungen, Befragungen sowie Wahrscheinlichkeitsrechnungen erstellt. Das Verbrauchsprofil über einen Tag für Pretoria stammt aus einer Studie nach Meyer und Tshimankinda (1997). Für Fortaleza wurde nach Abreu et al. (2004) aus einem ermittelten Stromprofil von elektrischen Duschköpfen in brasilianischen Wohneinheiten ein Lastprofil generiert und das Profil für Peking wurde nach Expertenbefragungen erstellt und weist deutliche Spitzen zur Mittagszeit und in den Abendstunden auf.

Anhang B

B.1 Professioneller Report aus Polysun

Professioneller Report

Übersicht Solarthermie (Jahreswerte)

Kollektorfläche	6,6 m ²
Solarer Deckungsgrad gesamt	74,7%
Gesamter Kollektorfeldtrag	3.204,3 kWh
Kollektorfeldtrag bzgl. Bruttofläche	485,5 kWh/m ² /Jahr
Kollektorfeldtrag bzgl. Aperturfläche	534,1 kWh/m ² /Jahr
Max. Energieinsparung (VDI 6002)	3.373 kWh
Max. vermiedene CO ₂ -Emission	1.809,3 kg

Solarer Deckungsgrad: Anteil Solarenergie an das System (SF_T)

Horizontlinie

Meteordaten-Übersicht

Mittlere Aussentemperatur	9,9 °C
Globalstrahlung, Jahressumme	1.161,4 kWh/m ²
Diffusstrahlung, Jahressumme	602,4 kWh/m ²

Komponentenübersicht (Jahreswerte)

Kollektor	Graz_RefKol_20110902
Datenquelle	u135836
Kollektoranzahl	3
Parallele Abschnitte	1
Bruttogesamfläche	m ²
Gesamte Aperturfläche	m ²
Gesamte Absorberfläche	m ²
Anstellwinkel (hor.=0°, vert.=90°)	• 47
Ausrichtung (O=x=90°, S=0°, W=-90°)	• 0
Kollektorfeldtrag [Qsol]	kWh
Einstrahlung in Kollektorebene [Esol]	8.010,6 kWh
Kollektoreffizienzgrad [Qsol / Esol]	%
Direktstrahlung nach IAM	kWh
Diffusstrahlung nach IAM	kWh

Professioneller Report

Ref_Graz_WW_EFH_TS_6qm **Basisvariante**

Standort der Anlage

Osterreich
 Graz
 Längengrad: 15,37°
 Breitengrad: 47,08°
 Höhe ü.M.: 424 m

Dieser Report wurde erstellt durch:

Rudolf Moschik
 Unterer Heidenweg 7
 9500 Villach

Bemerkungen zum Projekt

SFI = 72,9 %
 SEIb = 439 kWh/m²

Systemübersicht (Jahreswerte)

Gesamter Brennstoff- und Stromverbrauch des Systems [Etot]	1.153,8 kWh
Gesamter Energieverbrauch [Quse]	3.113,2 kWh
Systemeffizienz (Quse / Etot)	2,7
Komfortanforderungen	Energiebedarf ist gedeckt

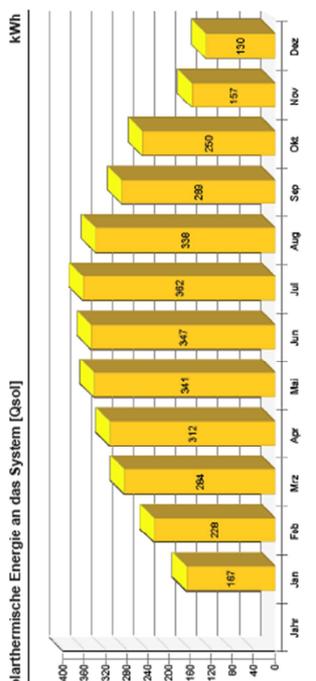
Professioneller Report

Warmwasserbedarf		Konstant
Volumenentnahme/Tagesverbrauch	l/d	200,9
Soiltemperatur	°C	50
Energiebedarf [Qdwm]	kWh	3.134,6
Pumpe Solarkreispumpe		Pumpe Eco, klein
Kreislauf-Druckverlust	bar	0,069
Durchsatz	l/h	360
Brennstoff- und Strom-/verbrauch [Epar]	kWh	11,6
Speicher 6		Ref_Sp_WW_Graz_20110915
Volumen	l	300
Höhe	m	1,8
Material		Edelstahl
Wärmedämmung		PU hart
Dämmungs-Dicke	mm	30
Wärmeverlust	kWh	448,5
Anschlussverluste	kWh	231,3

Kreislauf

Solarkreislauf		
Fluidmischung		Propylenmischung
Fluidkonzentration	%	40
Volumen des Fluidbereichs	l	19,3
Druck am obersten Punkt im Kreislauf	bar	4

Solarthermische Energie an das System [Qso]



3 / 6

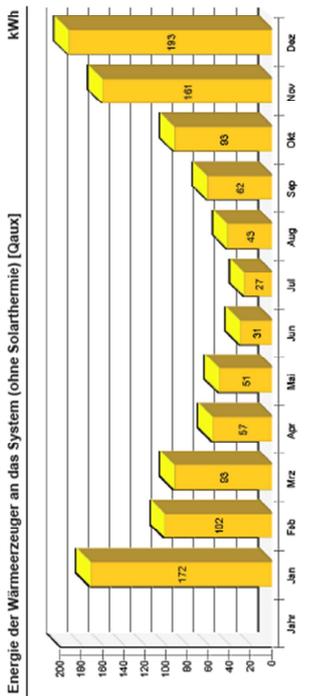
VS.6.6.15775 / 20.03.2012 / 11:11:47

Für die Richtigkeit der Angaben und Resultate besteht kein Haftungsgarant gegenüber Vela Solaris AG, deren Vertriebspartnern oder dem SPF.

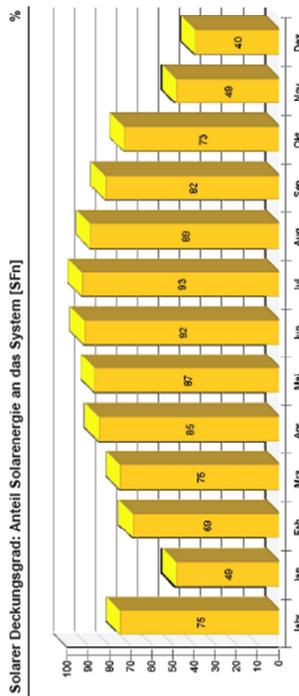


Professioneller Report

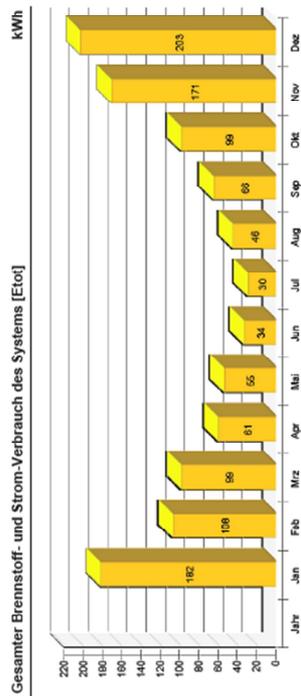
Energie der Wärmeerzeuger an das System (ohne Solarthermie) [Qaux]



Solarer Deckungsgrad: Anteil Solarenergie an das System [SFn]



Gesamter Brennstoff- und Strom-Verbrauch des Systems [Etot]



4 / 6

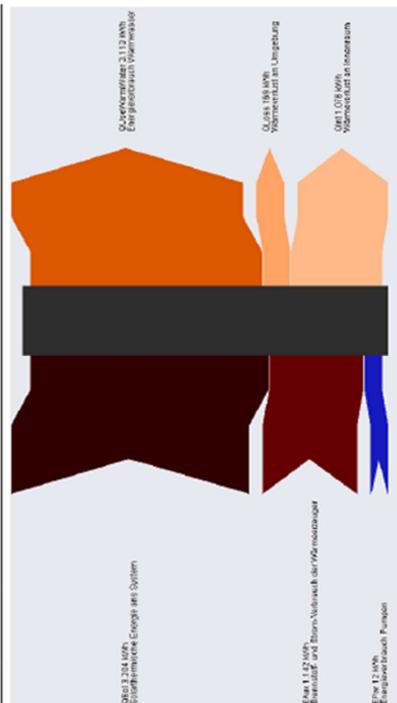
VS.6.6.15775 / 20.03.2012 / 11:11:47

Für die Richtigkeit der Angaben und Resultate besteht kein Haftungsgarant gegenüber Vela Solaris AG, deren Vertriebspartnern oder dem SPF.



Professioneller Report

Energieflussdiagramm

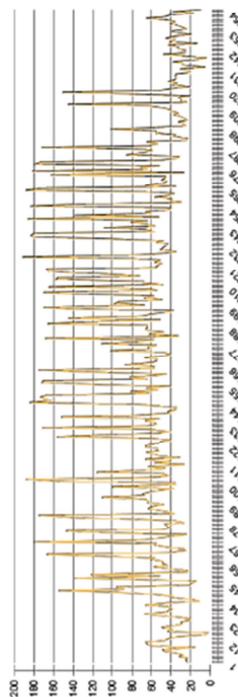


Professioneller Report

Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
Solarthermische Energie an das System [Qsol]													
kWh	3204	167	228	284	312	341	347	362	338	289	250	157	130
Energie der Wärmepumpe an das System (ohne Solarthermie) [Qaux]													
kWh	1085	172	102	93	57	51	31	27	43	62	93	161	193
Brennstoff- und Strom-Verbrauch der Wärmepumpe [Eaux]													
kWh	1142	181	107	98	60	54	33	29	45	65	98	170	203
Solarer Deckungsgrad: Anteil Solarenergie an das System [SF_n]													
%	74,7	49,2	69,2	75,4	84,6	87	91,7	93	88,7	82,4	72,8	49,3	40,3
Gesamter Brennstoff- und Strom-Verbrauch des Systems [Etot]													
kWh	1154	182	108	99	61	55	34	30	46	66	99	171	203
Einstrahlung in Kollektorebene [Esol]													
kWh	8011	407	567	734	756	871	837	885	869	740	625	391	328
Stromverbrauch der Pumpen [Epar]													
kWh	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gesamter Energieverbrauch [Quse]													
kWh	3113	264	245	276	268	276	263	265	259	245	251	244	257
Wärmeverlust an Innenraum (inklusive Wärmepumpe-Verluste) [Qint]													
kWh	1076	72	75	88	90	101	103	109	108	96	92	74	69
Wärmeverlust an Umgebung (ohne Kollektorverluste) [Qext]													
kWh	169	11	14	16	17	16	17	16	15	15	14	10	9

Kollektor

Tägliche Maximaltemperatur [°C]



B.2 Auszüge aus den Ausgabedatensätzen SHW_2012

Abbildung 0-1 zeigt einen Auszug aus dem Standardprotokoll dar. Diese fasst die Energieflüsse, Deckungsgrade und Laufzeiten monatlich zusammen und gibt diese in einer lesbaren Form aus.

```

      Simulationsprogramm "SHW" Version 06/2011
      zur simulation von systemen zur solaren
      Raumheizung und warmwasserbereitung mit Zusatzheizung

      Erstellt von
      W.Streicher, K.Schnedl, A.Thuer, A.Vilics, R.Kouba, P. Puschnig
      (c) Institut fuer waermetechnik, TU Graz

Datum:  28.02.2012                                Uhrzeit:  07:08

BERECHNUNG SERGEBNIS :

GESAMTANLAGE:
Monat  Global  Anlage_type2  beDauKol  NutzKol  zirkver  solspei  kolwigr  kolNuGr  DeckGr  Tmax_kol
      [kwh]    [h]      [kwh]    [kwh]    [kwh]    [kwh]    [%]      [%]      [%]      [%]      [°C]
JAN    358.8    81.8     135.0    12.0     123.1    53.27   37.63   23.89   65.27
FEB    518.8    105.9    201.0    16.9     184.1    53.90   38.74   51.70   141.42
MAR    686.1    140.8    246.9    18.7     228.2    54.30   35.99   60.45   168.03
APR    721.4    171.8    277.2    20.8     256.4    53.22   38.42   75.02   182.99
MAI    853.7    180.5    298.9    18.6     280.3    54.85   35.02   80.05   179.01
JUN    830.4    212.8    307.3    21.0     286.3    52.88   37.01   87.01   173.61
JUL    872.3    192.3    318.1    19.2     299.0    55.03   36.47   89.44   167.72
AUG    838.8    185.5    289.6    17.4     272.2    55.37   34.53   80.92   184.12
SEP    700.9    158.1    246.1    16.3     229.7    54.73   35.10   70.62   183.07
OKT    579.9    120.0    205.8    15.4     190.4    54.48   35.48   56.71   171.09
NOV    354.6     81.8    120.7     9.1     111.6    54.44   34.05   24.70   136.89
DEZ    277.4     66.1    93.0      7.5     85.5     54.43   33.52   13.56   61.56
-----
Jahr   7593.1   1697.3   2739.7   192.8   2546.9   54.26   36.08   60.22   184.12

```

Abbildung 0-1: Auszug aus dem Standardprotokoll von SHW_2012 (SHW_ty02.aus)

Weiters wird ein Datensatz erzeugt, der zum Beispiel die Temperaturen im Solarkreislauf (Temperatur im Rücklauf trwt_k, mittlere Kollektortemperatur tkol, Kollektoraustrittstemperatur tkola, Temperatur im Vorlauf trk_wt) auf Simulationsschrittbasis ausgibt. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde die Häufigkeitsanalyse durchgeführt, ausgewertet und dargestellt.

```

Vol_Kol= 0.0048 m3  VRowt_K= 0.00201 m3  VRok_WT= 0.00201 m3
twwt1s= 65.00°C  thwt1s= 0.00°C  zwvsp=n  swpool=n
Datum Sekunde  I_Glob  tspumg  trwt_k  tkol  tkola  trk_wt  twwts  thwts  tpwts  switch  ttwvt1  ttwvt2  ttwep
1-JAN 0 0.00 11.76 1.86 4.05 4.05 1.86 13.20 -99.00 -99.00 0 13.20 13.20 55.00
1-JAN 300 0.00 11.76 -0.06 3.22 3.22 -0.06 13.20 -99.00 -99.00 0 13.20 13.20 54.95
1-JAN 600 0.00 11.76 -1.24 2.48 2.48 -1.24 13.20 -99.00 -99.00 0 13.20 13.20 54.90
1-JAN 900 0.00 11.76 -1.96 1.83 1.83 -1.96 13.20 -99.00 -99.00 0 13.20 13.20 54.85
1-JAN 1200 0.00 11.76 -2.40 1.26 1.26 -2.40 13.20 -99.00 -99.00 0 13.20 13.20 54.80
1-JAN 1500 0.00 11.76 -2.67 0.76 0.76 -2.67 13.21 -99.00 -99.00 0 13.21 13.20 54.74
1-JAN 1800 0.00 11.76 -2.84 0.31 0.31 -2.84 13.21 -99.00 -99.00 0 13.21 13.20 54.69
1-JAN 2100 0.00 11.76 -2.94 -0.08 -0.08 -2.94 13.21 -99.00 -99.00 0 13.21 13.20 54.64
1-JAN 2400 0.00 11.76 -3.00 -0.43 -0.43 -3.00 13.21 -99.00 -99.00 0 13.21 13.20 54.59
1-JAN 2700 0.00 11.76 -3.04 -0.74 -0.74 -3.04 13.21 -99.00 -99.00 0 13.21 13.20 54.54
1-JAN 3000 0.00 11.76 -3.06 -1.01 -1.01 -3.06 13.21 -99.00 -99.00 0 13.21 13.20 54.49
1-JAN 3300 0.00 11.76 -3.08 -1.25 -1.25 -3.08 13.21 -99.00 -99.00 0 13.21 13.20 54.44
1-JAN 3600 0.00 11.76 -3.20 -1.50 -1.50 -3.20 13.21 -99.00 -99.00 0 13.21 13.20 54.39

```

Abbildung 0-2: Auszug aus den Simulationsdaten in Simulationsschrittweite von SHW_2012 (SHW_ty02_tko.ene)

B.3 Auszüge aus den Ausgabedatensätzen SHW_T_P_Stat

Der Ausgabedatensatz SHW_ty02_tko.ene dient der Postprocessing Routine SHW_T_P_Statistik als Eingabedatensatz. Als Ausgabe erhält man wie es die Abbildung 0-3 zeigt eine Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse sowie die Drück im Ausdehnungsgefäß (pist) und im Kollektor (pist_k). Dies bildet wiederum die Basis für die Häufigkeitsauswertung.

Datum	sekunde	I_glob	tspumg	trwt_k	tkol	tkola	trk_wt	switch	pist	pist_k
1-JAN	0	0.00	11.76	1.86	4.05	4.05	1.86	0	2.50058	1.50058
1-JAN	300	0.00	11.76	-0.06	3.22	3.22	-0.06	0	2.49998	1.49998
1-JAN	600	0.00	11.76	-1.24	2.48	2.48	-1.24	0	2.49956	1.49956
1-JAN	900	0.00	11.76	-1.96	1.83	1.83	-1.96	0	2.49926	1.49926
1-JAN	1200	0.00	11.76	-2.40	1.26	1.26	-2.40	0	2.49903	1.49903
1-JAN	1500	0.00	11.76	-2.67	0.76	0.76	-2.67	0	2.49886	1.49886
1-JAN	1800	0.00	11.76	-2.84	0.31	0.31	-2.84	0	2.49871	1.49871
1-JAN	2100	0.00	11.76	-2.94	-0.08	-0.08	-2.94	0	2.49860	1.49860
1-JAN	2400	0.00	11.76	-3.00	-0.43	-0.43	-3.00	0	2.49850	1.49850
1-JAN	2700	0.00	11.76	-3.04	-0.74	-0.74	-3.04	0	2.49842	1.49842
1-JAN	3000	0.00	11.76	-3.06	-1.01	-1.01	-3.06	0	2.49835	1.49835
1-JAN	3300	0.00	11.76	-3.08	-1.25	-1.25	-3.08	0	2.49829	1.49829
1-JAN	3600	0.00	11.76	-3.20	-1.50	-1.50	-3.20	0	2.49820	1.49820

Abbildung 0-3: Auszug aus den Simulationsdaten in Simulationsschrittweite von SHW_P_T_Statistik (SHW_ty02_p_T.ene)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Bereits installierte solarthermische Leistung je Einwohner in den 27-EU-Mitgliedsstaaten und deren Perspektiven auf das Jahr 2020 (ESTIF, 2011)	2
Abbildung 1-2: Prognosen des solarthermischen Potentials in Europa bis ins Jahr 2050 basierend auf drei Szenarien (Weiss & Biermayr, 2009)	3
Abbildung 1-3: Rohmaterialpreis für Kupfer während der Jahre 2009 - 2011 in \$/Tonne (http://www.lme.com , 09.07.2012).....	4
Abbildung 1-4: Rohmaterialpreis für Aluminium während der Jahre 2009 - 2011 in \$/Tonne (http://www.lme.com , 09.07.2012).....	4
Abbildung 1-5: Prognose über die Nachfrage von Polymermaterialien für den Kollektorbau in Europa bis 2050; (Sultan E.-A., 2007).....	5
Abbildung 2-1: Vorgänge beim Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre (Viessmann, 2008)	8
Abbildung 2-2: Jahressumme der Globalstrahlung auf die horizontale Fläche weltweit, (http://www.meteonorm.com/de/download/karten ; 15.06.2012).....	9
Abbildung 2-3: Grundsätzlicher Aufbau eines Flachkollektors (Brandstetter et al., 2004).....	10
Abbildung 2-4: Ausführungsvarianten des Durchströmungskanals von Flachkollektoren (Streicher, 2009)	11
Abbildung 2-5: Energieflüsse an einem Flachkollektor (Streicher, 2009).....	11
Abbildung 2-6: Wirkungsgradkennlinien eines Kollektors in Abhängigkeit von der Einstrahlungsstärke bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 30 °C	15
Abbildung 2-7: Hydraulikschema des Einkreis-Thermosiphon Warmwasser-Systems für ein Einfamilienhaus.....	16
Abbildung 2-8: Hydraulikschema des Zweikreis-Thermosiphon Warmwasser-Systems für ein Einfamilienhaus; Wurm, 2012)	17
Abbildung 2-9: Hydraulikschema einer solarthermischen Warmwasserbereitungs-Anlage mit Umwälzpumpe; (in Anlehnung an Brandstetter et al., 2004).....	18
Abbildung 2-10: Bildung von Restflüssigkeit im Kollektor bei schlechtem (links) und gutem (rechts) Entleerungsverhalten; (Hausner, Fink, 2001)	23
Abbildung 2-11: Kollektor-Verschaltungen mit „schlechtem“ (A) und „gutem“ (B und C) Entleerungsverhalten (Scheure, 2008).....	24

Abbildung 2-12: Schematische Darstellung des Systemdrucks am Ausdehnungsgefäß von unterschiedlich gut entleerenden Kollektoren. (Hausner et al., 2003).....	24
Abbildung 2-13: Unterscheidung bei solaren Deckungsgraden; (Vela Solaris, 2012)	27
Abbildung 3-1: Polymer-Pyramide mit Einsatztemperaturen und Presievergleich zu Metallen (Brunold, 2010)	30
Abbildung 3-2: Aufbau des ECO-Flare Kollektors (in Anlehnung an http://www.magen-ecoenergy.com ; 09.09.2012).....	31
Abbildung 3-3: Detailansicht des mechanischen Mechanismus für die Durchlüftung (http://www.google.com/patents/US20100132764 ; Zugriff: 10.09.2012).....	33
Abbildung 3-4: Aufbau des Kunststoffkollektors von Aventa Solar; (http://www.aventa.frifugl.net ; Zugriff: 24.09.2012).....	34
Abbildung 3-5: Kennlinien eines Flachkollektors mit selektiver Schicht sowie des Kunststoffkollektors der Firma Aventa bei 1000 W/m ² Einstrahlung und 30 °C Umgebungstemperatur...	35
Abbildung 4-1: Globalstrahlung auf die horizontale und geneigte Fläche (in Anlehnung an Wurm 2012)	37
Abbildung 4-2: Luft- und Himmelstemperatur an den Referenzstandorten; (in Anlehnung an Wurm, 2012).....	38
Abbildung 4-3: Verteilung von Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren weltweit Ende 2010 (in Anlehnung an Weiss & Mauthner, 2012)	39
Abbildung 4-4: Marktverteilung zwischen Thermosiphon und gepumpten Systemen in unterschiedlichen Regionen der Welt Ende 2010 (in Anlehnung an Weiss & Mauthner, 2012)	39
Abbildung 4-5: Verteilung der insgesamt installierten Kollektorfläche auf unterschiedliche Anwendungen in den Top 10 Ländern Ende 2010 (in Anlehnung an Weiss & Mauthner, 2012)	40
Abbildung 4-6: Anlagenschema A.1	41
Abbildung 4-7: Anlagenschema A.4	41
Abbildung 4-8: Anlagenschema A.2	41
Abbildung 4-9: Anlagenschema A.5	41
Abbildung 4-10: Anlagenschema A.3	41
Abbildung 4-11: Anlagenschema A.6	41
Abbildung 4-12: Kennlinie der Referenz-Kollektoren bei 1000 W/m ² Einstrahlung und 30 °C Umgebungstemperatur	44

Abbildung 6-1: Wirkungsgradkennlinie des Kunststoffkollektors mit und ohne Rückkühler bei einer Einstrahlung von 1000 W/m ² und einer Umgebungstemperatur von 30 °C.....	51
Abbildung 6-2: Tagesverlauf WW-System auf Kunststoffbasis mit Rückkühler am Standort Graz	52
Abbildung 6-3: Wirkungsgradkennlinie des Kunststoffkollektors mit und ohne thermotroper Schicht mit f_{TTS} laut Tabelle 7 bei einer Einstrahlung von 1000 W/m ² und einer Umgebungstemperatur von 30 °C.....	55
Abbildung 6-4: Einfluss des Transmissionskoeffizienten der thermotropen Schicht auf den Deckungsgrad.....	55
Abbildung 6-5: Absorptions- (α_{Abs}) und Reflexionskoeffizient ($\rho_{Abs} = 1 - \alpha_{Abs}$ bei opaken Flächen) eines idealen (ideal) und eines gängigen realen Absorbers (real) (Streicher, 2009).....	56
Abbildung 6-6: Tagesverlauf WW-System auf Kunststoffbasis mit thermotroper Schicht am Standort Graz	57
Abbildung 6-7: Hydraulikschema des Warmwasser-Systems auf Kunststoffbasis	58
Abbildung 6-8: Tagesverlauf WW-Drain-Back-System auf Kunststoffbasis am Standort Graz..	59
Abbildung 6-9: Ermittlung der benötigten Kollektorfläche für solarthermische Systeme in Kunststoffausführung am Beispiel „Warmwasserbereitung Einfamilienhaus“ am Standort Graz	61
Abbildung 6-10: Vergleich der Kollektorflächen am Standort Graz	64
Abbildung 7-1: Systemtemperaturhäufigkeiten des Referenz WW-Systems am Standort Graz	67
Abbildung 7-2: Systemtemperaturhäufigkeiten des Referenz WW-Systems am Standort Graz; „Zoom“	68
Abbildung 7-3: Summenhäufigkeiten der Systemtemperaturen des Referenz WW-Systems am Standort Graz	69
Abbildung 7-4: Summenhäufigkeiten der Systemtemperaturen des Referenz WW-Systems am Standort Graz; „Zoom“	70
Abbildung 7-5: Vergleich der Kollektormitteltemperaturhäufigkeiten des WW-Systems mit und ohne Überhitzungsschutz am Standort Graz; „Zoom“.....	71
Abbildung 7-6: Vergleich der Summenhäufigkeiten der Kollektormitteltemperatur von Referenz und Kunststoffsystemen anhand der Anwendungsgebiete am Standort Graz	72
Abbildung 7-7: Systemtemperaturhäufigkeiten des Zweikreis WW-Thermosiphon Systems am Standort Athen (Athen1)	74

Abbildung 7-8: Temperaturhäufigkeiten im Warmwasserbereitungs-Thermosiphon System mit Referenzkollektor Athen1, mit und ohne Warmwasserbedarf an Standort Athen.....	75
Abbildung 7-9: Summenhäufigkeiten der Systemtemperaturen des WW-Thermosiphon Systems am Standort Athen (Athen1)	76
Abbildung 7-10: Häufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen von Thermosiphon-Systemen auf Kunststoffbasis an den Standorten Athen, Pretoria, Fortaleza und Peking	77
Abbildung 7-11: Summenhäufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen des Kunststoffkollektors im ungefüllten Zustand an den Referenzstandorten	78
Abbildung 8-1: Vordruck im MAG (Fink et al., 1997)	82
Abbildung 8-2: Zustände im MAG vor dem Füllen (links) und nach dem Füllen (rechts) (in Anlehnung an Fink et al. 1997).....	84
Abbildung 8-3:Spezifische Dampfleistung in Abhängigkeit der Strahlung bei konstanter Temperatur und Vordruck für unterschiedlich gut entleerende Kollektoren; (Wurm, 2012)	87
Abbildung 8-4: Darstellung der vereinfachten Annahmen zur Ermittlung des Systemdrucks am MAG (Wurm, 2012).....	88
Abbildung 8-5: Druckentwicklung des Referenz-Warmwassersystems am Standort Graz.....	90
Abbildung 8-6: Darstellung der Systemdrücke und Nutzeffektes in Abhängigkeit des Entleerungsverhaltens	91
Abbildung 8-7: Einfluss der Größe des MAG auf den Systemdruck.....	92
Abbildung 8-8: Hydraulikschema eines Drain-Back-Systems in Kunststoffausführung	93
Abbildung 8-9: Druckentwicklung des Kunststoffsystems in Drain-Back Ausführung am Standort Graz.....	94
Abbildung 8-10: Druck-Temperatur Korrelation des entleerenden Drain-Back WW-Systeme am Standort Graz	95
Abbildung 8-11: Druck-Temperatur Korrelation von Einkreis- und Zweikreis-Thermosiphon Systemen.....	97
Abbildung 8-12: Vergleich der Druckhäufigkeiten im Kollektor der WW-Systeme mit und ohne Überhitzungsschutz am Standort Graz.....	98
Abbildung 8-13: Vergleich der Druckhäufigkeiten im Kollektor der WW-Systeme mit und ohne Überhitzungsschutz am Standort Graz, „Zoom“	99
Abbildung 8-14: Vergleich der Summenhäufigkeiten der Kollektordrücke des Referenz WW-Systems bei unterschiedlichem Entleerungsverhalten am Standort Graz.....	100

Abbildung 8-15: Vergleich der Druckhäufigkeiten im Kollektor anhand der Anwendungsgebiete der solarthermischen Systeme in Kunststoffausführung am Standort Graz	101
Abbildung 0-1: Tageslastprofile im Ein- und Mehrfamilienhaussektors für die Referenzstandorte	114
Abbildung 0-1: Auszug aus dem Standardprotokoll von SHW_2012 (SHW_ty02.aus)	118
Abbildung 0-2: Auszug aus den Simulationsdaten in Simulationsschrittweite von SHW_2012 (SHW_ty02_tko.ene).....	118
Abbildung 0-3: Auszug aus den Simulationsdaten in Simulationsschrittweite von SHW_P_T_Statistik (SHW_ty02_p_T.ene)	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eckdaten ECO-Flare Kollektor (http://www.magen-ecoenergy.com ; 09.09.2012)	31
Tabelle 2: Mechanische Beständigkeit in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur (http://www.magen-ecoenergy.com ; 09.09.2012)	32
Tabelle 3: Eckdaten des für die Simulation verwendeten Kunststoffkollektors.....	34
Tabelle 4: Überblick Referenzsystem.....	41
Tabelle 5: Detaillierte Übersicht der Referenzsysteme.....	43
Tabelle 6: Korrekturfaktor des linearen Wärmeverlustkoeffizienten.....	50
Tabelle 7: Korrekturfaktor einer theoretischen thermotropen Schicht	54
Tabelle 8: Übersicht der Systemresultate der mit Polysun simulierten Systeme.....	63
Tabelle 9: Übersicht der Systemresultate der mit SHW_2012 simulierten Systeme	63
Tabelle 10: Häufigkeiten der Kollektormitteltemperaturen an den Referenzstandorten.....	79
Tabelle 11: hydraulische Parameter der gepumpten Referenz und Kunststoffsysteme an den Referenzstandorten	102
Tabelle 12: Ergebnisse der Druckauswertungen der gepumpten Referenz und Kunststoffsysteme an den Referenzstandorten in Stunden pro Jahr	105
Tabelle 13: hydraulische Parameter der Referenz- und Kunststoff-Thermosiphonsysteme an den Referenzstandorten.....	107
Tabelle 14: Ergebnisse der Druckauswertungen von Referenz- und Kunststoff-Thermosiphonsysteme an den Referenzstandorten in Stunden pro Jahr	107