Entwicklung eines neuartigen textilbasierten Moduls zur Nutzung der Sonnenenergie

Von der Fakultät Energie- Verfahrens- und Biotechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Dipl.- Ing. Jannis Stefanakis
aus Astraki (Kreta, Griechenland)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Heinrich Planck
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Tag der mündlichen Prüfung: 17.07.2009

Institut für Textil- und Verfahrenstechnik
der Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf
Wissenschaftliche Institute in Verbindung mit der Universität Stuttgart

Denkendorf 2009

Vorwort

Die vorliegenden Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Gründer und Unternehmer der Fa. SolarEnergie Stefanakis (SES), Stadecken-Elsheim. Zur Ausarbeitung der Arbeit wurden jahrzehntelange Erfahrungen und Beobachtungen sowie Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen herangezogen. Teile der Arbeit wurden am Lehrstuhl für Automatisierungstechnik (FB Elektrotechnik) der Universität Kaiserslautern sowie im Rahmen von Forschungsvorhaben, welche vom Wirtschaftsministerium Rheinland-Pfalz, dem Griechischen Wissenschaftsministerium sowie der Europäischen Union finanziell gefördert wurden, erarbeitet. Allen Initiatoren und Partnern der Projekte möchte ich mein Lob und meine Anerkennung aussprechen. Hierbei möchte ich mich allen voran bei Herrn Dr. Jürgen Gerber von der Innovations-Management GmbH (IMG) Rheinland Pfalz, Herrn Jürgen Schüler von der Handwerkskammer Rheinland Pfalz und allen Mitarbeitern des Institutes für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf herzlich bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinrich Planck gilt mein besonderer Dank für die freundliche Unterstützung sowie die Ermöglichung und Ermutigung diese Arbeit zu erstellen. Erst dadurch wurde es mir möglich, die vielen Erfahrungen und Erkenntnisse auf dem Gebiet der Solarenergie wissenschaftlich zu untersuchen und publik zu machen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt danke ich für die akribische Durchsicht der Arbeit, die wertvollen Ratschläge sowie für die Übernahme des Mitberichts.

Mein Dank geht an Herrn Dipl.-Ing. Michael Linke, welcher mir bei der schriftlichen Ausarbeitung sowie für viele kritische Diskussionen zur Seite stand.

Ebenfalls danken möchte ich Herrn Dr.-Ing. Thomas Stegmaier für Informationen, Anregungen, die gute Zusammenarbeit beim EU-Projekt „FLEXCOLL“ sowie die Unterstützung und das Vertrauen für zukünftige Projekte.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Lothar Litz vom Lehrstuhl für Automatisierungstechnik (FB Elektrotechnik) der Universität Kaiserslautern für die Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung von Versuchen in seinem Fachbereich herzlich bedanken. Herr Prof. Dr.-Ing. Litz ermutigte mich, die Halbkugelkollektoren bis hin zur Serienfertigung weiter zu entwickeln. Dadurch konnte eine echte Konkurrenz für die Flachkollektoren geschaffen werden.

Mein ganz besonderer Dank gilt natürlich meinem Werkstattmeister Herrn Johann Stöckl, meinem Versuchsbegleiter Herrn Dipl.-Ing. Torsten Jansohn und allen voran meiner Frau Monika sowie meinen Söhnen Dimitri und Emanuel, die mir mit viel Geduld und Verständnis zur Seite standen.

Zu guter letzt danke und widme ich diese Arbeit meinem verstorbenen Vater Dimitrios, welcher 1966 einem 18 Jährigen das Vertrauen schenkte, damit dieser alleine in der Fremde ein Studium beginnen konnte.

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS VERWENDETER FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN 6
1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG 7
2. STAND DER TECHNIK 13
3. ZIELSETZUNG UND AUFGABENSTELLUNG 19
4. LÖSUNGSWEG 20
5. MATERIAL UND METHODEN 21
5.1 NIEDERTEMPERATURKOLLEKTORANLAGE 21
5.1.1 KOLLEKTORANLAGE 23
5.1.1.1 SONNENKOLLEKTOREN 23
5.1.1.2 WÄRMESPEICHER MIT WÄRMETAUSCHER 24
5.1.2 MESSGERÄTE UND SENSOREN 25
5.2 HOCHTEMPERATURKOLLEKTORANLAGE 27
5.2.1 TECHNIKUMPRÜFSTAND 27
5.2.2 PRÜFSTAND FÜR FELDVERSUCHE 29
5.3 BESTIMMUNG DES WIRKUNGSGRADES 29
6. ENTWICKLUNG VON NIEDERTEMPERATURKOLLEKTOREN 31
6.1 ERMITTLUNG DER IDEALEN BAUFORM 31
6.2 ENTWICKLUNG UND AUSWAHL VON ABSORBERMATERIALIEN UND WEITERER KOLLEKTORELEMENTE 33
6.3 ENTWICKLUNG EINER TRANSPARENTEN ABDECKUNG 40
6.3.1 MATERIALAUSWAHL 41
6.3.2 ENTWICKLUNG EINER VERFAHRENSTECHNIK ZUR HERSTELLUNG SPHÄRISCHER PMMA-HAUBEN 42
6.3.3 ENTWICKLUNG EINER FLEXIBLEN, FASERBASIERTEN ABDECKUNG NACH BIOLOGISCHEM VORBILD 44
6.4 PRAXISVERSUCHE MIT DEM GESAMTSYSTEM 48
6.4.1 ERWÄRMUNG VON SCHWIMMBÄDERN 48
6.4.1.1 ANLAGENAUFBAU 48
6.4.1.2 VERSUCHSERGEBNISSE 53
6.4.2 PRIVATE HAUSHALTE UND HOTELANLAGEN 55
6.4.3 MOBILE ANLAGEN 57
6.5 SIMULATION DES GESAMTSYSTEMS UND VERGLEICH MIT ERGEBNISSEN AUS PRAXISVERSUCHEN 58
6.5.1 VEREINFACHTES MODELL DER GESAMTANLAGE 59
6.5.1.1 KOLLEKTOR 59
6.5.1.1.1 STATIONÄRES VERHALTEN 59
6.5.1.1.1 DYNAMISCHES VERHALTEN 63
6.5.1.2 WÄRMESPEICHER 64
6.5.2 BESTIMMUNG DER MODELLPARAMETER 65
6.5.2.1 KOLLEKTOR 65
6.5.2.2 WÄRMESPEICHER 67

6.5.3 Auswertung und Vergleich der simulierten und gemessenen Messdaten . 67
6.5.3.1 Kollektor 67
6.5.3.1.1 Anlaufphase 67
6.5.3.1.2 Betriebsverhalten 69
6.5.3.1.3 Anlagenstillstand 71
6.5.3.2 Wärmespeicher 72
7. Entwicklung von Hochtemperaturkollektoren 74
7.1 Entwicklung der idealen Bauform 74
7.2 Entwicklung von Prototypen 78
7.3 Versuchergebnisse 81
7.3.1 Technikumversuche 81
7.3.3.1 Vermessung und Eichung der Lichtleistung des Versuchsprüfstandes 81
7.3.3.2 Kollektorprüfung 83
7.3.2 Feldversuche 84
7.4 Einsatzbereich 85
8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 86
9. Zusammenfassung 87
10. Summary 89
11. Diskussion und Ausblick 91
12. Literaturverzeichnis 92

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Benennung	Einheit
a*	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m²·K)
A	Fläche	m²
c_p	spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck)	J/(kg·K)
E	Bestrahlungsstärke	W/m²
K	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m²·K)
k_{Abstr}	Proportionalitätskonstante zur Beschreibung der Kollektorwärmeabstrahlung	W/K^4
$k_{Leit/Konv}$	Proportionalitätskonstante zur Beschreibung der Wärmeverluste durch Wärmeleitung und Konvektion	W/K
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
M	Masse	kg
$\dot{Q}$	Wärmefluss, Leistung	W, J/s
Q	Wärmemenge	J
R	Radius	m
t, (T)	Zeit, (Totzeit)	s
T	Temperatur	K
$\dot{V}^\circ$, $\dot{V}$, F_1	Volumenstrom, Durchfluss	m³/s, l/min, l/h
V	Volumen	m³

α	Absorptionsgrad	-
ε	Emissionsgrad	-
η	Wirkungsgrad	-
φ	Einstrahlwinkel vom Zenit ausgehend	°
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
ρ	Dichte	kg/m³
τ	Transmissionsgrad	-
Δ	Differenz	-
ϑ	Temperatur	℃
Σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$W/(m^2 \cdot K^4)$

1. Einleitung und Problemstellung

Seit Anbeginn der Menschheit ist diese von den Ressourcen abhängig, welche die Natur ihr anbietet. Auch durch den Zuwachs an technologischem Wissen hat sich an diesem Prinzip nichts geändert, seine Anforderungen sind jedoch bei weitem spezifischer und umfangreicher geworden. Der zunehmende Energiebedarf der heutigen Gesellschaft führt zwangsläufig zur Erschließung neuer nachhaltiger bzw. regenerierbarer Energiequellen, die sowohl durch die Menschen als auch durch die Industrie preiswert und effizient genutzt werden können [1].

Betrachtet man den weltweiten Verbrauch an primären Energieträgern in der Abbildung 1, so wird deutlich, dass fossile Energieträger (Erdöl, Ergas, Kohle) derzeitig die am meisten genutzten sind.

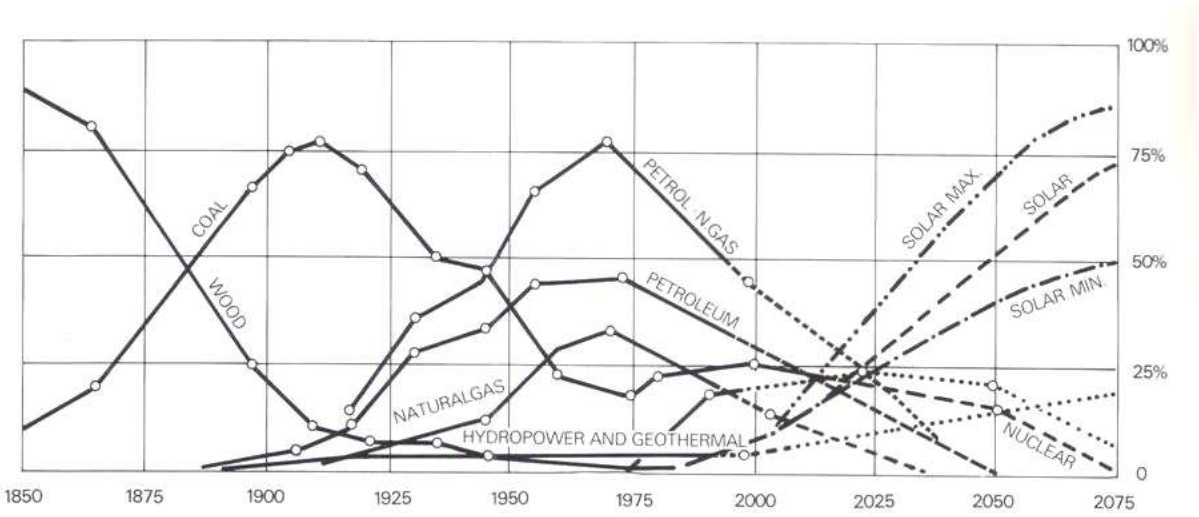

Abb. 1: Verbrauch und Prognose primärer Energieträger [2]

Fossile Energieträger sind endliche Ressourcen, welche über mehrere Tausend bis Millionen Jahre unter der Erdoberfläche lagern. Von diesen ist Erdöl der am häufigsten verwendete, da Erdöl Ausgangsprodukt einer großen Palette von Kraftstoffen (Kerosin, Benzin, Diesel), aber auch vieler Grundwerkstoffe wie z.B. Kunststoffen ist. Da der Verbrauch an Erdöl jedoch bei weitem nicht im Verhältnis zu dessen Bildung steht, droht ein Zusammenbruch jeglicher auf Erdöl basierender Industriezweige – was sich so gut wie auf die gesamte moderne Industrie auswirkt. Schätzungen gehen davon aus, dass die Ölreserven der Erde, vom heutigen Verbrauch ausgehend, etwa Mitte des Jahrhunderts zu Neige gehen werden [2]. Darüber hinaus führt die Freisetzung von Kohlendioxid bei der Verbrennung der fossilen Energieträger nachweislich zu einem Wandel des Klimas auf der Erde und der zunehmende Verbrauch zu einem fortwährenden Preisanstieg für fossile Brennstoffe.

Aus diesen Gründen werden in (fast) allen Ländern eine Reihe von Sparmaßnahmen eingeleitet, welche die Effekte der Ölknappheit zwar abbremsen, letztendlich aber keine langfristige Lösung bieten.

Die Sparmaßnahmen zielen beispielsweise auf die Reduzierung des Energieverbrauches für das Heizen von Wasser und Gebäuden, da hierfür z.B. in europäischen Ländern etwa 30-40 % des Erdölkonsums entfällt. Dies geschieht etwa durch architektonisch optimierte Gebäude mit guter Wärmedämmung, den Einbau von Heizkesseln mit hohem Wirkungsgraden und Niedertemperaturheizungen und Wärmerückgewinnungssystemen in Lüftungsanlagen [3].

Weitere Sparmaßnahmen seitens der Regierungen zielen darauf, den hohen Verbrauch an Erdöl als Treibstoff für Verkehrsmittel durch höhere Treibstoffkosten zu reduzieren. Parallel dazu arbeitet die Industrie an alternativen Lösungen um den Erdölverbrauch zu drosseln, wie z.B. an der Entwicklung von Hybridmotoren, Wasserstoff- und Elektroantrieben. Auch die Form und das Design von Verkehrsmitteln passen sich dem Drang nach dem Sparen von Kraftstoff an. Darüber hinaus wird derzeit auch die Entwicklung von Motoren zur Verbrennung von erneuerbaren Brennstoffen forciert, da pflanzliche Brennstoffe wie Rapsöl oder Derivate (Alkohole) als eine Lösung für dieses Problem gelten, weil die meisten der Kraftfahrzeugmotoren auf diese Brennstoffe umzustellen sind. Könnte beispielsweise ein Viertel der zur Verfügung stehende Anbaufläche in Deutschland für den Anbau von Raps genutzt werden, würde ein großer Teil der Verkehrsmittel ohne Zeitbegrenzungen weiterhin mit Verbrennungsmotoren fahren können. Andererseits könnte die damit verbundene Reduzierung der Anbauflächen für Lebensmittel zur Versorgungsengpässe führen.

Die erwähnten alternativen Energieträger auf Pflanzenbasis oder auch Wasserstoff sind jedoch derzeit aufwendig zu produzieren und lagern, liefern nicht die nötige Energiemenge und sind derzeit noch nicht in dem Maße verfügbar, um einen graduellen Umstieg der übrigen Industriebranchen zu ermöglichen, welche für etwa 30-40 % des globalen Erdölverbrauches verantwortlich sind.

Eine praktisch anwendbare Lösung zur Energiebereitstellung bietet die Technologie der **Kernspaltung** wie sie in Atomkraftwerken für die Strom- oder aber auch Wärmegewinnung genutzt wird [4]. Als Treibstoff für die Kernspaltung wird das instabile radioaktive Element Uran eingesetzt. Durch die Spaltung des Urans wird Energie freigesetzt, die über mehrere Wärmetauscher letztendlich Dampfturbinen antreibt. Uran ist jedoch ein seltenes Element. Nach derzeitigem Stand werden die Lager in spätestens 70 Jahren erschöpft sein [5] und dessen Gewinnung stellt einen erheblichen Energieaufwand dar. Darüber hinaus entstehen bei der Kernspaltung radioaktive Abfallprodukte, welche derzeit z.B. in Salzmienen oder Betonbunker gelagert werden müssen, da eine Wiederaufbereitung technisch sehr aufwendig und kostenintensiv ist.
Eine zukünftige Lösung könnten Kernfusionskraftwerke darstellen, welche die Prozesse auf unserer Sonne in kleinerem Maße nachahmen. Ein solcher Reaktor wird zurzeit in Südfrankreich erprobt.

Neben der Atomkraft ist die **Geothermie** auch eine Energiequelle, welche nicht direkt auf die Sonne zurückzuführen ist. Die Geothermie kann die in der Erde gespeicherte Wärme zur Erzeugung von Dampf oder aber auch zur Versorgung von Wärmepumpen nutzen. Problematisch sind hierbei die hohen Kosten für das Auffinden einer passenden Bohrungsstelle sowie für die Bohrung selbst [6, 7]. Darüber hinaus besteht bei Erdbeben die Gefahr des Zusammenbruchs der Erdoberfläche in die gebohrten Hohlräume.

Eine weitere bekannte Möglichkeit zur Energiegewinnung ist die **Windenergie**. Es handelt sich um eine der gängigsten alternativen und nachhaltigen Energiequellen, die augenblicklich zur Verfügung stehen. Der Nachteil dieser Anlagen ist die Größe, die wiederum aber die Vorraussetzung für die Erzeugung der erwünschten Energiemenge ist. Die Wartungskosten für solche Anlagen sind überschaubar, so dass die allgemein sehr hohen Installationskosten (ca. 1,0 bis 1,2 Mio. € / MW installierter Leistung auf dem Land) dadurch kompensiert werden können. Abgesehen davon werden freie Flächen für die Errichtung dieser überdimensionalen Flügelrad benötigt, wodurch sie sich nicht für dicht bewohnte Gebiete anbieten [8, 9].

Daneben bietet sich für kleinere, hauptsächlich agrikulturelle Betriebe vor allem die Produktion und Nutzung von **Biogas** (Methananteil 60-70 %) zur Gewinnung in Form von Strom und Wärme an [10, 11].

Der Blick auf die regenerativen Energiequellen, die von auf der Erde konstanten Prozessen abhängig sind, offenbart weiterhin zwei Lösungen: Strömungs- und Gezeitenkraftwerke.
Bei **Strömungskraftwerke** handelt es sich im Grunde um Turbinen, die auf einem festen Rahmen auf dem Meeresboden verankert sind. Durch die thermischen Unterschiede in den Ozeanen werden permanente Strömungen erzeugt, die diese Turbinen antreiben. Die spezifischen Kosten sind jedoch hoch, da die Energieausbeute gering ist.
Gezeitenkraftwerke nutzen indirekt die Wirkung der Gravitationskraft unseres Mondes, um Strom zu gewinnen. Es handelt sich um Hebewerke mit stationären Wasserturbinen, die in Küstenregionen angebracht sind. Die Rotation des Planeten um seine eigene Achse führt dazu, das zwei „Wellen“, eine in die Richtung des Mondes und eine aus der gegenüberliegenden Seite des Planeten, die Erdkugel umkreisen. Während dieser Prozesse setzen die Turbinen des Gezeitenkraftwerks die Bewegungsenergie des Wassers in Strom um. Gezeitenkraftwerke sind, ebenso wie Strömungskraftwerke, sehr wartungsaufwändig, konstruktionstechnisch sehr aufwendig und bieten sich nur an Küstenregionen an.

Die Zugänglichste regenerative Energiequelle zur Bereitstellung von Strom und Wärme für industrielle und häusliche Zwecke ist die **Sonnenstrahlung** [1, 12, 13, 14]. Sie ist auf der gesamten Erdoberfläche direkt nutzbar und liefert bei wolkenfreiem Himmel eine große und unerschöpfliche Energiemenge. Die direkte Umwandlung bzw. aktive Nutzung der von der Sonne gelieferten Energie in Wärme (Solarthermie) oder Strom (Photovoltaik) (Abb. 2) ist somit der Schlüssel zur Lösung der zukünftigen Energieprobleme [15, 16, 17].

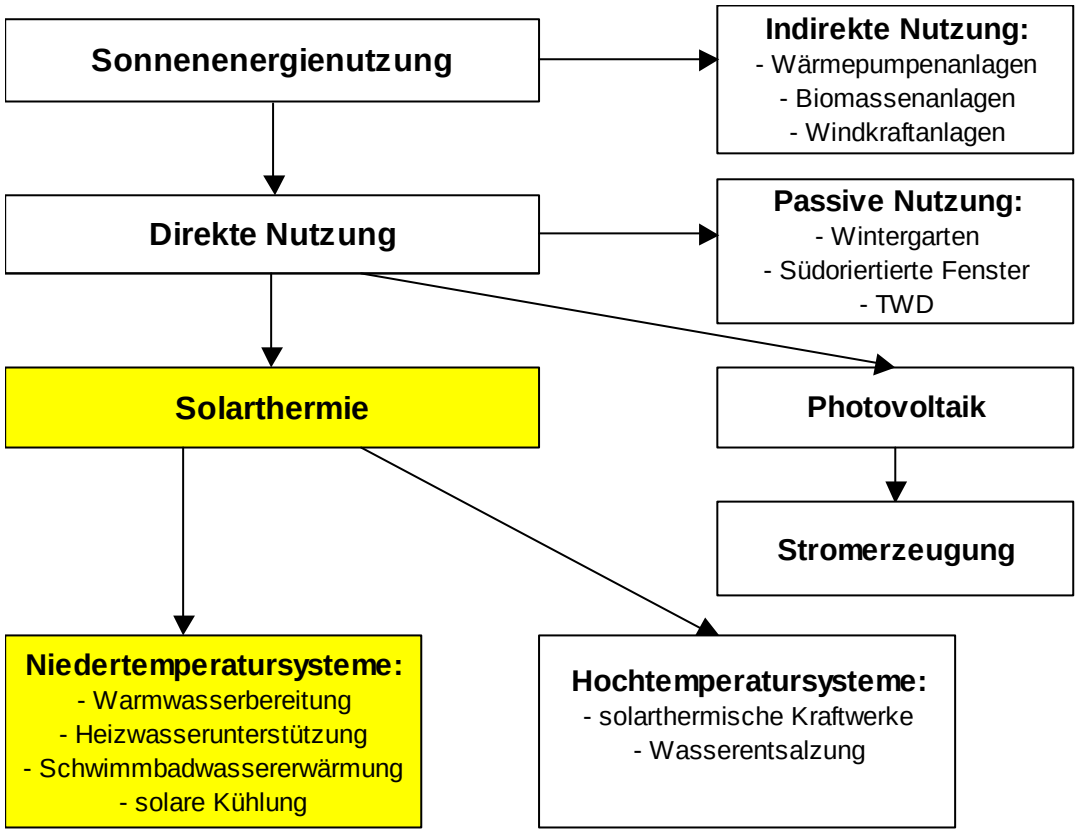

Abb. 2: Nutzung der Sonnenenergie auf der Erde

Die Sonne hat eine Oberflächentemperatur von ca. 5500 Grad Kelvin und setzt durch Kernfusion von Wasserstoff zu Helium erhebliche Mengen an Energie frei, welche die Sonne in Form von Strahlung in einem breiten elektromagnetischen Spektrum abgibt. Die Energie breitet sich von der Photosphäre und der Corona der Sonne ausgehend radial aus. Die Energiedichte nimmt demnach im Abstand von der Sonne ab. Beim Erreichen der oberen Schichten der Erdatmosphäre beträgt die Energiedichte 1.367 W/m^2 [18, 19]. Die Erdatmosphäre ist jedoch nicht vollständig transparent und absorbiert somit einen Teil der einfallenden Strahlung. Atmosphärische Erscheinungen wie Wolken oder Staub verringern zudem durch Absorption die Strahlungsmenge, welche die Erdoberfläche erreicht. Trotz dieser Strahlungsverluste erreicht eine beträchtliche Energiemenge die Erdoberfläche, wie das folgende Beispiel zeigt:
Im Jahre 2000 lag der jährliche Gesamtenergieverbrauch der Weltbevölkerung bei 1,4x10^{14} kWh [20]. Für die Wandlung dieser Energie, musste eine Energiemenge von 2,2x10^{10} kWh bereitgestellt werden. Da Energie der Leistung multipliziert mit der Zeit entspricht, lässt sich überschlägig berechnen, dass die Sonne innerhalb von 30 Minuten mehr Energie auf die Erde strahlt, als die Menschheit in einem Jahr verbraucht. Mit einem Wirkungsgrad von 10 % könnte also mit Hilfe einer Fläche von 490.000 km^2 (700 x 700 km) in einer Zone wie beispielsweise der Sahara, der Weltenergiebedarf komplett gedeckt werden.

Bei dieser Betrachtung muss berücksichtigt werden, dass die Erde als zu temperierende Raum gilt. Darüber hinaus wird Energie zur Photosynthese und Wetterentstehung beansprucht und je größer der Einstrahlungswinkel der Sonne zur Erdeoberfläche ist, desto mehr Energie geht in der Atmosphäre verloren und erreicht nicht den Erdoberfläche [19]. Die Intensität der Sonneneinstrahlung ist somit abhängig von der Tages- und Jahreszeit und den Breitengraden, wie die Abbildung 3 verdeutlichen soll. Die nachstehende Abbildung 4 zeigt die Tages- und Jahreszeitabhängigkeit der Sonneneinstrahlung am Beispiel der Stadt Kairo.

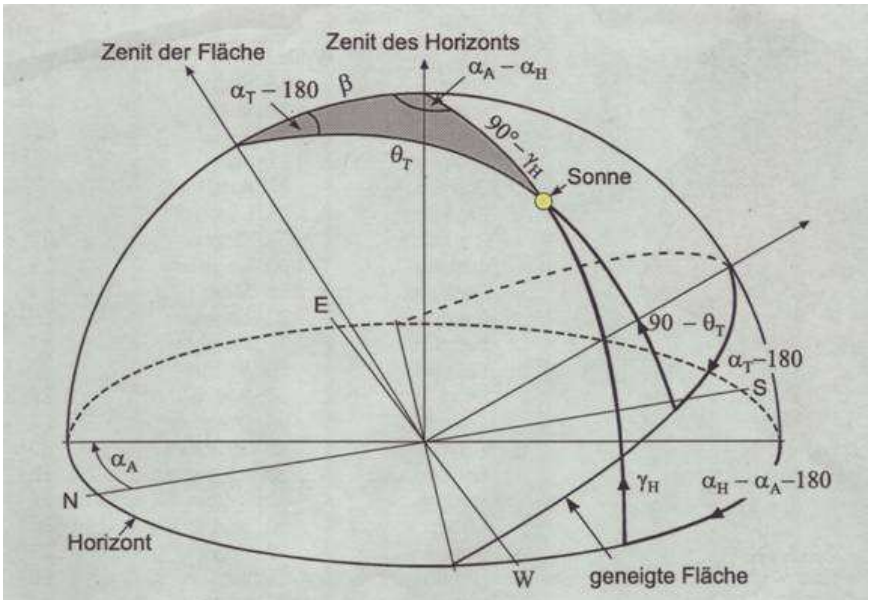

Abb. 1: Transformation der Sonnenposition aus dem Horizontalsystem in das System der geneigten Fläche
(α_A [°]: Ausrichtung der Fläche, α_H [°]: Azimut der Sonne bezüglich der horizontalen Fläche (Nullpunkt im Norden), α_T [°]: Azimut der Sonne bezüglich der geneigten Fläche (Nullpunkt im Norden des horizontalen Bezugssystems), β [°]: Neigung der Fläche, γ_H [°]: Sonnenhöhe bezüglich der horizontalen Fläche, θ_T [°]: Zenitdistanz bezüglich der geneigten Fläche)

Abb. 3: Verschiebung der Sonne in Abhängigkeit vom Breitengrad [21]

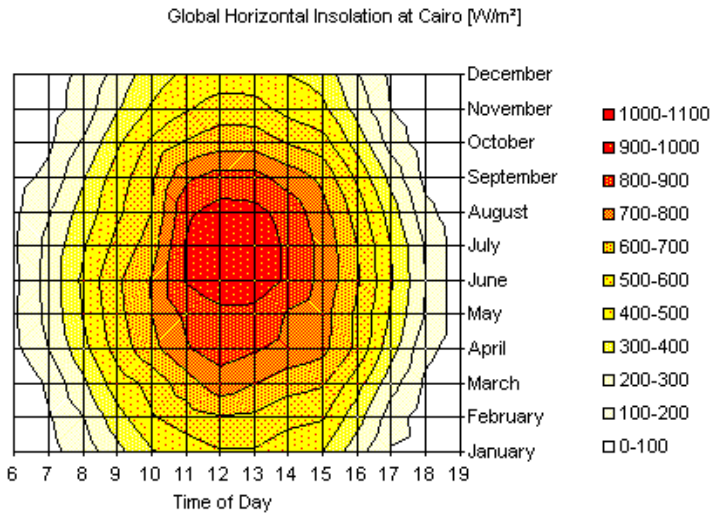

Abb. 4: Tages- und Jahreszeitabhängige Sonneneinstrahlung in Kairo [17]

Die auf die Erde treffende Strahlung wird differenziert zwischen direkter und indirekter Einstrahlung. Direkte Einstrahlung wird auf ihrem Weg von der Sonne auf die Erdoberfläche so gut wie nicht behindert. Indirekte Strahlung, auch diffuse Strahlung genannt, wird von Partikeln (Luft, Staub, Nebel etc.) reflektiert oder absorbiert, bevor sie auf die Erde trifft. Dabei werden bestimmte Spektralbereiche gefiltert und die Energie der Strahlung reduziert (Abb. 5). Die Summe von direkter und indirekter Strahlung wird als Globalstrahlung, welche in ihrer Intensität sowohl von der Jahreszeit (Abb. 5), als auch von der Bewölkung abhängt [18, 21, 23, 24]:

Wolkenloser Himmel	1.000 W/m²
Wechselnd (leicht) bewölkter Himmel	800 W/m²
Bewölkter Himmel	400-600 W/m²

Für die globale Energieeinstrahlung auf eine horizontale Fläche kann in Nordeuropa im Mittel mit 600 bis 800 W/m^2, in Mitteleuropa mit 1.000 W/m^2 und am Äquator mit 1.100 W/m^2 gerechnet werden [20].

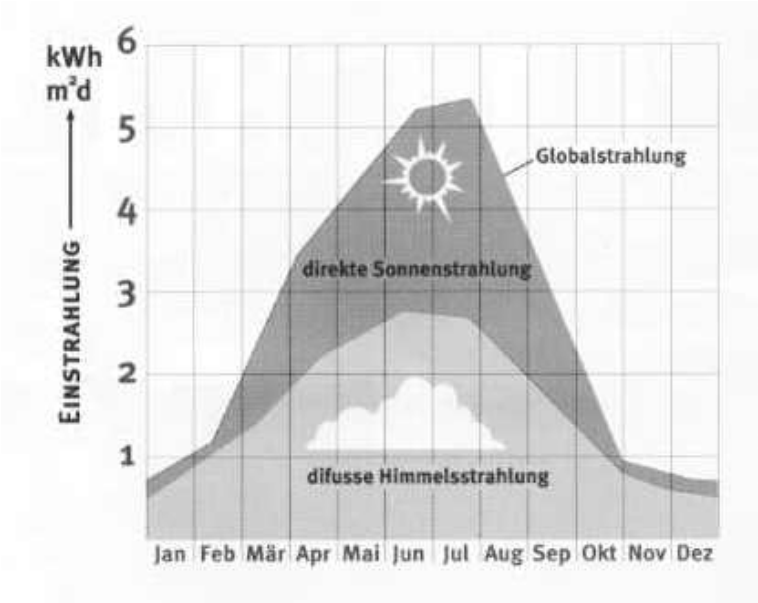

Abb. 5: Globalstrahlung als Summe indirekter (diffuser) und direkter Strahlung [25]

Eine Möglichkeit der direkten Nutzung der Sonnenenergie ist die **Photovoltaik** (Abb. 2) [15, 26]. Photovoltaikzellen auf Basis von Siliziumkristallen sind in der Lage, die Sonnenenergie direkt in elektrische Energie umzuwandeln [27]. Die steigenden Produktion von Silizium, die auf die rapide wachsende Halbleiterindustrie zurückzuführen sind, machen große Photovoltaikanlagen zunehmend attraktiv, wobei auch der doch noch relativ geringe Wirkungsgrad (zwischen 8 und 15 %) dazu beiträgt.

Photovoltaikzellen werden in drei Kategorien aufgeteilt: Monokristalline Solarzellen werden angefertigt, indem lange Siliziumkristalle in dünne Scheiben (ca. 300 µm) geschnitten werden. Monokristalline Solarzellen haben einen hohen Wirkungsgrad ($\eta \approx$13-16 %) und eine lange Lebensdauer. Der Antagonist der monokristallinen Solarzellen sind polykristalline, d.h. Solarzellen mit einer Schichtdicke von ca. 300 µm, in denen mehrere verschiedene Kristalle enthalten sind. Diese sind um einiges preiswerter zu produzieren als monokristalline, leisten dafür aber auch niedrigere Erträge ($\eta \approx$10-15 %). Als drittes lassen sich durch das Beschichten von Glas oder Folien mit 1 µm dicken Siliziumschichten mittlerweile billige Solarzellen (Dünnschichtzellen) herstellen (η=7-8 %). Man spricht in diesem Fall von amorphen Solarzellen [28].

In Personenhaushalten hat sich der Einsatz der Photovoltaik in den letzten Jahren, nicht zuletzt auch durch die staatlichen Förderungen vor allem in Deutschland etabliert. Photovoltaikzellen bzw. -anlagen sind relativ einfach aufzubauen, in diversen Formen erhältlich und liefern langfristig gute Ergebnisse ohne intensive Wartungen zu beanspruchen.

Eine andere Möglichkeit der direkten (aktiven) Nutzung der Sonnenenergie ist die **Solarthermie**, welche die Umwandlung der Sonnenstrahlung in direkt nutzbare Wärme beschreibt [1]. Basierend auf einer langjähriger Erfahrung gibt die vorliegende Arbeit einen Einblick in die Entwicklung und Funktionstüchtigkeit von Solarthermie-Kollektoren zur Warmwassergewinnung wieder. Hierfür wurde extensiv auf Hintergrundwissen in den Bereichen der Energiegewinnung durch die Sonne, des Heizens von Gebäuden und Wasserbeständen, der Stromerzeugung sowie die Entsalzung [29] und Aufbereitung von Wasser zurückgegriffen.

2. Stand der Technik

Wie in der Einleitung beschrieben, wird fast sämtliche auf der Erde zur Verfügung stehende Energie von der Sonne geliefert. Thermische Solarkollektoren sind in der Lage die Strahlungsenergie der Sonne in nutzbare Wärme umzuwandeln [15, 30]. Dabei wird in der Solarthermie grundsätzlich zwischen zwei Systemen unterschieden, um die Strahlungsenergie auf ein Trägermedium zu übertragen:

- Nicht fokussierende Flach- oder Niedertemperaturkollektoren, welche die Sonnenstrahlen auf einer Absorberplatte oder Röhren auffangen. Der Marktanteil solcher Kollektoren liegt bei ca. 85 % [31].
- Fokussierende Hochtemperaturkollektoren, bei welchen die Sonnenstrahlen von einem oder mehreren Hohlspiegeln reflektiert und in einem Strahlungsempfänger aufgefangen werden.

Nichtfokussierende Sonnenkollektoren

Nichtfokussierende Sonnenkollektoren werden vor allem zur Erwärmung von Wasser und Luft eingesetzt. Diese sind üblicherweise auf Dächern montiert [32]. Prinzipiell ist der Grundaufbau der nicht konzentrierenden Flach- oder Niedertemperaturkollektoren immer identisch. Die Abbildungen 6 und 7 geben den Aufbau wieder.

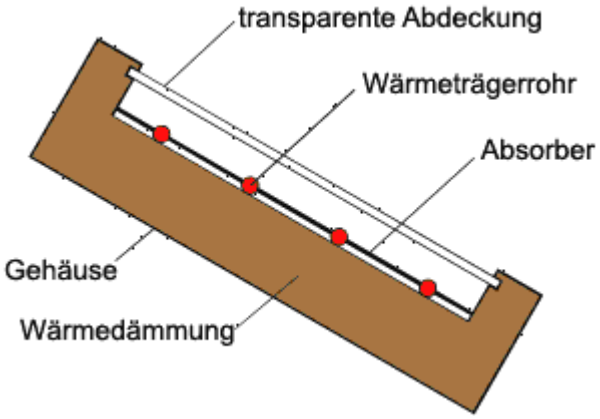

Abb. 6: Schematischer Aufbau eines Flachkollektors [32]

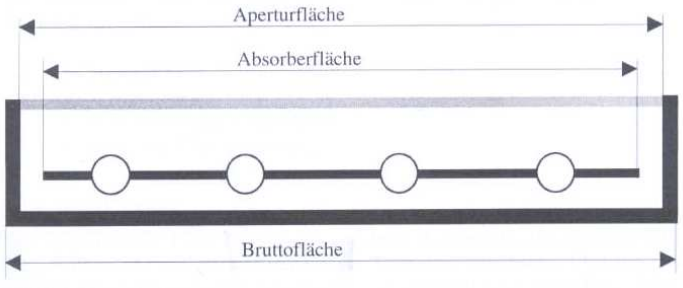

Abb. 7: Bezeichnung der Bezugsflächen eines Sonnenflachkollektors [33]

Ein Rahmen mit einer Bruttofläche (Abb. 7) beherbergt einen Absorber, der bei Sonnenbestrahlung die empfangene Energie direkt auf ein flüssiges Trägermedium weitergibt. Oft wird dieser Absorber mit Hilfe einer transparenten Abdeckung i.d.R. Glas von der Umgebung getrennt [34]. Die Fläche der transparenten Abdeckung wird als Aperturfläche bezeichnet (Abb. 7). Im Gegensatz zu elektrischen Durchlauferhitzern ist die Flüssigkeit, welche

über den Absorber von der Sonne erwärmt wird, nicht das Wasser, welches verbraucht wird. Es handelt sich meistens um ein Gemisch von Wasser und einem Frostschutzmittel, das über einen Wärmetauscher seine Energie in einen Wasserspeicher abgibt [35]. Das in diesem Speicher enthaltene Wasser kann dann direkt benutzt werden oder als Puffer dienen, indem das zu erwärmende Wasser für den Endkonsumenten über einen weiteren Wärmetauscher erwärmt wird. Diese Trennung der Wasserkreisläufe schützt vor der Bildung bzw. Kontamination von Mikroorganismen (u.a. Legionellen) im Wasser [36] und dient zur besseren Ausbeute bei schwankenden Erhitzungsgraden z.B. bedingt durch potentielle Wolkenbedeckungen. Die folgende Abbildung 8 verdeutlicht das Prinzip eines Niedertemperatur-Sonnenkollektorsystems bestehend aus einem Kollektor, Warmwasserspeicher mit zwei Wärmetauscher, Umwälzpumpen, einem elektronischen Durchlauferhitzer, der die fehlende Wärmeleistung ergänzt, sowie der Verbrauchereinheit. Man spricht hier von einem geschlossenen System.

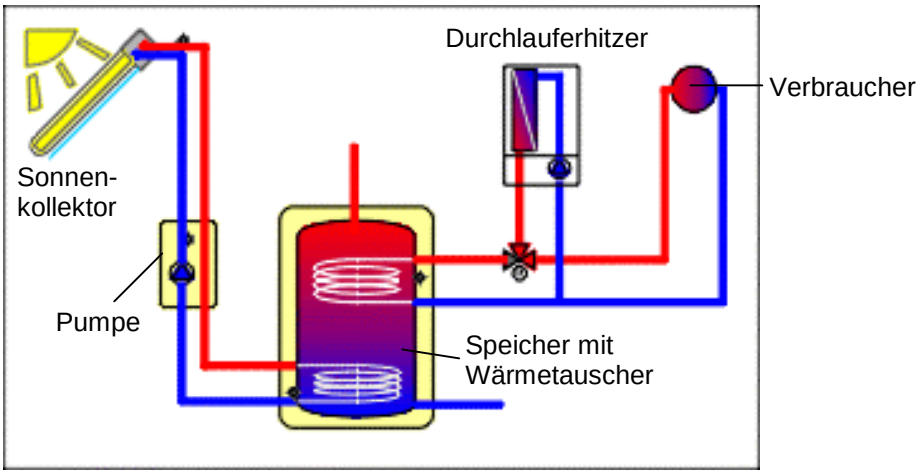

Abb. 8: Schematischer Aufbau eines Sonnenkollektorsystemes zur Warmwassergewinnung

Wird auf den Einsatz der Umwälzpumpen inkl. Steuerung zur Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades oder zur autarken Brauchwassererwärmung in abgelegenen und sonnenreichen Regionen verzichtet, so werden Schwerkraftsysteme eingesetzt [37]. Die folgende Abbildung 9 zeigt den schematischen Aufbau eines Schwerkraftkollektors mit Druckspeicher.

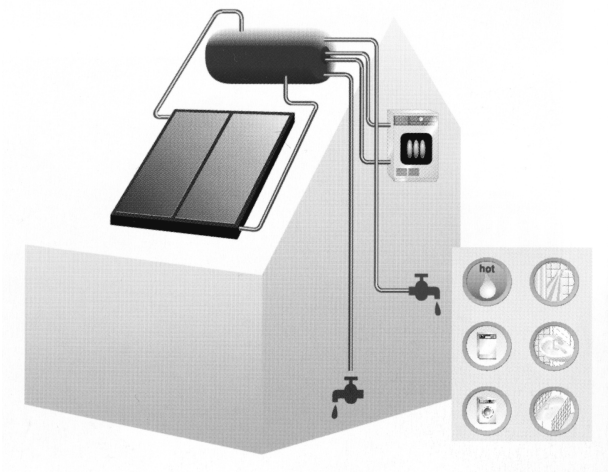

Abb. 9: Schema eines Schwerkraftkollektors mit Druckspeicher [37]

In der Abbildung 9 ist zu erkennen, dass der Speicher höher als der Kollektor aufgestellt wird. Durch Ausnutzung der Schwerkraftströmungen sinkt das kalte Wasser auf den Speicherboden, wo es durch eine Rohrleitung zum unteren Ende des Kollektors geleitet wird. Im Kollektor heizt

sich das Wasser auf und steigt nach oben, wo es wieder zurück zum Speicher geleitet wird – ohne Umwälzpumpe. Die Durchflussrate des Kollektors ist damit jedoch erheblich niedriger als die eines pumpengetriebenen Kollektors. Darüber hinaus sind diese Kollektorsysteme anfällig gegen Verkalkung und damit wartungsintensiv.

Um Konvektionsverluste im Kollektorkasten zu reduzieren, besteht weiterhin die Möglichkeit, die im Kollektor vorhandene und wärmeabführende Luft aus dem Innenraum herauszupumpen. Diese Kollektoren nennt man Vakuum-Flachkollektoren oder Vakuum-Röhrenkollektor, wenn sich der Absorber in einer evakuierten, druckfesten Glasröhre befindet (Abb. 10).

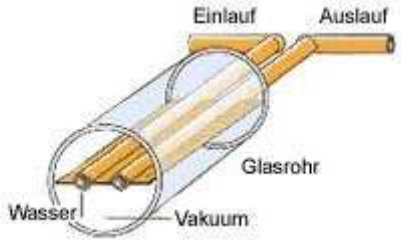

Abb. 10: Schematischer Aufbau eines Vakuumröhrenkollektors [32]

Vakuumkollektoren (Innendruck≈1 mbar) erreichen i.d.R. höhere Temperaturen (bis 120 ℃) als Flachkollektoren (bis 80 ℃). Vor allem bei höheren Temperaturen ergeben sich beim Einsatz von Vakuumkollektoren höhere Wirkungsgrade als für Flachkollektoren, wie die Abbildung 11 zeigt. Der Grund liegt in der deutlichen Verringerung der freien Konvektion der Luft zwischen dem Absorber und der Glasröhre bzw. -scheibe und damit in der Reduzierung der Wärmeverluste. Nachteilig an Vakuumkollektoren ist die Tatsache, dass diese etwa alle ein bis drei Jahre neu evakuiert werden müssen. Im Hinblick auf die spezifischen Kollektorkosten liegen die marktüblichen Vakuum-Röhrenkollektoren derzeit mit 500 bis 1.250 Euro (2008) pro m² Kollektorfläche um einiges über denen von Flachkollektoren (150 bis 600 Euro/m²) oder gar von einfachen Kunststoff-Absorbern (25 bis 100 Euro/m²) [32].

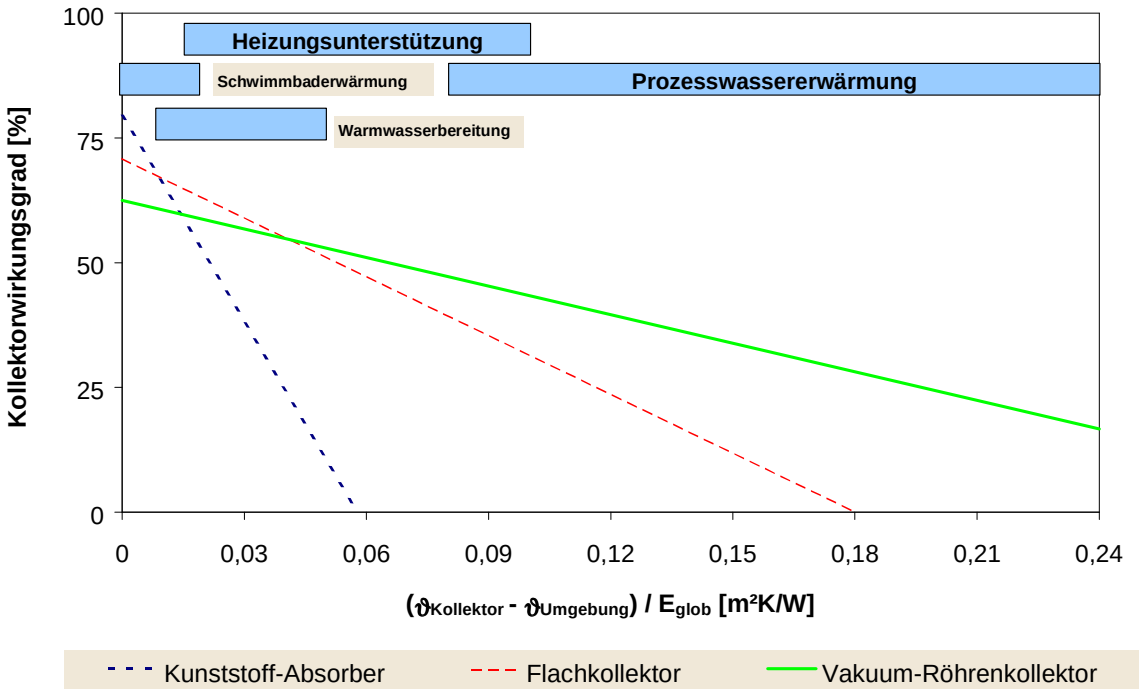

Abb. 11: Wirkungsgradkennlinien und Arbeitsbereiche verschiedener Kollektortypen (Einstrahlung: 1000 W/m²) [32]

Fokussierende Sonnenkollektoren

Einen zumeist höheren Wirkungsgrad als die nicht-fokussierenden Kollektoren besitzen die komplexeren und teureren fokussierenden Sonnenkollektoren [38]. Dabei wird die Sonnenstrahlung von einem oder mehreren Reflektoren reflektiert und in einem vom Wärmeträgerfluid durchströmten Absorber (Strahlungsempfänger) aufgefangen [39] (Abb. 12). Als Wärmeträgerfluid werden temperaturbeständige Thermoöle eingesetzt. Durch die Konzentration wird die Intensität der Sonnenenergie verstärkt, wobei im Absorber Temperaturen von mehreren hundert bis tausend Grad Celsius erzielt werden. Sie werden meistens als Hochleistungskollektoren eingestuft und dienen weniger der Warmwassererzeugung und der Dampfgewinnung zur Stromproduktion. Um die Strahlungsenergie so gut wie möglich einzufangen, werden die Reflektoren mit Hilfe von zwei- oder dreiachsigen Tracking-Systemen von sogenannten Heliostaten dem Sonnenstand nachgeführt. Ist lediglich eine einachsige Nachführung möglich, so ergeben sich Leistungsminderungen etwa 13 bis 20 % pro Rotationsachse [40].

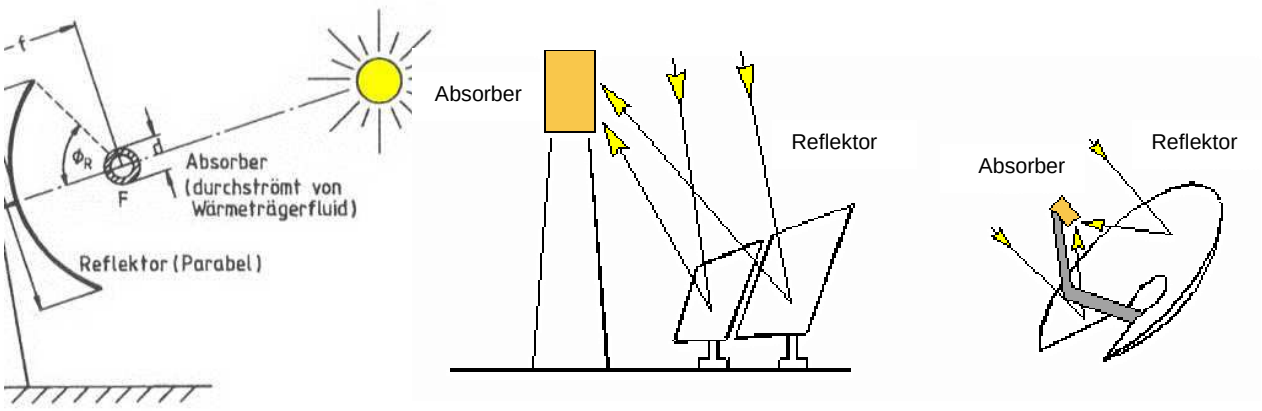

Abb. 12: Aufbau fokussierender Sonnenkollektoren [17]

Die fokussierende Sonnenkollektoren sind prinzipiell in zwei Kategorien einzuteilen: Zunächst die Kategorie der axial fokussierenden Anlagen. Die Fokussierung der Sonnenstrahlen findet hier entlang der Symmetrieachse der Spiegelform statt (Abb. 12, l. und Abb. 13). Die zweite Kategorie der Sonnenkollektoren sind punktuell fokussierende Anlagen. Meistens hat die Konstruktion in diesem Fall die Form eines Kreisausschnittes, wodurch ein Brennpunkt im Kreiszentrum entsteht (Abb. 12, Mitte und rechts). Besonders geeignet sind diese Hochtemperaturkollektoranlagen zum Sieden von Wasser oder Erhitzen eines Thermoöles.

Eines der bekanntesten Beispiele für Hochleistungskollektoren ist eine in Kalifornien (USA) in Betrieb genommene Anlage, welche in der Abbildung 13 wiedergegeben ist.

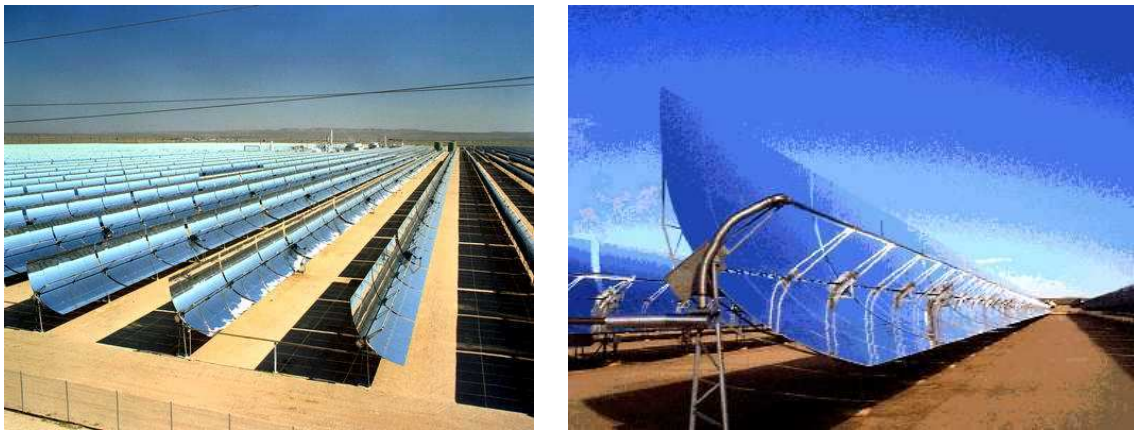

Abb. 13: Axial fokussierende Sonnenkollektoren [17]

Absorbermaterial

Für den Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors ist der Absorber von entscheidender Bedeutung, da dieser die Sonnenstrahlung möglichst gut absorbieren und in Wärme (hoher Absorptionsgrad) umwandeln. Ferner soll er möglichst wenig Wärme abgeben und Strahlen emittieren (niedriger Emissionsgrad) [18, 40, 41]. Glänzende Flächen sind daher unerwünscht - auch wenn sie oft nicht vermeidbar sind - da sie einen Teil der Sonnenstrahlung wieder reflektieren. Die Abbildung 14 gibt für verschieden beschichtete Kupferbleche die Absorptionsgrade α und Emissionsgrade ε wieder.

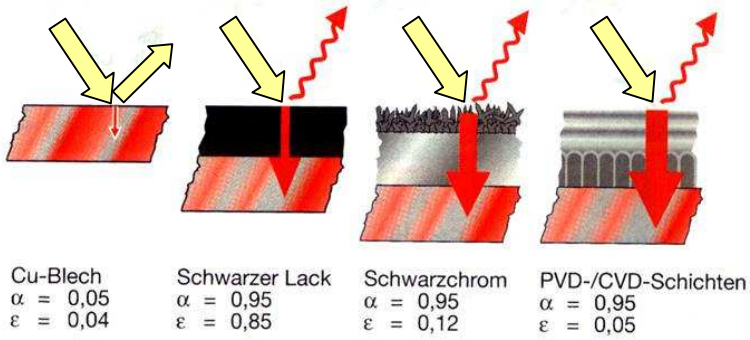

Abb. 14: Absorptions- und Emissionsgrade für verschieden beschichtete Kupferbleche [42]

Die Abbildung 14 zeigt, dass ein preiswerter schwarzer Lack als Absorberschicht zwar einen hohen Absorptionsgrad aufweist, jedoch auch einen hohen Emissionsgrad besitzt. Um die Energieverluste zu reduzieren, werden daher heutzutage vorrangig hoch selektive Beschichtungen eingesetzt [43, 44]. Dies sind beispielsweise

- sogenannte Schwarzchrom-Beschichtungen, die in einem galvanischen Verfahren auf das aus Kupfer oder Aluminium bestehende Absorberblech aufgebracht werden. Sie bestehen aus mikroskopischen Chrompartikeln, die das Sonnenlicht zwischen sich einfangen, jedoch aufgrund ihrer geringen Größe bei größeren Wellenlängen (IR-Bereich) wenig emittieren. Der Emissionsgrad liegt hierbei bei lediglich 12 %,
- aufgetragene Schichten auf Titanbasis mit bläulicher Farbe, die gegenüber Schwarzchrom zwar etwas schlechtere Absorptionswerte aufweisen, aber dafür deutlich niedrigere Emissionswerte und damit insgesamt einen besseren Wirkungsgrad als lackierte Oberflächen erreichen oder

- sog. „Sunselect-Beschichtung“ des Glas- und Beschichtungsherstellers Interpane (Lauenförde), eine Keramik-Metall-Struktur, die wie die Titan-Nitrit-Oxid-Beschichtungen im Vakuum-Sputter-Verfahren aufgebracht wird und ebenfalls schwarzbläulich schimmert. Die mit dem Akronym PVD und CVD bezeichneten vakuumbasierenden Verfahren haben sich aufgrund ihres hohen Absorptionsgrades und niedrigen Emissionsgrades auf dem Markt fest etabliert. Diese Beschichtungen lassen sich bisher im großen Maßstab nur auf Absorberblechen aus Kupfer aufbringen. Entsprechende Techniken für Aluminiumabsorber sind erst seit kurzem auf dem Markt.

Generell werden im Stand der Technik Absorptionsgrade von bis zu etwa 95 % und Emissionswerte von weniger als 10 % für die aufgrund der Eigentemperatur des Absorbers emittierte Strahlung erreicht.

Absorberaufbau

Neben der Beschichtung unterscheiden sich die Absorber auch in ihrem prinzipiellen Aufbau [43]. Der Absorberaufbau kann generell auf vier grundlegende Prinzipien basieren, welche in der Abbildung 15 wiedergegeben sind:

a) Rohr-Blech Kombinationen: Die einzelnen Rohre sind in diesem Fall mit einem wärmeleitenden Material miteinander verbunden, wodurch die Absorberfläche vergrößert wird. Die Wärme wird über das Blech zu den Rohren geleitet, welche die Energie über Wärmeleitung auf die Trägerflüssigkeit transferieren. Beabsichtigte Unebenheiten im Blech können zur Oberflächenvergrößerung dienen.

b) Sind die Rohre nicht mit einem Blech überzogen, sondern sind zwischen zwei Blechen Leitungen integriert, spricht man von einer „Fläche mit Kanal“. Die Trägerflüssigkeit kann so die gesamte Absorberfläche unterströmen und sorgt so für einen schnellen Energietransfer.

c) Absorber können ebenfalls aus einer einzigen Hohlfläche bestehen. Die beiden Oberflächen sind meistens durch Abstandhalter voneinander getrennt.

d) Rohrkollektoren, bei denen der Absorber selber aus einem Rohr besteht.

Die genannten Absorberkonstruktionen sind i.d.R. unabhängig von den verwendeten Materialien.

Trotz ausgereifter Absorbermaterialien gehen in der Regel fast 20 % der von der Sonne eingestrahlten Energie beispielsweise durch Reflexion, Absorption der Abdeckung, Staub bzw. Verschmutzungen auf der Kollektoroberfläche und/oder schlechter Kollektordämmung verloren [42]. Um die Wärmeverluste zu reduzieren sind Kollektoren, mit Ausnahme der zu bestrahlenden Fläche (Aperturfläche) zu dämmen.

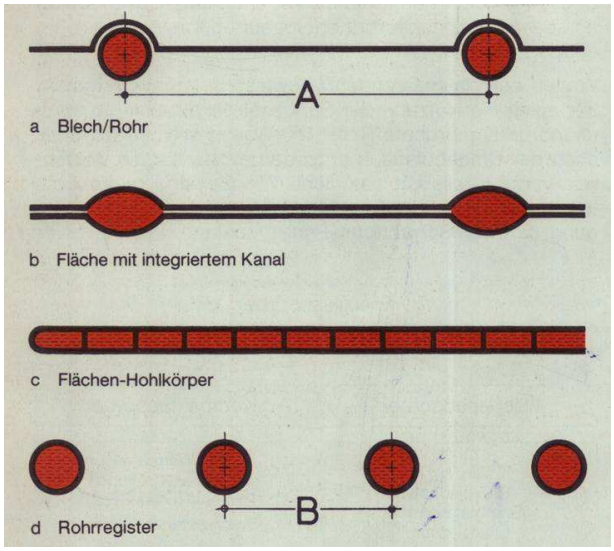

Abb. 15: Typischer Aufbau von Absorbern [45]

3. Zielsetzung und Aufgabenstellung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Entwicklung, der Bau und die Prüfung von neuartigen, preiswerten Systemen für solarthermische Anwendungen aufzuzeigen, die hohen Potenziale der Sonnenstrahlung für die Energiegewinnung zu erläutern, damit mit Hilfe sonnenbasierter regenerativer Energiequellen zukünftige Energieengpässe reduziert werden können.

Ausgehend von einer Analyse von Kollektoren aus dem Stand der Technik [30] lassen sich die Anforderungen an die neue Sonnenkollektorgeneration wie folgt formulieren:

- Gesamtwirkungsgrad oberhalb des Standes der Technik,
- hohe mechanische und thermische Stabilität bzw. beständig gegen Umwelteinflüsse (Wind- und Wassererosion, Hitze- und Kälte, UV-Strahlung),
- geringes Gewicht auch im Hinblick auf eine größtmögliche Mobilität,
- einfache Montage und Handhabung (Installation und Betrieb) für den Endbenutzer und
- attraktiver Preis.

Die vorliegende Arbeit zielte darauf, in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Elektrotechnik der Universität Kaiserslautern und dem Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf Sonnenkollektoren unterschiedlichster Bauformen zu entwickeln, welche den oben genannten Anforderungen entsprechen, um diese im Niedertemperatur- bis hin zum Hochtemperaturbereich zur Warmwassererzeugung verwenden zu können.

4. Lösungsweg

Die Lösung der formulierten Ziele führte über eine Reihe von Versuchen, Messungen und Auswertungen mit neuen Materialien und Aufbauten. Der Lösungsweg gliederte sich wie folgt:

- Analyse des Standes der Technik und der auf dem Markt verfügbaren Sonnenkollektoren für den Nieder- und Hochtemperaturbereich (NT/HT).
- Aufbau eines geeigneten Mess-/Testverfahren.
- Ermittlung der idealen Bauform bzw. Parabelöffnung (HT-Kollektor) der Sonnenkollektoren.
- Entwicklung und Prüfung von Kollektoreinzelelementen.
- Durchführung von Praxisversuchen mit dem Gesamtkollektorsystem.
- Entwicklung einer Computersimulation zur Beschreibung der Prozessabläufe und Vergleich der Ergebnisse mit denen aus der Praxis (nur für NT-Kollektoren).

In der Abbildung 16 ist der Lösungsweg als Blockdiagramm vereinfacht dargestellt.

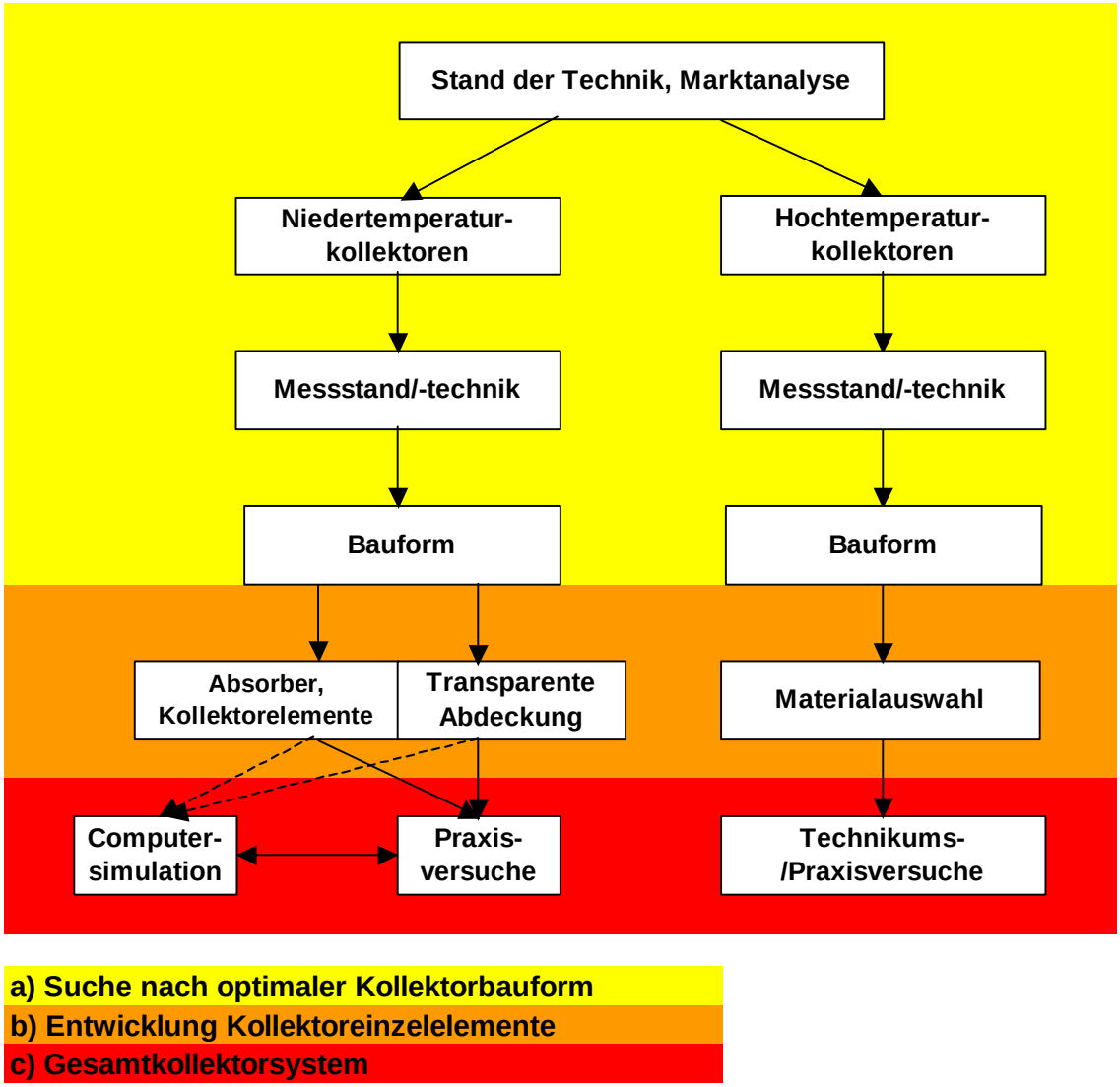

Abb. 16: Lösungsweg

5. Material und Methoden

5.1 Niedertemperaturkollektoranlage

Der Messstand für die Erforschung und Optimierung der Prozesse im Niedertemperaturbereich wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Kaiserslautern in Anlehnung an die DIN 4745 entwickelt und aufgebaut [33, 46], da die DIN 4745 nicht für die Prüfung von dreidimensional geformte Sonnenkollektoren ausgelegt ist sondern für ebene, zweidimensionale.

Der eingesetzte Messstand gliedert sich prinzipiell in zwei Teile:

- Kollektoranlage bestehend aus 6 Kollektoren, je 2 in Serie geschaltet und zu 3 Gruppen parallel betrieben, einem Wärmespeicher/-tauscher sowie Rohrverbindungen und Armaturen (Kap. 5.1)
- Messgeräte und einem Datenerfassungssystem zur Aufzeichnung der Prozesse (Kap. 5.2).

Der Messstand wurde dementsprechend gewählt und aufgebaut, dass die zwei wichtigsten Anlagenkomponenten (Kollektoren, Wärmespeicher/-tauscher) getrennt voneinander untersucht werden können. Der Messstand ermöglicht u.a. bei einer identischen Kollektorvorlauftemperatur die Erfassung der jeweiligen Kollektorrücklauftemperaturen zur Bestimmung der Effektivität der jeweiligen Kollektorpaare. Darüber hinaus kann durch Bestimmung der Wärmeabgabe im Wärmespeicher/-tauscher dieser quantitativ beurteilt werden.

Beim Aufbau des Messstandes wurde besonders darauf geachtet, dass fast alle Parameter berücksichtigt wurden, denen Sonnenkollektoren unter natürlichen Betriebsbedingungen unterlegen. Viele der Messungen erforderten neue technische Ausstattungen, die speziell für diesen Zweck an der Universität Kaiserslautern entwickelt wurden.

Der Aufbau des Messstandes ist in der Abbildung 17 dargestellt. Als Wärmeträgermedium wurde Wasser eingesetzt. Die Komponenten innerhalb des gestrichenen Rechteckes befinden sich im Gebäude, die übrigen entweder auf dem Gebäudedach oder an der Außenwand (Rohrleitungen).

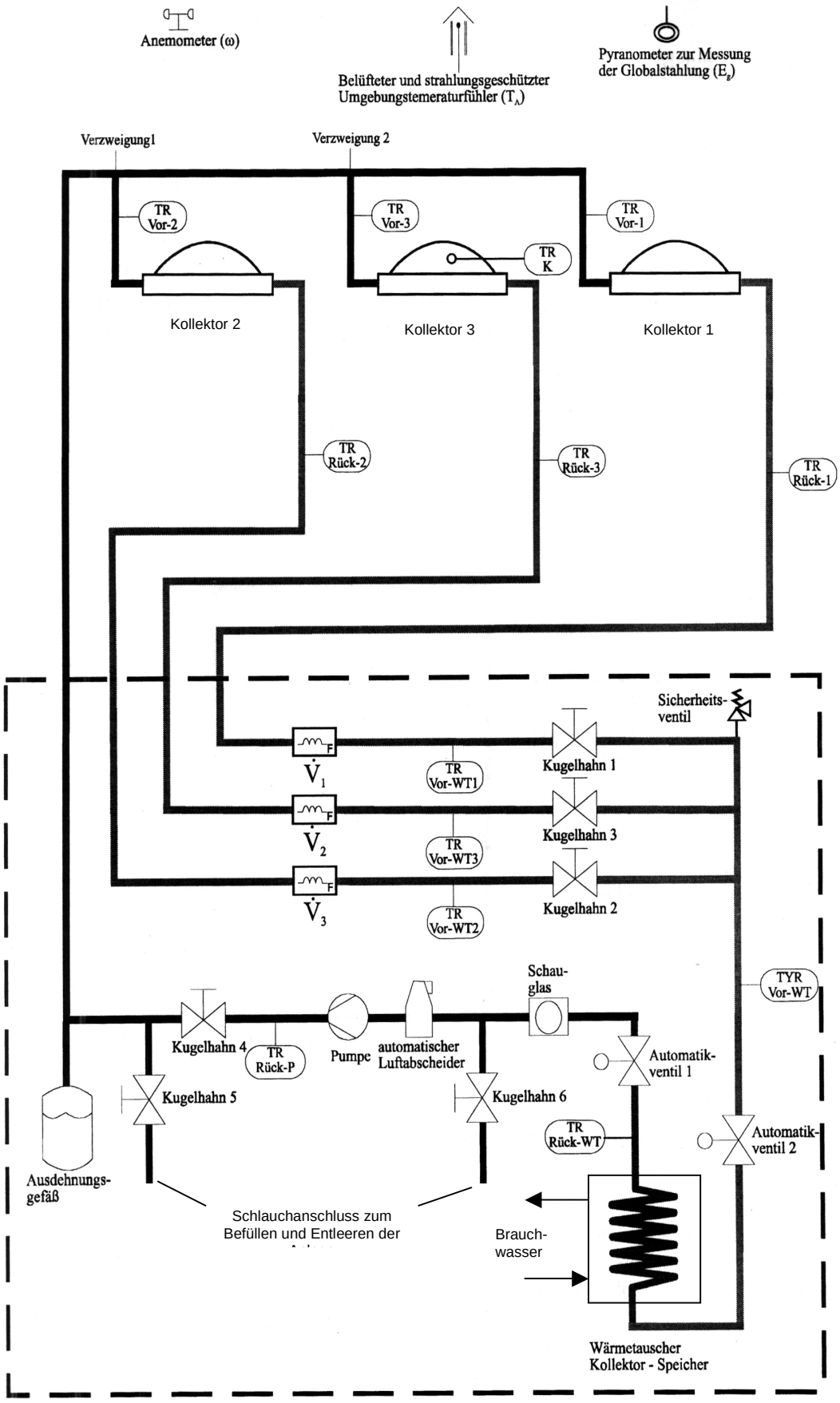

Abb. 17: Fließbild der NT-Kollektoranlage und Messeinrichtungen

Ausgehend von der Umwälzpumpe bis zu den Verzweigungen 1 und 2 haben alle in der Abbildung 17 dargestellten Kollektoren einen gemeinsamen Vorlauf. Anschließend zweigt der Vorlauf zu den jeweiligen Kollektorpaaren ab. Die Kollektoren haben jeweils im Vor- und Rücklauf einen Temperatursensor. Von den Kollektorpaaren führt jeweils ein Rücklauf zurück in das Gebäude. Hier wird der Massenstrom für jeden Kollektor sowie die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf gemessen. Die zweite Temperaturmessung im Rücklauf ist erforderlich, um die in den Speicher eingebrachte Energie zu bestimmen. Da auf der gesamten Länge der Leitung Wärme verloren geht, wird die Temperatur direkt vor und hinter dem Wärmespeicher/-tauscher gemessen. Hier befindet sich ebenfalls für jeden Kollektorzweig ein Kugelhahn, mit dem die einzelnen Kollektoren ein- und ausgeschaltet bzw. der Durchfluss eingestellt werden kann. Nach den Kugelhähnen werden die drei Rückläufe wieder zusammengeführt und münden in den Wärmetauscher, über den die Wärmeenergie in den Speicher eingebracht wird. Vor und nach dem Wärmetauscher befinden sich zwei Rückschlagventile. Nach dem Wärmetauscher folgt die Pumpe, womit der Kreislauf geschlossen ist.

Zwischen Pumpe und Kollektor befindet sich ein Ausdehnungsgefäß, so dass gemäß DIN 4745 ein konstanter Anlagendruck während den Messungen gewährleistet wird. Um kleinere Druckschwankungen erfassen zu können, ist vor dem Druckausdehnungsgefäß ein Drucksensor eingebaut (nicht im Fließbild). Die Fehlergrenze ist berücksichtigt mit ±2 % des Druckabfalls und darf nicht weniger als ±0,5 mbar betragen [33].

Die weiteren Komponenten wie Sicherheitsventil, Schauglas sowie die Kugelhähne zum Befüllen und Entleeren der Anlage sind nur der Vollständigkeit wegen eingezeichnet. Sie haben keinen Einfluss auf das Verhalten der Anlage im normalen Betrieb.

5.1.1 Kollektoranlage

Die eingesetzte Kollektoranlage kann in drei Komponenten gegliedert werden: Solarkollektoren, Wärmespeicher/-tauscher sowie Rohrverbindungen und Armaturen.

5.1.1.1 Sonnenkollektoren

Für die Untersuchungen der Niedertemperatur-Kollektoren wurden jeweils zwei (baugleiche) Kollektoren auf einem Aluminiumrahmen montiert und zusammengeschlossen. Auf die eingesetzten Sonnenkollektoren wird im Kapitel 6.2 detaillierter eingegangen.

5.1.1.2 Wärmespeicher mit Wärmetauscher

Der Wärmespeicher (Fa. Rotex, Güglingen) bestand aus einem doppelwandigen Kunststoffbehälter mit einem Fassungsvermögen von 500 Liter, einer Höhe von 1,70 m und einem Außen- bzw. Innendurchmesser von ca. 80 cm bzw. 65 cm. Als Speichermedium wurde Wasser mit einem Korrosionsschutzmittel benutzt. Wie in Abbildung 18 dargestellt, beinhaltet der Wärmespeicher zwei Wärmetauscher bestehend aus jeweils einem Rohrwendel mit einer Länge von ca. 30 m. Dies entspricht eine Oberfläche von 1,7 m². Der Wärmetauscher am Boden des Behälters gibt die Wärme an das Trägerfluid im unteren Bereich des Speichers ab. Das warme Wasser besitzt eine geringere Dichte als das kalte Wasser im oberen Teil des Speichers und steigt deshalb langsam hoch. Es entsteht demnach eine „Schichtung“ (Temperaturgradient) im Speicher. Der Speicher kann durch den oberen Wärmetauscher die Wärmeenergie an den Verbraucher wieder abgeben. Generell muss der Wärmespeicher gut gedämmt sein, um Wärmeverluste zu minimieren.

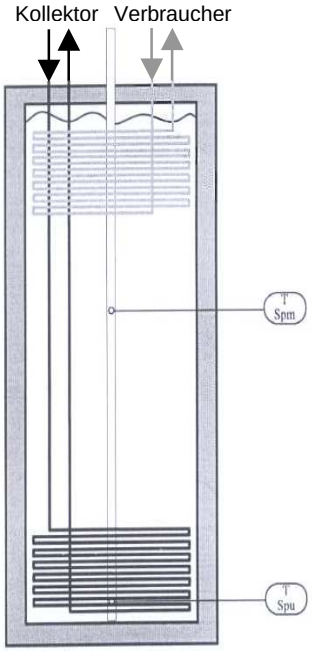

Abb. 18: Wärmespeicher mit Wärmetauscher

Der Speicher selber war von zwei automatischen Ventilen am Vor- und Rücklauf der Kollektoranlage absperrbar. Der Grund hierfür ergab sich während den Untersuchungen, bei denen während dem Anlagenstillstand immer wieder Temperaturabfälle im Speicher registriert wurden. Da die drei Durchflussmesser keine Wasserbewegung meldeten, wurde zuerst von einem Defekt der Anlage oder des Messsystems ausgegangen. Untersuchungen zeigten jedoch, dass schwache Schwerkraftströmungen in den Leitungen dafür verantwortlich waren. Diese Strömungen waren so gering, dass sie von den Durchflusssensoren nicht registriert werden konnten, aber trotzdem zu einer erheblichen Abkühlung des Speichers im Laufe einer Nacht führten. Dies geben die Graphiken in der Abbildung 19 wieder.

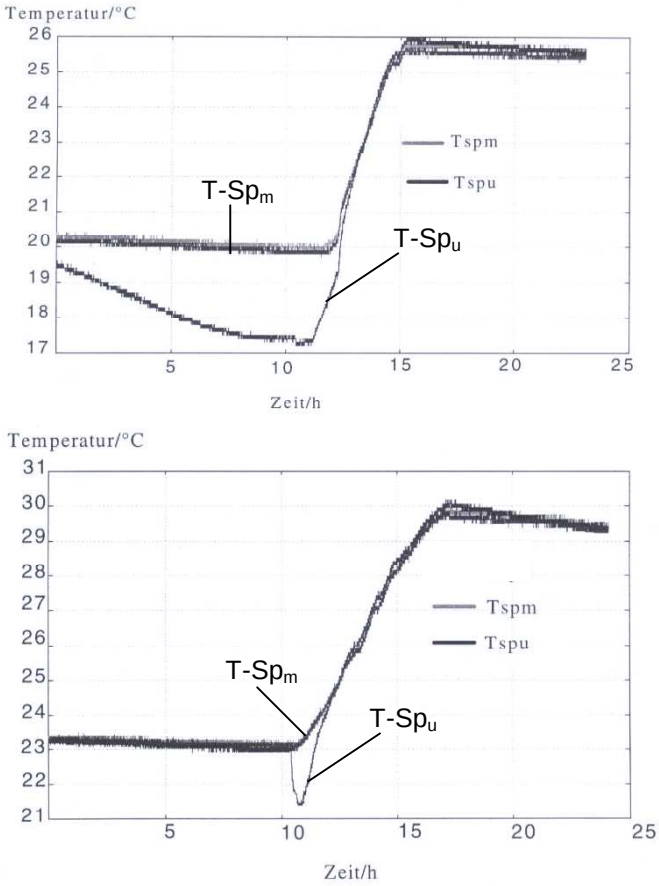

Abb. 19: Thermische Verluste im Speicher ohne (oberes Diagramm) und mit (unteres Diagramm) Automatikventil

Das obere Diagramm in Abbildung 19 zeigt im Vergleich zum unteren, dass in den ersten 10 Stunden die Bodentemperatur im Speicher ($T\text{-}Sp_u$) trotz konstanter mittlerer Speichertemperatur ($T\text{-}Sp_m$) aufgrund der Wärmeverluste durch Schwerkraftströmungen in der Anlage deutlich abnahm. Werden die Ventile bei t=0h geschlossen, so werden die Verluste wirksam unterbunden ($T\text{-}Sp_m$=$T\text{-}Sp_u$) (Abb. 19, unten). Die Abbildung 19 zeigt ferner, dass nach dem Einschalten der Anlage (t=10h) die Wärmespeichertemperatur durch das erwärmte Kollektorwasser sprunghaft anstieg. Darüber hinaus konnte ein kurzer Temperaturabfall der unteren Speichertemperatur in der Abbildung 19 (unten) nach dem Öffnen der Ventile, bedingt durch das Einströmen von kaltem Wasser aus den Leitungen zwischen Wärmespeicher und Kollektoren, beobachtet werden. Die Wärmeverluste in den wärmegedämmten Rohrleitungen, welche maßgeblich von der Rohrlänge und dem Durchmesser beeinflusst werden, lagen bei einer Betriebstemperatur von 40 ℃ bei 15 %.

5.1.2 Messgeräte und Sensoren

Insgesamt wurden die Vorgänge in und um die Kollektoranlage über 24 Stunden von 23 Messgeräten und/oder Sensoren aufgenommen und die Messdaten durch eine entwickelte Software ausgewertet und gespeichert [33]. Das Computersystem erlaubte die Steuerung der Leistungsrelais, welche die Umwälzpumpe und Rückschlagventile nach der Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Speicher steuerten [47].

Im Detail wurden folgende Messgeräte und Sensoren, welche im Folgenden genauer beschrieben werden, eingesetzt [33]:

- 15 Temperatursensoren Typ SMT 160-30 der Fa. Ginsbury Electronic, Ottobrunn
- 3 Durchflusssensoren Typ Promag 33A der Fa. Endress&Hauser, Weil am Rhein
- 1 Pyranometer CM11 der Fa. Kipp&Zonen, Delft (NL)
- 1 Strahlungssensor Radiostat 2 der Fa. Krieger, Stuttgart
- 1 Windmesser (Anemometer) Typ 14575 der Fa. Lambrecht, Göttingen

Die Erfassung der **Temperaturen** an verschiedenen Punkten der Anlage war eine der wichtigsten Aufgaben für die Bestimmung des Wirkungsgrades der Sonnenkollektoren. Die eingesetzten Sensoren des Typs SMT 160-30 haben eine ausgewiesene Fehlertoleranz von ±0,6 K, was bei der Bildung des Wertes $\Delta\vartheta$ im Extremfall eine Temperaturabweichung von 1,2 K bewirken kann. Dabei ist der relative Fehler (1,2 K*100/$\Delta\vartheta$) umso größer, je niedriger die eigentliche Temperaturdifferenz wird. Um die Fehlergröße zu minimieren wurde eine Selektion von 15 aus 30 vorhandenen Temperatursensoren durchgeführt. Die Fehlertoleranz sank nach der Selektion auf einen Wert von ±0,25 K.

Zwei Temperatursensoren wurden jeweils im Vor- und Rücklauf (T_R-Vor-x, T_R-Rück-x) eines der drei Kollektorpaare in einer Messing-Hülse in den Wasserstrom eingebaut. Die Hülse schützte die Sensoren, führte aber auch zu einer Verzögerung der „Sensorreaktion“ bei Temperaturänderungen (Abb. 20).

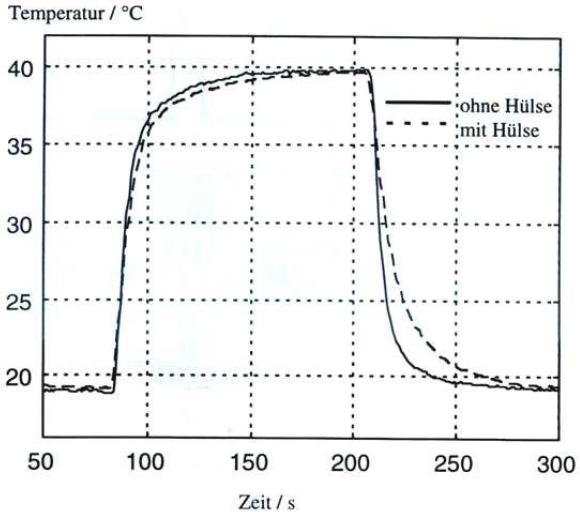

Abb. 20: Verzögerung der Temperaturmessung mit und ohne Messing-Hülse

Ein weiterer Temperatursensor wurde in je einem der zwei in Serie geschalteten Kollektoren am Absorber eingebaut (T_R-K). Des weiteren wurden an jedem der Rückläufe im Gebäudeinneren, kurz vor dem Zusammenlaufen der Leitungen, Temperatursensoren (T_R-Vor-WT-x) installiert, um die Leitungsverluste bestimmen zu können. Zwei weitere Sensoren kamen je vor und nach dem Wärmetauscher/-speicher zur Bestimmung von dessen Effektivität zum Einsatz (T_{YR}-Vor-WT, T_R-Rück-WT) sowie einer nach der Umwälzpumpe (T_R-Rück-P) zur Erfassung der Leitungswärmeverluste.

Um den Durchfluss des aufgewärmten Trägermediums (Wasser) bestimmen zu können, wurden drei **Durchflusssensoren** verwendet, welche an den drei Rückläufen im Gebäudeinnern vor den manuellen Kugelhähnen eingebaut waren. Die magnetisch-induktiven Sensoren funktionieren nach dem Faraday’schen Induktionsgesetz. Der bewegte Leiter ist in diesem Fall das Wasser selber.

Um die Energie ermitteln zu können, die ein Kollektor aufnimmt, muss zuerst die Menge der gesamten zur Verfügung stehenden Energie bekannt sein. Hierfür wurde ein Pyranometer CM11 und ein Strahlungssensor Radiostat 2 eingesetzt.

Das **Pyranometer** CM 11 der Fa. Kipp&Zonen (Delft, Niederlande) wurde zum Messen der direkten Sonneneinstrahlung (Global- und Diffusstrahlung) bei Wellenlängen in einem Bereich von 305 bis 2800 nm benutzt. Der Messbereich erstreckt sich von 0 bis 1400 W/m² (max. 4000 W/m²). Das Pyranometer entspricht dabei der ISO-Klassifikation „Secondary standard" nach WMO und ISO 9060.

Der integrierte thermische Detektor des Pyranometers ist aufgrund seines Funktionsprinzips nicht selektiv gegenüber dem gemessenen Spektrum, wodurch er anfällig auf diffuse infrarote Strahlung ist. Da das Pyranometer sehr empfindlich auf äußere Einflüsse ist, müssen diese so gut wie möglich vom Pyranometer getrennt werden. So darf beim Aufstellen des Pyranometers kein Schatten auf das Pyranometer fallen (etwa von Antennen oder Schornsteinen). Weiterhin können heiße Luft oder Gase die Messungen beeinflussen. Das Pyranometer ist in dementsprechendem Abstand von Wänden und Boden aufzustellen [48].

Für die Messung der diffusen Strahlung wird das Pyranometer zusätzlich mit einem Strahlungsschirm CM121 ausgerüstet, welcher die direkte Einstrahlung abfängt. Abgesehen von der Aufstellung (nach unten an einem gammaförmigen Mast) ist die Funktionsweise identisch, wie beim Messen der globalen Einstrahlung.

Der **Radiostat 2** der Fa. Krieger (Heilbronn) wurde als Strahlungssensor eingesetzt. Dafür muss das Gerät vor einer Fassade zur Erfassung der Intensität der Sonnenstrahlung, die auf die Gebäudefassade einwirkt, montiert werden. Zur Bestimmung der Sonnenstrahlung wird die Temperaturdifferenz zwischen zwei Sensoren, einem in Kontakt mit der schwarzen Gerätefrontseite und einem innerhalb eines vertikalen Lüftungskamins auf der Geräterückseite verglichen. Prinzipiell wird so die einfallende Globalstrahlung auf die schwarze vertikale Sensorfläche gemessen. Mit dem Sensor kann bei geeigneter Montage neben der Einstrahlung auch die nächtliche Abstrahlung eines Gebäudes registriert werden.

Die Bestimmung der Windgeschwindigkeit am Kollektor erfolgte durch einen **Windmesser (Anemometer)** Typ 14575 der Fa. Lambrecht (Göttingen). Dabei ist die Achse des Schalensternes mit einer Reflexionsschranke versehen. Die Rotation dieser Schranke wird von einer Infrarotdiode gemessen und von einem Messumformer zu einem Ausgangssignal umgewandelt. Um ein Vereisen der Reflexionsscheibe im Winter zu vermeiden, was die Messung der Windgeschwindigkeit stören würde, ist der Windsensor zusätzlich mit einer elektronisch geregelten Heizung ausgestattet.

5.2 Hochtemperaturkollektoranlage

5.2.1 Technikumprüfstand

Für die Entwicklung von paraboloiden Kollektoren für den Hochtemperaturbereich wurde zunächst ein Versuchsprüfstand im Technikum aufgebaut. Im Gegensatz dazu ist eine Zuordnung der Kollektorwirkungsgrade bei Freilandtests unter Einwirkung von Wind anderen Verlustfaktoren zum Beispiel bei Bewölkung aufgrund der erheblichen Verzögerung durch die Wärmekapazitäten im System lediglich bei kontinuierlicher Messdatenerfassung möglich. Zu beachten ist bei dem aufgebauten Prüfsystem, dass die eingesetzten Strahler als künstliche

Sonne im Gegensatz zur Sonne keine Parallelstrahlung sowie ein nicht so ausgeprägtes Wellenlängenspektrum aufweisen.
Der Prüfstand bestand aus einer Zulaufpumpe zur Förderung des Wärmeträgers (Wasser), sechs in Reihe geschalteten Lichtstrahler SOL 2000 (Fa. Hönle, Gräfelfing) als künstliche Sonne [49], zwei Temperatursensoren 9007-FS (Fa. Ahlborn, Holzkirchen), einem Pyranometer CM11 (Fa. Kipp&Zonen, Delft (NL), s. Kap. 5.1.2), einem ALMEMO®-Messgerät 2590-9 (Fa. Ahlborn, Holzkirchen) sowie dem zu prüfenden Kollektor. Für die Windsimulation wurde ein Ventilator eingesetzt. Der schematische Aufbau des Messstandes ohne Sensoren und Förderpumpe ist in der Abbildung 21 schematisch dargestellt.

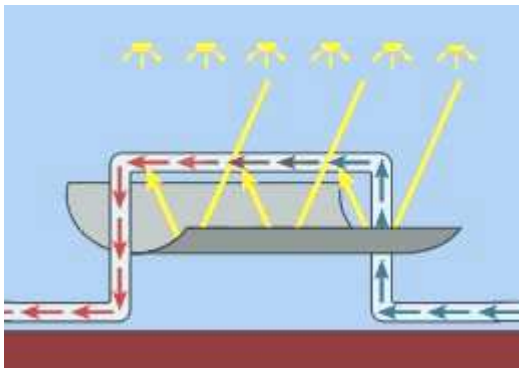

Abb 21: Schematischer Aufbau des Kollektorprüfstandes für den Hochtemperaturbereich

Wie die Abbildung 21 zeigt, durchströmt ein Wärmeträger (Wasser) den Kollektor mit einer Volumenstrom von 2 Liter pro Stunde. Während dessen bestrahlen sechs Lampen den Kollektor mit einer Strahlerleistung von je 150 Watt auf einer Länge von einem Meter. Zur Bestimmung der Kollektorwirkungsgrades wird die Wassertemperatur im Vor- und Rücklauf sowie die Lichtstrahlung (Strahlungsenergie) bestimmt.

Der Aufbau und Einsatz des Versuchsstandes mit künstlicher Sonne erforderte zunächst die Vermessung und Eichung der Lichtleistung des Prüfstandes mit dem Pyranometer. Die Prüfung des Versuchsstandes erfolgte unter Ausschluss des Kollektors und unter Variation der Pyranometerposition unter den sechs Strahlungsquellen (Lampen). Folgende Pyranometerpositionen wurden dabei gewählt (Abb. 22):

- Variation des vertikalen Abstands zu den Strahlern (a),
- Variation der Position direkt (mittig) unter einem Strahler (b) und zwischen zwei benachbarten Strahlern (c),
- sowie Variation des horizontalen Abstandes zur Strahlermitte (d).

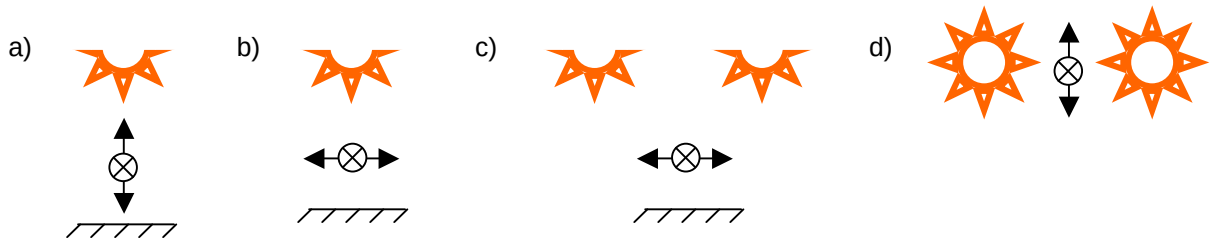

Abb. 22: Variation der Pyranometerposition (⊗)

5.2.2 Prüfstand für Feldversuche

Für die Feldversuche mit den entwickelten Parabolrinnenkollektoren wurde ein einfacher und effektiver Prüfstand aufgebaut. Die Abbildung 23 gibt den Prüfstand wieder.

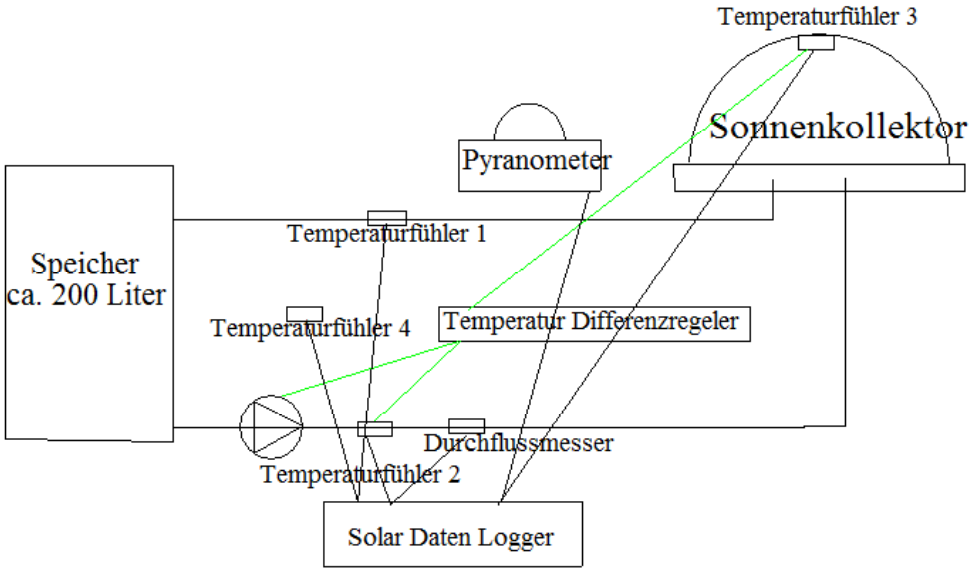

Abb. 23: Fließbild der HT-Kollektoranlage

Der Prüfstand in der Abbildung 23 besteht aus einem wärmegedämmten Speicher mit einem Inhalt von 200 Liter, einem Pyranometer Typ CM11 (Fa. Kipp&Zonen, Delft (NL,), vier Temperatursensoren (Fa. Heraeus Sensor Technology, Kleinostheim, Typ PT1000), einer Umwälzpumpe, einem Datenlogger (Fa. Wapo Electronik, Berlin) zur Aufnahme der Messergebnisse sowie dem Kollektor selbst. Wie in der Abbildung 23 zu sehen ist, durchströmt der Wärmeträger (Wasser) den paraboloiden Kollektor (im Schaubild als Halbkugel dargestellt) mit einem Durchfluss von 240 l/h. Während den Versuchen werden die Temperaturen im Vor- und Rücklauf, der Umgebung sowie optional im Kollektor aufgenommen. Darüber hinaus wird kontinuierlich die Globalstrahlung aufgenommen.

5.3 Bestimmung des Wirkungsgrades

Die Bestimmung des Wirkungsgrades wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN 12975 [46, 50], welche die Voraussetzungen für die Messung des Wirkungsgrads eines Sonnenkollektors setzt. Es ist anzumerken, dass die genannte Norm nur für die Beurteilung von flachen Kollektoren ausarbeitet wurde. Sie bildet jedoch eine gute Grundlage für die Bestimmung der Wirkungsgrade von dreidimensionalen Kollektoren.

Unter dem Wirkungsgrad eines Systems versteht man im Allgemeinen das Verhältnis einer Energiemenge, die einem geschlossenen System zugeführt wird, zu jener Energiemenge, die das System als eine nutzbare Energieform abgibt. Der Wirkungsgrad η für Sonnenkollektoren kann als Quotient der Nutzleistung zur einfallenden Strahlung (entspricht der Aperturfläche multipliziert mit der Globalstrahlung) definiert werden (Gl. 5.1).

$$\eta(A_e) = \frac{\dot{Q}_n}{A_P \cdot E_g} = \frac{\dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{Rück} - T_{Vor})}{A_P \cdot E_g} \qquad \text{(Gl. 5.1)}$$

mit: $\dot{Q}_n$: Nutzleistung bzw. Wärmemenge [W], A_P: Aperturfläche [m²], E_g: Globalstrahlung [W/m²], $\dot{V}$: Volumenstrom [m³/s], ρ: Dichte [kg/m³], c_p: spezifische Wärmekapazität [J/kg·K], $T_{Rück}$: Rücklauftemperatur [K], T_{Vor}: Vorlauftemperatur [K].

Die Berechnung des Wirkungsgrades ist definitionsgemäß wesentlich von der Bezugsfläche (Abb. 7) abhängig. Ist die Bezugsfläche nicht die Aperturfläche sondern die Absorberfläche oder die Bruttofläche so sind folgende Umrechnungsformeln anzuwenden, in denen die jeweiligen Bezugsfläche in Klammern angegeben sind:

$$\eta(A_A) = \frac{A_P}{A_A} \cdot \eta(A_P) \qquad \text{(Gl. 5.2)} \qquad \eta(A_B) = \frac{A_P}{A_B} \cdot \eta(A_P) \qquad \text{(Gl. 5.3)}$$

mit: A_P: Aperturfläche [m²], A_A: Absorberfläche [m²], A_B: Bruttofläche [m²].

Aus den Gleichungen wird deutlich, dass der Wirkungsgrad eine Funktion mehrerer Eingangsgrößen ist. Daher kann der Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors nicht einfach durch eine Zahl festgelegt sein, sondern muss vielmehr als eine Wirkungsgradcharakteristik mit verschiedenen Randbedingungen in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur angegeben werden. Die Wirkungsgradcharakteristik ist im gesamten Betriebstemperaturbereich zu bestimmen.

Für eine zuverlässige Bestimmung des Wirkungsgrades ist ein stationärer Zustand der Kollektoranlage notwendig. Die Messperiode für einen stationären Messpunkt setzt sich zusammen aus einer Konditionierungsphase und der eigentlichen Messphase. Die Konditionierungsphase dient zum Erreichen des stationären Zustandes am Kollektor. Voruntersuchungen zeigten, dass die Dauer der Konditionierungsphase bedingt durch die Umlaufgeschwindigkeit des Wassers durch den Kollektor mindestens 15 Minuten betragen muss [33]. Ferner ist mindestens die fünffache Zeitkonstante des Kollektors einzuhalten, um den Wärmeträger bedingt durch die Umwälzpumpenleistung aus dem Kollektor wegzutransportieren (Einschwingzeit) und das Erreichen des stationären Zustandes anhand der Stabilität der Austrittstemperatur zu überprüfen. Die Messphase schließt sich direkt an die Konditionierungsphase an und muss auch mindestens 15 Minuten andauern. Die Messdaten der Messphase bilden den eigentlichen Datensatz für einen stationären Messpunkt.

Der Betrieb des Kollektors kann während der Messphase als stationär angesehen werden, wenn die maximale Abweichung der genannten Größen die zulässigen Abweichungen aus der Tabelle 1 für die gesamte Messperiode eingehalten werden. Der stationäre Messpunkt ergibt sich dann aus den für die Messphase berechneten Mittelwerten der Messgrößen.

Messgröße	**Zulässige Abweichung von 30 s Mittelwerten vom Mittelwert der gesamten Messperiode**
Bestrahlungsstärke	± 50 W/m²
Umgebungstemperatur	± 1 K
Massenstrom	± 1 %
Eintrittstemperatur	± 0,1 K

Tab. 1: Zulässige Abweichungen der Messgrößen vom Mittelwert [43]

6. Entwicklung von Niedertemperaturkollektoren

6.1 Ermittlung der idealen Bauform

Der Ausgangspunkt für die Entwicklung der Niedertemperatur-Kollektoren im Rahmen der Arbeit resultiert aus einer gewissen „Untauglichkeit“ herkömmlicher Flachkollektoren. Die in Kapitel 2 beschriebene Bauweise von konventionellen Flachkollektoren macht sie schadensanfällig (z.B. Glasbruch, Dichtungsprobleme) und setzt sie Witterungsverhältnissen aus, die sie aufgrund der guten Anhaftung von Staub- und/oder Rußpartikel auf Glas sehr wartungsintensiv und kurzlebig werden lassen. Dazu kommt die Größe und Form dieser Kollektoren, welche sie extrem unästhetisch bei Flachdächern erscheinen lassen und gleichzeitig den Transport und die Installation erschweren. Ausgehend von diesen Kollektoreigenschaften kam von einem Hotelinhaber in Griechenland im Jahre 1978 die Anfrage nach einer ästhetischen und effektiveren Alternative.

Der erste Ansatzpunkt für die Entwicklung der Sonnenkollektoren war deren physikalische Bauform. Erste Gedanken beinhalteten pyramiden- und kegelförmige Kollektoren. Beide Formen erwiesen sich jedoch als nachteilig, sobald die Sonne in ihrem Zenit steht. Nach einer mehrwöchigen Planungs- und Entwicklungsphase stellte sich heraus, dass die Halbkugel als einzige Form für die Entwicklung einer neuen Generation von Sonnenkollektoren in Frage kommt. Halbkugelkollektoren ermöglichen die größtmögliche Absorptionsfläche bei minimaler Bodenfläche sowie durch die aerodynamische Form den niedrigsten Geräuschpegel bei Wind bzw. Sturm bei einfachster Herstellungstechnologie. Ausgehend von dieser Form wurde ein Kollektor entwickelt, welcher in Abbildung 24 schematisch dargestellt ist.

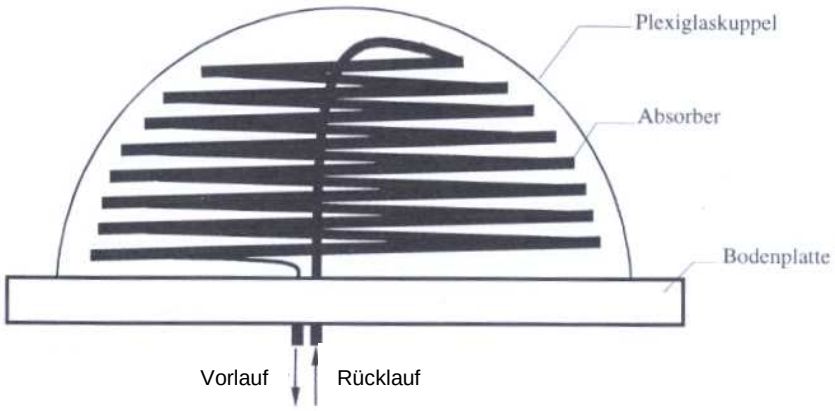

Abb. 24: Seitenansicht eines halbkugelförmigen Sonnenkollektors

Der halbkugelförmige Kollektor besteht aus einer Bodenplatte, über die Bodenplatte ist eine transparente Abdeckung (Kuppel) gestülpt. Der Absorber befindet sich unter dieser Kuppel und besteht aus einem spiralförmig aufgewickelten Rohr oder Schlauch, mit nach oben enger werdendem Radius. Aufgrund der hohen Absorberoberfläche kann somit eine größtmögliche Projektionsfläche für die Erwärmung des durchströmenden Wärmeträgers genutzt werden. Die Enden des Absorbers durchstoßen die Bodenplatte und bilden hier die Anschlüsse für den Vor- und Rücklauf des Wärmeträgermediums.

Die Form der Halbkugelkollektoren birgt gegenüber den konventionellen Flachkollektoren mehrere, in erster Linie funktionelle Vorteile, wie die Dauer der Sonneinstrahlung. Flachkollektoren müssen, in Abhängigkeit vom Breitengrad, in dem sie eingesetzt werden, nach Süd-Südwest ausgerichtet werden. Dadurch werden sie am Intensivsten bestrahlt, wenn die

Sonne von ca. 11 bis 16 Uhr im Zenit steht. Zuvor und anschließend nimmt jedoch die bestrahlte Fläche aufgrund der seitlichen Einstrahlung schnell wieder ab (Abb. 25).

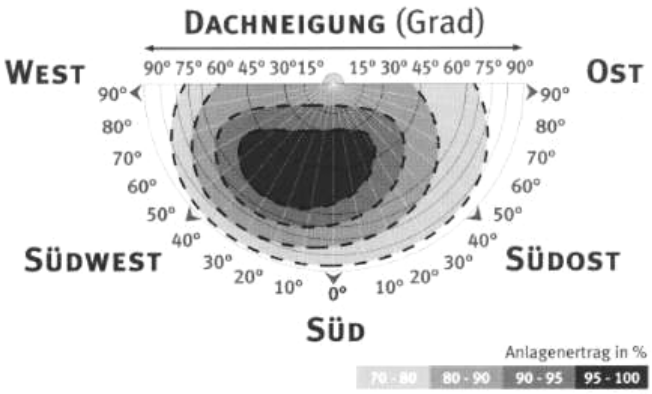

Abb. 25: Einfluss von Neigung und Ausrichtung auf den Ertrag eines Flachkollektors [21]

Halbkugelförmige Kollektoren brauchen dagegen nicht ausgerichtet werden und können unabhängig von ihrem Einsatzort vom Sonnenaufgang bis zu dessen Untergang die Sonnenenergie aufnehmen. Das gilt auch für die Unterschiede der Sonnenhöhe aus der Ekliptik im Laufe des Jahres. So kann ein halbkugelförmiger Kollektor aufgrund seiner Form permanent eine zu den Sonnenstrahlen senkrecht stehende Fläche aufweisen und somit mehr Energie absorbieren, als ein seitlich zur Sonne gewandter Flachkollektor. Diese Eigenschaft ermöglicht u.a. die optimale Nutzung der Sonnenenergie auf fahrende Medien.

Die folgende Abbildung 26 verdeutlicht die Wirkfläche der Sonneneinstrahlung bei halbkugelförmigen Kollektoren und Flachkollektoren.

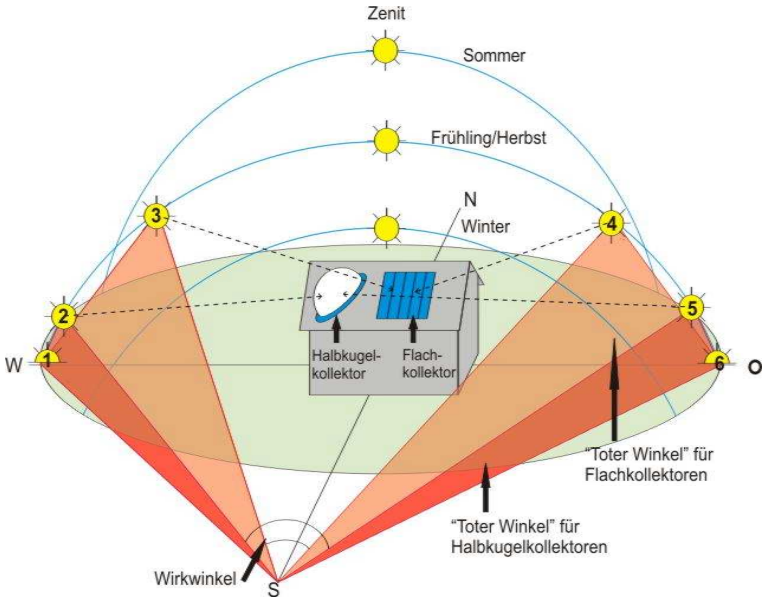

Abb. 26: Wirkfläche der Sonneneinstrahlung bei Halbkugel- und Flachkollektoren

In der Abbildung 26 ist die Wirkfläche der Sonneneinstrahlung bei Flachkollektoren durch die Punkte 3 bis 4 und die bei Halbkugelkollektoren durch die Punkte 2 bis 5 wiedergegeben. Die rote Flächen (Punkte 1 bis 2 und 5 bis 6) kennzeichnen die dazugehörigen „toten Winkel“, d.h. bei welcher Sonnenposition die Kollektoren kein Licht einfangen können. Aus der Abbildung 26 ist deutlich zu erkennen, dass Halbkugelkollektoren einen weitaus größeren Wirkwinkel

besitzen. Wenn man sich nun vor Augen führt, dass Heliostaten den Wirkungsgrad der Flachkollektoren durch deren Drehung in Richtung Sonne um ca. 40 % erhöhen können, kann man daraus schließen, dass die Heliostatenfunktion durch die dritte Dimension der Halbkugelkollektoren übernommen wird.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Halbkugelkollektoren ist die Nutzung der dritten Dimension zur Absorption der direkten, aber auch diffusen Strahlung. Dadurch steht den Kollektoren zur Absorption der Globalstrahlung eine etwa 60% größere Absorberoberfläche zur Verfügung. Die folgende Gleichung 6.1 soll dies verdeutlichen: Wenn der Durchmesser der Halbkugel gleich der Seitenlänge eines quadratischen Flachkollektors ist, ergeben sich folgende Absorberfläche zur Aufnahme der Globalstrahlung [51]: $A_{Halbkugel} = 2 \cdot \pi \cdot r^2$, $A_{Quadrat} = 4 \cdot r^2$ (Gl. 6.1)

Eine gewünschte Konvektion unterhalb der Kuppeln sorgt zudem dafür, dass die aufgewickelten Rohre bzw. Schläuche rundherum aufgeheizt werden.

Darüber hinaus führt die Halbkugelform im Vergleich zu Flachkollektoren zu einer Fokusierung der Sonnenstrahlung durch die linsen- und prismaförmige Form der Abdeckung und Bildung einer Brennzone auf dem Absorber. Der größere Neigungswinkel vom Zenit ausgehend bei Regen führt des Weiterem zu einem besseren Abwaschen von Staub oder Hinabrutschen von geschmolzenem Schnee.

Zu guter letzt ist die Halbkugelkonstruktion wesentlich robuster bzw. mechanisch stabiler, beispielsweise gegen Wind- und Hagelstürme. Wie wichtig dieses Merkmal ist, bewies eine Anlage in der Karibik: Im Dezember 2005 walteten dort Stürme mit Windgeschwindigkeiten von über 220 km/h ohne die Halbkugelkollektoren zu beschädigen..

Die Definition der optimalen Form für einen Sonnenkollektor reicht jedoch alleine nicht aus, um einen effektiven Kollektor zu entwickeln. Vielmehr war es notwendig, jedes einzelne Kollektorelement, sowie die Passgenauigkeit beim Zusammenbau zu entwickeln, zu erproben und - auch mit Hilfe einer Computersimulation - zu optimieren. In den folgenden Kapiteln soll detailliert auf die Entwicklung und Auswahl des Rohrabsorbers und weiteren Kollektorelementen (Kap. 6.2) sowie einer transparenten Abdeckung (Kap. 6.3) eingegangen werden.

6.2 Entwicklung und Auswahl von Absorbermaterialien und weiterer Kollektorelemente

Ein wesentlicher Schwerpunkt bei der Entwicklung der Halbkugelkollektoren lag auf den Untersuchungen zur Auswahl des geeignetsten Absorbermaterials und den Aufbau des Gesamtkollektorsystems, welches einfach und schnell installierbar sein sollte.

Wie im Kapitel 5.1.1.1 beschrieben, konnten mit dem aufgebauten Prüfstand gleichzeitig sechs Kollektoren getestet werden, wobei je zwei baugleiche Kollektoren in Serie geschalteten waren. Die drei Kollektorpaare unterschieden sich jeweils nur durch die unterschiedlichen Absorbermaterialien. Zunächst konzentrierten sich die Untersuchungen auf die folgenden Materialien:

- Kupferrohr
- Kunststoffrohr, gerippt
- Dreischichtrohr

Das **Kupferrohr**, wie es bei Haushaltinstallationen häufig zum Einsatz kommt, war innen glatt und außen schwarz lackiert (keine Legierung oder selektive Beschichtung). Für den Einsatz des

Kupferrohres musste zunächst eine automatische Wickelmaschine entwickelt werden. Bei dem innen wie auch außen **gerippten Kunststoffrohr** handelte es sich um ein Leitungsrohr für Elektrokabel und sollte durch die Struktur zu einer besseren Verwirbelung des Wärmeträgermediums führen. Darüber hinaus war das Rohr gegenüber Kupferrohre preiswerter, teilweise elastischer, zeigte ein besseres Wickelverhalten und bot durch seine gerippte Form eine größere Oberfläche. Das **Dreischichtrohr** war aus Kunststoff (PE) und Aluminium gefertigt. Die äußere Schicht bestand aus einem schwarzen Kunststoff, die mittlere aus Aluminium und die innere Schicht wiederum aus schwarzem Kunststoff.

In den nachstehenden Abbildungen 27 und 28 sind ein geripptes Kunststoffrohr und Dreischichtrohr als auch die geometrischen Abmessungen im Querschnitt dargestellt. Die Länge der Rohre betrug stets 25 Meter.

Abb. 27: Eingesetzte Rohrabsorber: Geripptes Kunststoffrohr (l.), Dreischichtrohr (r.)

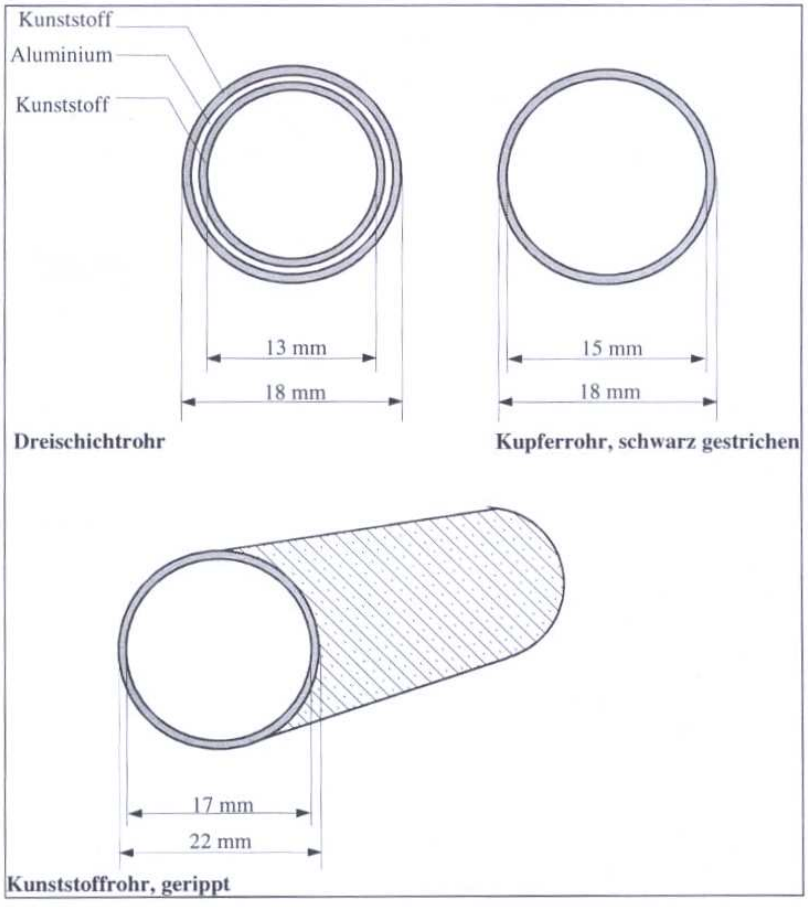

Abb. 28: Geometrische Abmessungen der Rohrabsorber

Die beschriebenen Absorberrohre wurden durch eine entwickelte Wickelvorrichtung sphärisch aufgewickelt, auf eine wärmegedämmte Grundplatte montiert und angeschlossen. Die Durchströmung des Absorbers erfolgte von der Grundplatte in Richtung der Kollektorkuppe. In Abbildung 29 sind die Maße eines halbkugelförmigen Kollektors (mit Abdeckung) dargestellt, für die Untersuchungen der Absorbermaterialien wurde, im Gegensatz zur Abbildung 29, keine Kollektorabdeckung eingesetzt. Die Abbildung 30 zeigt einen Kollektor mit sphärisch aufgerolltem Rohrabsorber. Die Rohrlänge betrug 25 m. Darüber hinaus sind in der Abbildung 31 die Bezugsflächen des halbkugelförmigen Kollektors aufgeführt.

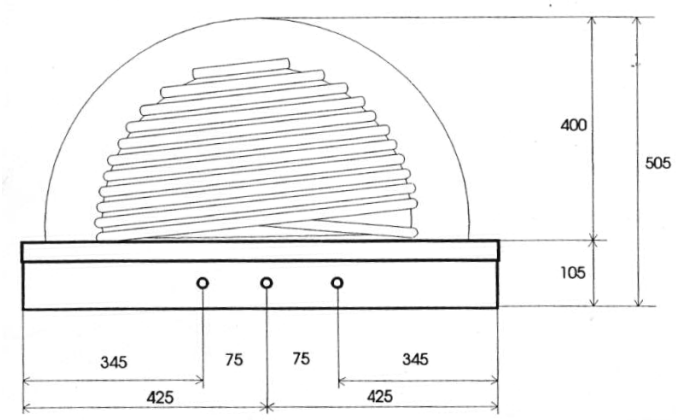

Abb. 29: Seitenansicht und Maße eines halbkugelförmigen Kollektors

Abb. 30: Kollektor mit druckbeständigem Rohrabsorber

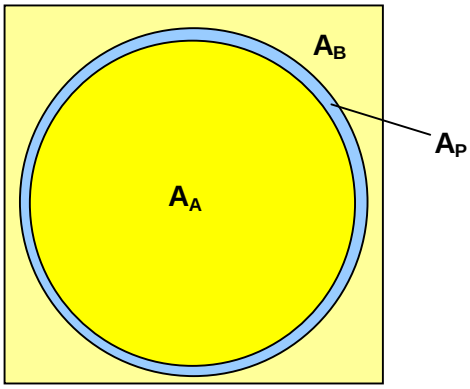

Abb. 31: Bezugsflächen eines halbkugelförmigen Kollektors in der Draufsicht (A_B=Bruttofläche, A_P=Aperturfläche, A_A=Absorberfläche)

Die Untersuchungen der Absorber zeigten bei einer mittleren Einstrahlung (Globalstrahlung) von 800 W/m² (T_{Luft}=28 ℃) den höchsten Wirkungsgrad beim Kupferrohr, gefolgt vom Dreischichtrohr und dem gerippten Kunststoffrohr. Die Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

	Wirkungsgrad		
Vorlauftemperatur	**Kupferrohr**	**Kunststoffrohr**	**Dreischichtrohr**
30,1 ℃	42,3 %	36,5 %	40,2 %
33,1 ℃	40,7 %	36,5 %	39,8 %
36,4 ℃	37,8 %	34,2 %	37,3 %
40,4 ℃	33,3 %	30,1 %	33,2 %

Tab. 2: Wirkungsgrade bei verschiedenen Vorlauftemperaturen

In der Abbildung 32 ist die dazugehörige Wirkungsgradcharakteristik der einzelnen Rohrabsorber über die Vorlauftemperatur aufgetragen. Die Berechnungsgrundlage ist im Kapitel 5.3 wiedergegeben.

Die Abbildung 32, aber auch die Tabelle 2 zeigen deutlich, dass die jeweiligen Wirkungsgrade mit ansteigender Vorlauftemperatur sinken. Dies beruht auf der Erhöhung der Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung mit steigender Temperatur.

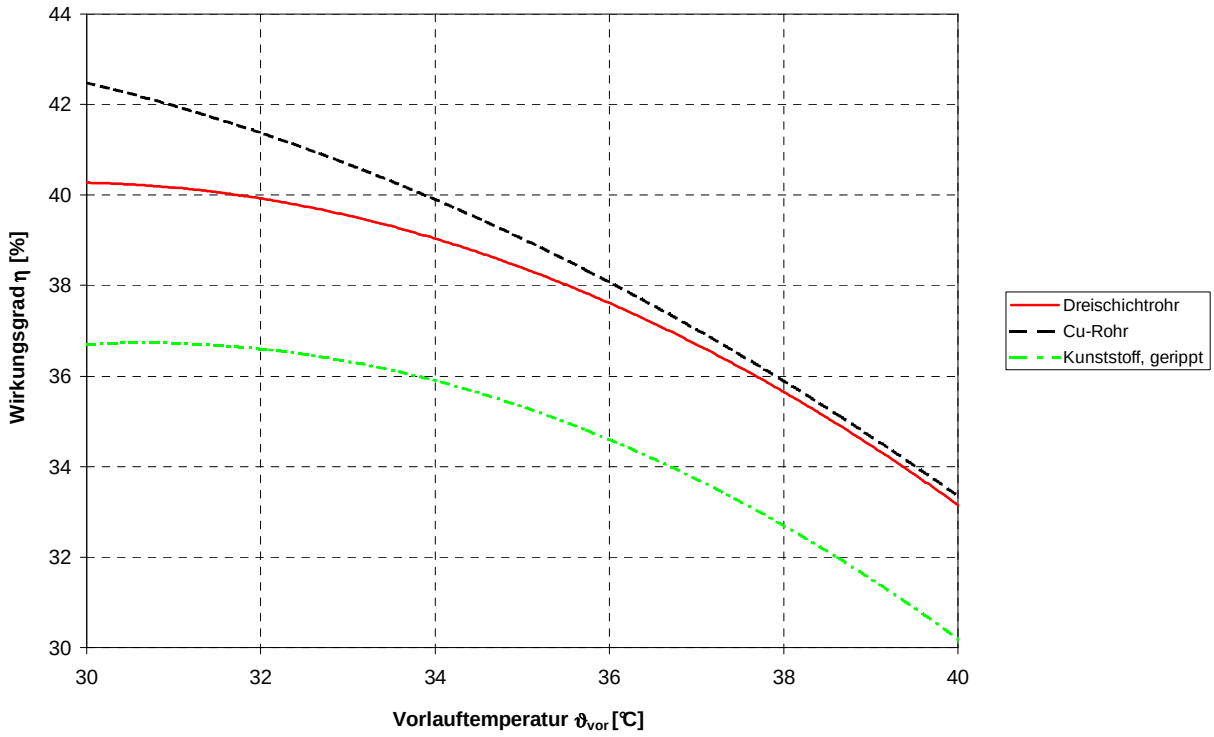

Abb. 32: Wirkungsgradcharakteristik in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur für verschiedene Rohrabsorbermaterialien

Im Anschluss an die Absorberuntersuchungen mit Halbkugelkollektoren (HK) wurden herkömmliche Flachkollektoren (FK) mit dem gleichen Absorbermaterial bei gleicher Absorberprojektionsfläche (2 m²) bestückt und die Wirkungsgradcharakteristiken miteinander verglichen. Für diese Versuche wurde jeweils alle halbkugelförmigen Kollektoren mit einer transparenten Wärmedämmung bestückt. Die Rohroberfläche, welche mit der Absorberfläche gleichgestellt werden kann, betrug bedingt durch die unterschiedlichen Rohrdurchmesser (Abb. 28) für das Dreischichtrohr und Kupferrohr 1,4 m² und für das gerippte Kunststoffrohr 1,7 m² und ging in die Berechnung der Wirkungsgrade ein. Die Abbildung 33 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung. Die Globalstrahlung lag bei 500 W/m².

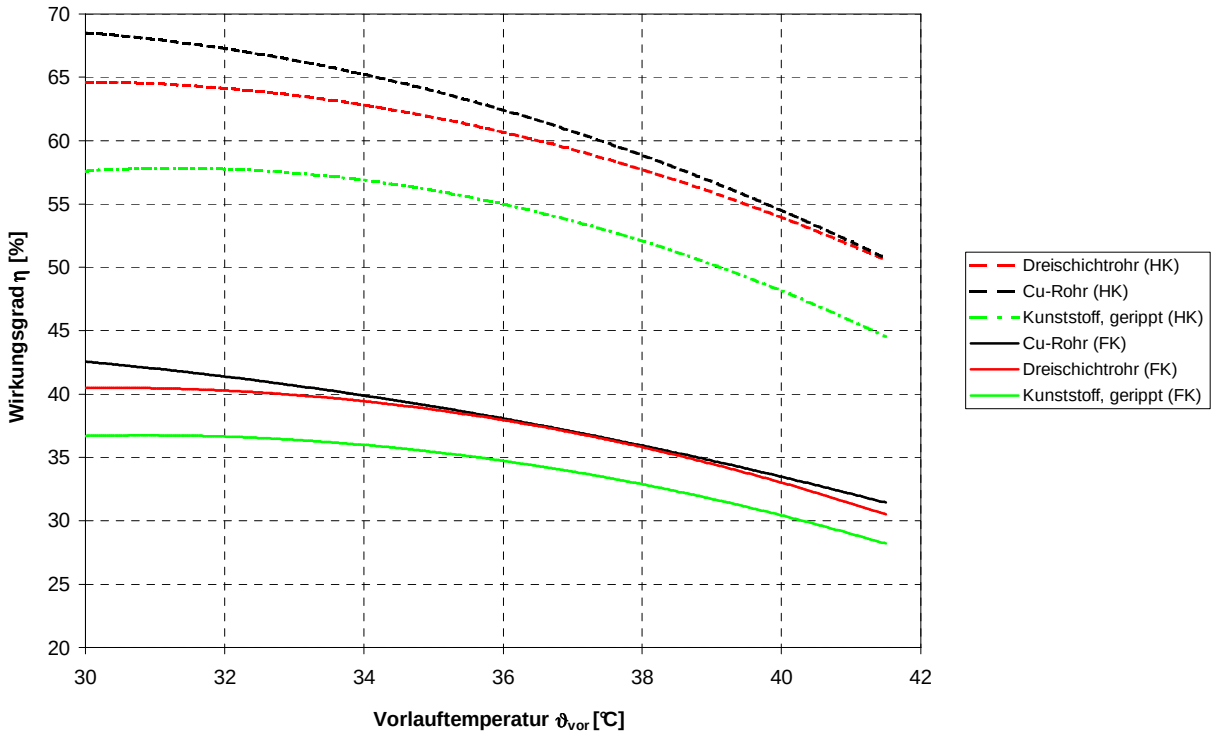

Abb. 33: Wirkungsgradcharakteristik in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur von Halbkugel (HK)- und Flachkollektoren (FK) bei gleicher Bodenfläche

Die Abbildung 33 bestätigt zunächst, dass mit dem Kupferrohr im Vergleich zu den beiden Kunststoffrohren die höchsten Wirkungsgrad erreicht werden konnten. Darüber hinaus zeigt die Abbildung 33, im Vergleich zu Abbildung 32, dass durch den Einsatz einer transparenten Wärmedämmung der Wirkungsgrad erheblich verbessert werden kann. Die Abbildung 33 zeigt weiterhin, dass ein Halbkugelkollektor aufgrund seiner 3-dimensionalen Form prinzipiell einen bis zu 20 % höheren Wirkungsgrad hat als ein Flachkollektor. Damit wird deutlich, dass die Auswahl der Kollektorform zu einer bedeutenden Wirkungsgradverbesserung bezogen auf die Grundfläche führt.

Unabhängig vom Wirkungsgrad waren die Absorber auch hinsichtlich ihrer Langlebigkeit auszulegen. Hier bot das Kupferrohr wie auch das gerippte Kunststoffrohr dauerhaft keine Lösung [52]. Auf der einen Seite ist das Kupferrohr, wie die meisten metallischen Rohrleitungen, anfällig gegenüber korrosiven Salzionen, Kalkverbindungen sowie Reinigungschemikalien, welche beispielsweise in der Schwimmbadtechnik auftreten sowie gegen größere Wasserdrücke. Dies machte sich besonders im Verlauf von Langzeitversuchen bemerkbar, bei denen es zu undichten und/oder reißenden Rohrleitungen kam. Darüber hinaus ließen sich die Kupferrohre nur unter großem Aufwand in die benötigte (aufgerollte) Form bringen, wodurch sich ihre Lebensdauer reduzierte. Auf der anderen Seite waren die gerippten Kunststoffrohre nicht für einen Dauerbetrieb geeignet, da sie weder UV- noch druckbeständig sind. Eine grundlegende Erkenntnis konnte aus den Untersuchungen gewonnen werden: Kupferrohre mussten abgelöst werden und unterschiedlich geschichtete Kunststoffrohre bieten die beste Alternative.

Ausgehend von diesem Standpunkt wurde die Entwicklung von mehrschichtigen Rohrabsorber verstärkt. Diese Absorber sollten eine hohe Elastizität, Dehnfähigkeit, Druck-, Temperatur- und UV-Beständigkeit sowie eine ablagerungsabweisende Innenbeschichtung aufweisen. Erst durch eine intensive Zusammenarbeit mit der Fa. Dupont in Frankreich konnten neue Rohrmaterialien entwickelt werden, welche diese Anforderungen erfüllen. Es handelt sich um eine Reihe von Hochdruckschläuchen aus Kunststoffen, die ursprünglich für die Ölindustrie bestimmt waren. Die Schläuche waren für die Verwendung in Außenarealen konzipiert und erfüllten somit die wichtigsten Anforderungen. Darüber hinaus waren sie aufgrund eines eingebauten Fasernetzes beständig gegen Drücke von bis zu 40 bar. In der Abbildung 34 sind zwei mehrschichtige Kunststoff-Hochdruckschläuche neben einem zu Entwicklungsbeginn eingesetzten gerippten Kunststoffrohr und schwarz beschichteten Kupferrohr abgebildet. Durch die Variation der Schichtmaterialien ließ sich der Absorptionsgrad des Mehrschichtabsorberschlauches optimieren. Weiterhin ist in der Abbildung 35 der Querschnitt eines Hochdruckschlauches, bestehend aus einer durchsichtigen Außenschicht, welche die Funktion einer transparenten Wärmedämmung hat, einem Fasernetz und einer schwarzen (Absorber)Innenschicht abgebildet. Verglichen mit dem untersuchten gerippten Kunststoffrohr lag der Wirkungsgrad der mehrschichtigen Schläuche um ca. 25 % höher.

Abb. 34: Eingesetzte Absorbermaterialien (von l.: Geripptes Kunststoffrohr, Kupferrohr, mehrschichtige Schläuche)

Abb. 35: Mehrschicht-schlauch (Querschnitt)

Parallel zu den Untersuchungen bezüglich der Absorberrohre bzw. -schläuche wurden neue Konzepte für die Herstellung anderer Kollektorkomponenten wie diverse Anschlüsse und Verbindungen (Abb. 36) sowie eines Kollektorrahmens entwickelt. Hierbei konnten die für den Rahmen ursprünglich eingesetzten Kunststoffteile und -platten mit Styropordämmung durch einen lasergeschnittenen, zusammensetzbaren Edelstahlrahmen ersetzt werden (Abb. 37).

Abb. 36: Entwickelte Kollektorkomponenten und Anschlüsse

Abb. 37: Lasergeschnittener Edelstahlrahmen zum Aufbau eines Halbkugelkollektors

Wie aus Abbildung 37 ersichtlich ist, ermöglichen vorgeschnittene Steckplätze auf dem Edelstahlkollektorboden einen schnellen, sehr leichten und maßgeschneiderten Zusammenbau des Rahmens für die anschließende Aufbringung der Rohr-/Schlauchabsorber. Die einfache Demontage des Rahmens führt zu einem minimalen Transportplatzbedarf und damit zu einer merklichen Reduzierung der Transportkosten. Im Gegensatz zu den ersten Rahmen aus Kunststoff ist der Edelstahlrahmen darüber hinaus hitzeresistent. Dies ist vor allem in Sommermonaten in warmen Regionen von entscheidender Bedeutung, um das Nachgeben der Gesamtkonstruktion unter der Einwirkung der Hitze und dem Gewicht des Wassers zu verhindern [53]. Die Abbildung 38 zeigt einen bei großer Hitze kollabierten Halbkugel(schlauch)kollektor mit einem Kunststoffunterbau.

Abb. 38: Unter Hitzeeinwirkung kollabierte Schlauchkollektorkonstruktion

Der einfache Zusammenbau des Kollektors ermöglicht auch für schlecht oder nicht ausgebildete Fachkräfte einen schnellen und unproblematischen Aufbau. Konventionelle Kollektoren sind meistens nur monolytisch zu erhalten, bestehen aus einer Menge mehr oder weniger wichtiger Einzelteile und sind schwer und sperrig. Der Halbkugelkollektor hingegen kann in wenigen Einzelteilen geliefert werden und vor Ort ohne viel Zeitaufwand zusammengebaut und installiert werden. Außerdem können große Mengen der Halbkugelkollektoren auf diese Weise auf relativ kleinem Raum gelagert und transportiert werden. Alleine in einen Personenkraftwagen passen bis zu fünf Kollektoren, ein Transporter kann bis zu 30 Kollektoren transportieren. Aufgrund des geringen Platzbedarfes wird auch der Transport mittels Flugzeugen bezahlbar. Dies zeigte die Ausarbeitung eines Angebotes für eine Anfrage aus Brasilien.

6.3 Entwicklung einer transparenten Abdeckung

Die transparente Abdeckung hat die Aufgaben, die solare Strahlen im sichtbaren Bereich (UV-VIS) in den Kollektor einwirken zu lassen sowie die Wärmeverluste durch Konvektion zu reduzieren. Darüber hinaus dürfen Wärmestrahlen (IR), welche der aufgewärmte Absorber emitiert, die Abdeckung nicht passieren. Diese müssen durch die transparente Abdeckung im Idealfall komplett reflektiert werden [41, 54, 55].

Die Suche nach der optimalsten Art und Weise, wie ein Kollektor vor wetterbedingten Umwelteinflüssen zu schützen ist, startete Anfang der 70er Jahre mit der Verbreitung der ersten Sonnenkollektoren. Zum damaligen Zeitpunkt suchte man noch quer über ein weites Spektrum transparente und semitransparente Materialien als Abdeckung direkt über den Absorber. Als problematisch erwies sich meistens die zu geringe Lichtdurchlässigkeit oder die Tatsache, dass das verwendete Material keinen Dämmungseffekt aufwies. Zurückzuführen war dies auf eine nicht mit der heute vergleichbaren Vielfalt an Kunststoffen und darauf, dass sich die Verarbeitung der existierenden Kunststoffe erst im Anfangszustand befand. Die wenigsten Kunststoffe waren UV-resistent und fast alle Abdeckungen, inklusive aus Glas, waren anfällig gegenüber Verschmutzung, Staub und Kratzern.

Zu diesem Zeitpunkt wurden trotz der begrenzten verfügbaren Ressourcen, verschiedene und sehr innovative Fortschritte gemacht. So entstanden beispielsweise die ersten Doppelabdeckungen mit dem Ziel der Dämmung von Flachkollektoren. Aufgrund des großen Gewichtes waren die doppelten Abdeckungen wenig installationsfreundlich. Weiterhin wurde mit den ersten Glasbeschichtungen experimentiert, welche die reflektierenden Eigenschaften des Materials unterdrücken sollten. Dabei ergab sich jedoch der Konflikt, dass reflektionsmindernde Beschichtungen sehr korrosions- und kratzanfällig waren, Schutzlacke wiederum den Transmissionsgrad zu unrentablen Werten verminderten.

Mitte der 70er Jahre stellte die Industrie die ersten Produkte aus Polymethylmethacrylat (PMMA, Plexiglas®) und verwandte Materialien vor. Obwohl es sich um ein revolutionäres Material handelte, gewann seine Verbreitung nur relativ langsam an Boden. Erst die ausgiebige Verwendung in der Raum- und Luftfahrttechnik aufgrund des Gewichtes machte auch andere Branchen auf PMMA aufmerksam.

Die Fa. Okalux (Marktheidenfeld) war eine der ersten Firmen, welche eine transparente Wärmedämmung durch ein kapillarähnliches System zur Reduzierung der freien Konvektion zu produzieren versuchte. Diese Wärmedämmung war aufgrund ihrer steifen und nicht verformbaren Struktur lediglich für ebene Flächen geeignet. Die Fa. BASF (Ludwigshafen)

entwickelte zu Beginn der Kollektorentwicklung Vakuumkugeln, welche ebenfalls nicht eingesetzt werden konnten, da diese in eine vorgefertigte Form eingesetzt werden müssen.

6.3.1 Materialauswahl

Zur Entwicklung einer transparenten Abdeckung der halbkugelförmigen Kollektoren wurden zunächst verschiedene Materialien bzw. Werkstoffe hinsichtlich ihrer Transmission und Alterungsbeständigkeit ermittelt [53, 56]. In der Regel werden für die Abdeckung von Sonnenkollektoren Gläser und Kunststoffe in verschiedenen Ausführungen eingesetzt. Der Vorteil von Gläser liegt in der bewährten Langzeitstabilität in Bezug auf die optischen und mechanischen Eigenschaften [57]. Gegen den Einsatz von Glas sprechen jedoch die hohen Anfertigungskosten (vor allem für nicht plane Formen wie Halbkugeln), das Gewicht und die Bruchgefahr. Parallel dazu werden Kunststoffe teilweise mit Erfolg eingesetzt. Der Vorteil von Kunststoffen ist ihr geringeres Gewicht, das zu insgesamt besser handhabbaren Kollektoren führt. Zudem lassen sich z.B. gewellte Kunststoffabdeckungen bei dachintegrierten Kunststoffen gut mit anderen Dachabdeckungsmaterialien kombinieren. Neben den optischen Eigenschaften sollten bei Kunststoffen stets auch die mechanischen Eigenschaften geprüft werden. Von Bedeutung ist z.B. die Hagelschlagsfestigkeit und die Schneelast.

In der Tabelle 3 sind die ermittelten Materialcharakteristiken wiedergegeben. Die Beurteilung der Alterungsbeständigkeit erfolgte anhand der Abnahme des Transmissionsgrades $\Delta\tau$ für einen Zeitraum von fünf Betriebsjahren:

+	gute Alterungsbeständigkeit	$\Delta\tau \leq 0{,}02$
O	mittlere Alterungsbeständigkeit	$0{,}02 < \Delta\tau \leq 0{,}05$
-	schlechte Alterungsbeständigkeit	$\Delta\tau > 0{,}05$

Abdeckung	**Dicke (mm)**	**Flächenge-wicht (kg/m²)**	**Transmissions-grad τ**	**Alterungs-beständigkeit**
Normalglas, gehärtet	4	10	84 %	+
Eisenfreies Glas, gehärtet	4	10	91 %	+
Eisenfreies Glas, strukturiert, gehärtet	4	10	91 %	+
FEP (Teflon)	0,05	0,12	96 %	+
PVF (Tedlar)	0,1	0,14	90 %	-
ETFE (Hostaflon)	0,13	0,22	94 %	O
Polycarbonat (PC)	4	4,9	80 %	O
PMMA (Plexiglas®)	4	4,8	84 %	O
PMMA-Stegdoppelplatte	16	5,0	77 %	O
PMMA-Stegdreifachplatte	16	5,6	72 %	O

Tab. 3: Untersuchte Abdeckungsmaterialien für Kollektoren [33]

Die Tabelle 3 gibt zu erkennen, dass Fluorpolymere (FEP) die besten Werte hinsichtlich Transmission und Alterungsbeständigkeit aufweist. Bei der Auswahl des geeignetsten Materials konnte FEP jedoch aufgrund der hohen Anschaffungskosten nicht berücksichtigt werden. Der Werkstoff Glas besitzt ähnlich gute Werte wie Teflon. Die Verwendung von Glas war jedoch

nicht angebracht, da die Herstellung der Kuppeln schwierig und kostspielig gewesen wäre, ganz zu schweigen von seinem Gewicht. Aufgrund des relativ guten Transmissionsgrades, der mechanischen Eigenschaften (Bruchfestigkeit, Elastizität), der Temperaturresistenz und Umformbarkeit sowie des Preises wurde für die Abdeckung der Kollektoren PMMA der Fa. Röhm (Darmstadt) ausgewählt und eingesetzt [53].

Die folgenden Tabellen 4 und 5 geben die physikalischen und thermischen Eigenschaften von handelsüblichem PMMA wieder. Die Tabelle 4 bestätigt, dass PMMA aufgrund der hohen Transparenz im UV-VIS-Bereich und nicht vorhandenen Transparenz im IR-Bereich optimal als Sonnenkollektorabdeckung geeignet ist.

	Transmissionsgrad	**Reflexionsgrad**	**Absorptionsgrad**
UV-/UV-VIS-Bereich	92 %	8 %	< 1 %
IR-Bereich > 3 µm	0 %	5 %	95 %
Globalstrahlung	82 %	8 %	10 %

Tab. 4: Physikalische Eigenschaften von PMMA (3 mm) [58]

Wärmeleitfähigkeit λ	0,19 W/mK
Spezifische Wärme c_p	1,47 Ws/gK
Dichte ρ	1,18 - 1,19 g/cm³
Zugfestigkeit (23 °C)	72 - 75 N/mm²
Reißdehnung	4,5 - 6,0 %
E-Modul	3.000 – 3.300 N/mm²
VICAT-Erweichungstemperatur	99 – 102 °C

Tab. 5: Thermische Eigenschaften von PMMA [58]

6.3.2 Entwicklung einer Verfahrenstechnik zur Herstellung sphärischer PMMA-Hauben

Auf Basis der in Kapitel 6.3.1 dargestellten Materialeigenschaften wurde die Entscheidung getroffen, die halbkugelförmigen Kollektoren mit einer transparenten Haube aus PMMA abzudecken.

Zu Beginn der Entwicklungsarbeiten im Jahr 1976 war es aus technischen Gründen noch nicht möglich, PMMA selbst umzuformen, das Umformen durch Fremdunternehmen (Fa. Röhm, Darmstadt) zog eine wesentliche Preissteigerung der einzelnen Kollektoren mit sich. Erst in den letzten Jahren wurde es möglich, das Umformverfahren selbständig durchzuführen. Das PMMA selber wird dabei in Platten gekauft und zuerst auf einer speziell angefertigten Kreissäge in die passende Größe geschnitten. Das Umformen des PMMA kann anschließend durch verschiedene Verfahren durchgeführt werden.

Je nach Anfertigungsverfahren wird PMMA mit „XT“ oder „GS“ bezeichnet [58].

PMMA XT wird nach der Extrusion über eine Reihe von Walzen zu Platten kalandriert und ist daher mit Extrusionsspannungen behaftet. Das Material ist bei langer Sonneneinstrahlung nicht sehr belastbar, da das Material aufgrund der UV-Strahlung mit der Zeit an den Ecken und Kanten ausfranst und brüchig zu werden beginnt. Es eignet sich daher vor allem für

Anwendungen, bei denen diese Eigenschaften nicht gefordert werden, wie etwa für Duschwannen oder Spielzeuge.

PMMA GS wird durch ein wesentlich aufwändigeres Verfahren hergestellt. Das bei hohen Temperaturen (200 bis 250 °C) flüssige Material wird zwischen zwei Glasplatten mit definiertem Abstand gegossen und danach in eine Kühlwanne gehalten. Erst wenn sich das PMMA abgekühlt hat, wird es aus seiner Form entnommen und zugeschnitten. PMMA GS hat daher keine Extrusionsspannungen. Es ist um einiges lichtdurchlässiger (transparenter) als PMMA XT, kann jede beliebige Form annehmen, wobei es jedoch um einiges teurer ist.

Zur dreidimensionalen Formgebung einer PMMA-Platte wurden im Rahmen der Arbeit zwei Umformverfahren entwickelt und eingesetzt. Auf der einen Seite wurde das Material durch „Tiefziehen“ umgeformt, ein Verfahren, welches auch als „Vakuumumformung“ bekannt ist und auf der anderen Seite durch „Blasumformen“.

Das **Tiefziehen** ist ein Verfahren, welches fast ausschließlich für PMMA XT geeignet ist, da es die Faserstruktur des Materials ausnutzt. Die PMMA-Platte wird über einen abgedichteten Abdruck seiner angestrebten Form gelegt. Davor oder während dessen muss das PMMA an die Übergangsgrenze seines festen zum weichen (elastischen) Aggregatzustandes gebracht werden. Daraufhin wird die Luft unter der Platte abgepumpt und die Platte nimmt die gewünschte Form an. Dabei muss die Platte jedoch stets ihre hohe Temperatur halten, um flexibel zu bleiben. Daher wird ein solches Verfahren komplizierter, je größer das Objekt werden soll.

Das Umformen von PMMA GS nach dem **Blasumformverfahren** verläuft auf die genau umgekehrte Weise wie das Tiefziehverfahren bei PMMA XT. Beim Blasumformen wird der Abdruck der Form über die semiflüssige Platte gespannt. Danach wird Druckluft unter die Platte gepumpt und diese gegen die Form gepresst. Derzeit lassen sich mit diesem Verfahren nur Objekte mit Dimensionen bis 3 x 2 Meter wirtschaftlich herstellen. Darüber hinaus werden die benötigten Maschinen sehr groß und wartungsintensiv.

Entwickelt wurde eine eigens konzipierte und gebaute Blasumformmaschine zum Umformen des für die Abdeckung geeignetsten PMMA GS. Um das PMMA aber flexibel (elastisch) zu machen, muss es zuerst erhitzt werden. Herkömmlicher Weise wird hierfür Heißluft verwendet. Heißluft birgt aber das Problem, das diese vollkommen gleichmäßig im Ofen verteilt werden muss, da die gesamte PMMA-Platte die gleiche Temperatur haben muss. Dieses Problem wurde dadurch gelöst, dass mehrere Infrarotstrahler ihre Energie in einen mit Spiegeln ausgekleideten Raum (2,5 m³) ausstrahlen. Der Vorteil dieses Aufbaus ist, dass die Energie nahezu gleichmäßig verteilt wird. Eine Dämmung ist nicht oder nur geringfügig nötig, da die Spiegel an den Wänden nur einen sehr kleinen Teil der Energie aufnehmen. So kann bei einer Betriebstemperatur von ca. 200 °C die Außenwand eines nicht gedämmten Ofens mit einer Spiegeldicke von einem Zentimeter ohne Schutzkleidung mit der Hand berührt werden. Die Wand hat dabei lediglich eine Temperatur von 30 bis 40 °C. Das anfälligste Element gegenüber der IR-Strahlung ist die PMMA-Platte selber, da PMMA in diesem Infrarotbereich einen hohen Absorptionsgrad (Tab. 4) besitzt. Daher ist die PMMA-Platte gegenüber Unregelmäßigkeiten in der Strahlenverteilung innerhalb des Ofens sehr anfällig. Um das Problem zu lösen, muss die Platte im Ofen durchgehend um ihre eigene Achse gedreht werden, damit alle Teile der Platte die gleiche Strahlenmenge absorbieren und sich die Platte damit regelmäßig verformen lässt.

Beim Blasumformen ist die homogene Temperatur der Platte entscheidend Bei dem entwickelten Umformverfahren kommt kein Abdruck der begehrten Form zum Einsatz. Die weiche Platte wird auf eine Vorrichtung gelegt und mit Hilfe eines Hydraulikstempels

abgedichtet. Wenn nun Luft unter die Platte gepumpt wird, nimmt die Platte automatisch eine Halbkugelform an. Damit die Form aber so perfekt wie möglich ist, müssen sich alle Teile der Platte beim Wirken der Kraft gleichmäßig umformen, ansonsten entstehen Beulen oder Dellen. Daher ist es besonders wichtig, dass die Platte gleichmäßig über ihre Länge und Breite erwärmt wird. Mit dem beschriebenen Verfahren konnte somit nach dem Bau vieler experimenteller Prototypen und gescheiterten Umformversuche eine technische wie auch wirtschaftliche Möglichkeit gefunden werden, halbkugelförmige Kollektorabdeckung auf Basis von PMMA herzustellen.

Die Bilder in der Abbildung 39 zeigen eine zu einer Halbkugel umgeformten PMMA-Platte. Die Kantenabmessungen betragen 0,9x0,9 m, die Höhe 0,4 m und die Ausgangsplattendicke 5 mm.

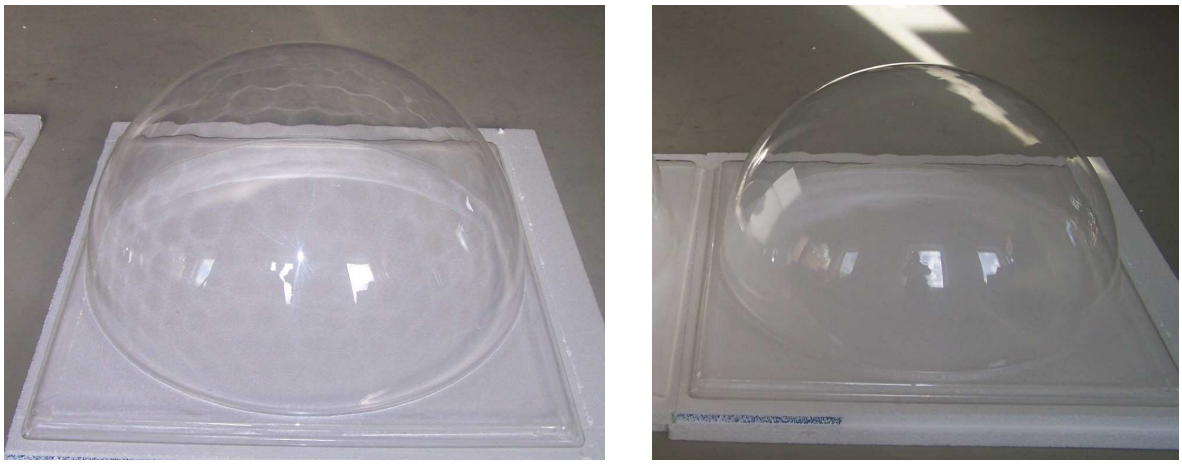

Abb. 39: Halbkugelförmige PMMA-Abdeckung

Das entwickelte Herstellungsverfahren ermöglichte darüber hinaus PMMA-Abdeckungen mit verschiedenen Dimensionen herzustellen. Damit besteht die Möglichkeit zwei Abdeckungen aufeinander zu plazieren, um die Wärmeverluste zu reduzieren, wobei Transmissionsmessungen zeigten, dass durch die Doppelabdeckung der Transmissionsgrad (Globalstrahlung) von etwa 80 % auf 70 % sinkt.

6.3.3 Entwicklung einer flexiblen, faserbasierten Abdeckung nach biologischem Vorbild

Da die eingesetzten PMMA-Abdeckungen, wie die derzeit auf dem Markt befindlichen Abdeckungen starr, teilweise relativ schwer sowie bruchempfindlich sind, wurden in enger Kooperation mit dem Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) in Denkendorf die ersten Schritte für die Entwicklung einer flexiblen, leichten und bruchsicheren Kollektorabdeckung (transparenten Wärmedämmung) auf textiler Basis durchgeführt [59, 60, 61]. Durch die Entwicklung und des Einsatzes des innovativen Produktes können die Wärmeverluste durch Konvektion (Luftzirkulation unter der Abdeckung) effektiv reduziert bzw. verhindert werden.

Die Idee für die transparenten Wärmedämmung wurde der Natur entnommen, Pate für das Material stand das Eisbärfell [62]. Eisbären besitzen ein dichtes, weißes Fell, welches durch Bildung eines Luftpolster den Träger vor Kälte gedämmt bzw. zusammen mit einer Fettschicht warm hält. Darüber hinaus besteht das Fell aus hohlfaserähnlichen Haaren, welche durch Einschluss von Luft den Dämmeffekt verstärken [63].

Dieses Prinzip ist am ITV Denkendorf von der Arbeitsgruppe Technische Textilien eingehend analysiert und daraus ein neues großindustriell herstellbares Produkt entstanden. Dieses basiert auf textile Abstandsstrukturen, die beschichtet werden (Abb. 40). Insbesondere haben

sich hier Abstandsgewirke mit transparenten bzw. eingefärbten Beschichtungen, bestehend aus einem speziellen Silikonkautschuk, bewährt. Hierzu war eine Weiterentwicklung der bislang verfügbaren Wirk- als auch Beschichtungstechnologie erforderlich. Für den Wirkprozess wurden spezielle Monofilamente auf Kettbäume gewickelt und auf einer Doppelraschel-Wirkmaschine mit einer Spezialbindung die ca. 2 cm dicken Abstandsgewirke hergestellt. Die Luft im Fasernetzwerk wirkt wie bei den Fellhaaren als Dämmschicht mit gleichzeitiger Transluzenz.

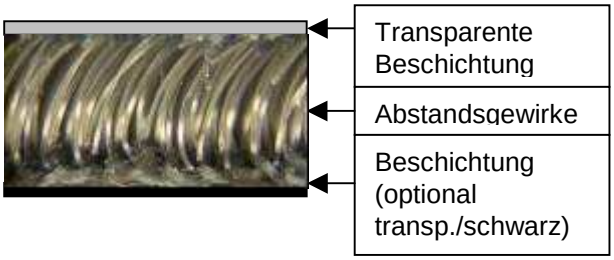

Abb. 40: Beschichtetes Abstandsgewirke [61]

Der Auftrag des Silikonkautschuks erfolgte nicht direkt auf das textile Abstandsgewirke, sondern durch Transferbeschichtung [64]. Hier wurde die Beschichtung zunächst auf ein Trennpapier gebracht, ausgehärtet und in einem zweiten Schritt auf das textile Trägermaterial kaschiert. Anschließend wird nach der Trocknung bzw. dem Aushärten das Trennpapier abgezogen.

Für das Beschichtungsverfahren mit Silikonkautschuk wurde am ITV Denkendorf eine Beschichtungsmaschine mit Heißlufttrockner mit spezieller Silikondosier- und Mischtechnik verwendet. Dort konnten die ersten Prototypen bis hin zu Kleinserien für die Markteinführung hergestellt werden (Abb. 41).

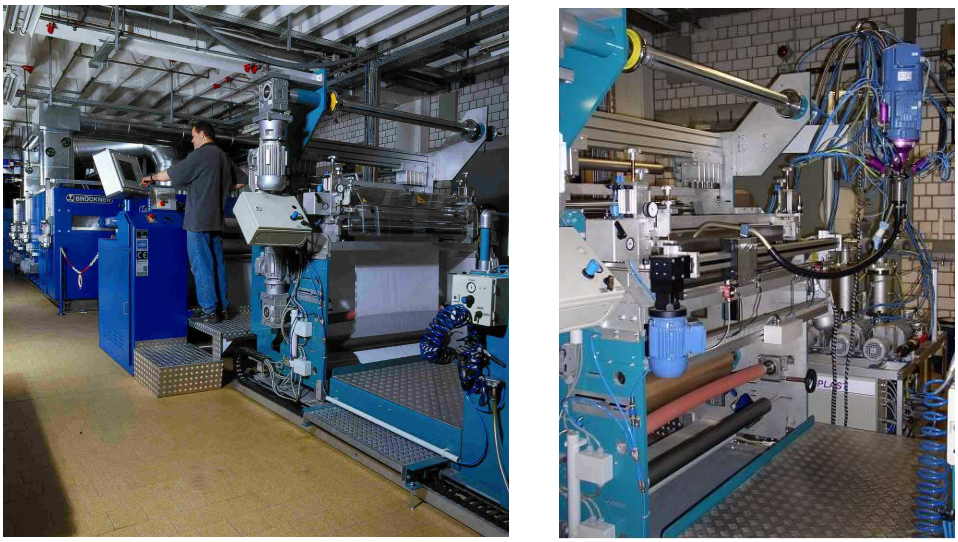

Abb. 41: Beschichtungsanlage im Technikum des ITV Denkendorf für 1 m breite Warenbahnen mit einem Silikonmisch- und Dosiersystem [60]

Die entwickelte flexible und gleichzeitig transparente Wärmedämmung bzw. Kollektorabdeckung ist in Abbildung 42 dargestellt.

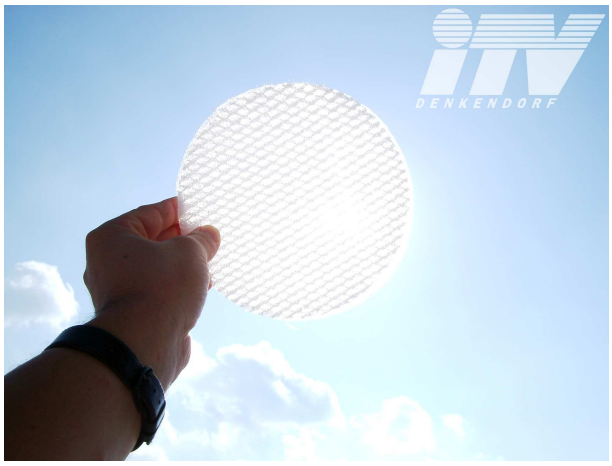

Abb. 42: Transparent beschichte Abstandsstruktur [59]

Das neue transparente Material zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Relativ niedriges Gewicht.
- Hohe mechanische, chemische und thermische Stabilität.
- Flexibel, d.h. gewölbte Strukturen z.B. für halbkugelförmige Kollektorabdeckungen sind möglich.
- In bestimmten Grenzen tiefziehfähig.
- Einsatz von lichtleitenden Polymerfasern.
- Hochtransparente Silikonkautschukbeschichtung.
- Der Verbund ist für das einfallende Licht im sichtbaren Spektrum transparent, UV-Licht wird jedoch gesperrt, weil es auf die Dauer die darrunterliegenden Polymere zerstören würde.
- Ein Wärmeverlust durch Emission des langwelligen Lichtes (Wärmestrahlung) kann durch geeignete Beschichtung reduziert werden.
- Der Wärmeverlust durch Konvektion wird stark reduziert.
- Die Verschmutzung wird durch eine Spezialbeschichtung auf der Silikonschicht verhindert, um die gute Transparenz für einen hohen solarthermischen Wirkungsgrad zu erhalten.

Die technischen Daten eines beidseitig transparent beschichteten Abstandsgewirkes für den Einsatz als Kollektorabdeckung sind in der Tabelle 6 aufgeführt. Die Kennzahlen sind in weiten Bereichen durch die Konstruktion des Abstandstextils sowie durch die Parameter der Beschichtung einstellbar.

Dicke	5 - 60 mm
Flächengewicht	1.200 - 2.000 g/m²
Transmissionsgrad τ	80 – 70 %
Wärmeleitfähigkeit λ[1)]	0,09 - 0,08 W/(mK) [1)]
Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert[2)]	3,0 - 2,2

[1)] in Anlehnung an DIN 52612

[2)] nach DIN 4108 Teil 4

Tab. 6: Technische Daten der beschichteten Abstandsstrukturen [59]

Das Material hat gemäß Tabelle 6 einen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von 2,2 bis 3,0. Damit eignet sich das Material neben der Abdeckung für Sonnenkollektoren auch vorzüglich im Bauwesen für den Einsatz als transparente Wärmedämmung von Fassaden. Je niedriger der U-Wert ist, desto weniger Wärme lässt ein Material emittieren. Herkömmliche transparente Wärmedämmstoffe, zum Beispiel Doppelstegplatten aus Kunststoff, kommen bei einer Materialdicke von 1,6 Zentimetern auf Werte zwischen 2,6 und 3,6 cm. Auf günstige 1,2 bis 2,2 cm bringt es ein weiterer starrer Kunststoff mit Wabenstruktur, der diesen guten Wert allerdings mit einer großen Dicke von sechs Zentimetern und damit einem hohem Materialverbrauch erkauft.

Im Rahmen eines von der Europäischen Union geförderten Forschungsprojektes [61] wurde diese textilbasierte Konstruktionen für den Einsatz als transparente Abdeckung der halbkugelförmigen Kollektoren genutzt (Abb. 43). Dabei brachte die Fa. SES ihr Know-how im Bereich der Konstruktion und Fertigung von Sonnenkollektoren für das Tiefziehen des Materials im Hinblick auf eine Serienproduktion ein. Derzeit werden noch Sondierungsgespräche mit Textilunternehmen für die Serienfertigung des transparent beschichteten Abstandsgewirkes sowie mit Investoren für die Serienproduktion der neuen Halbkugelkollektoren durchgeführt.

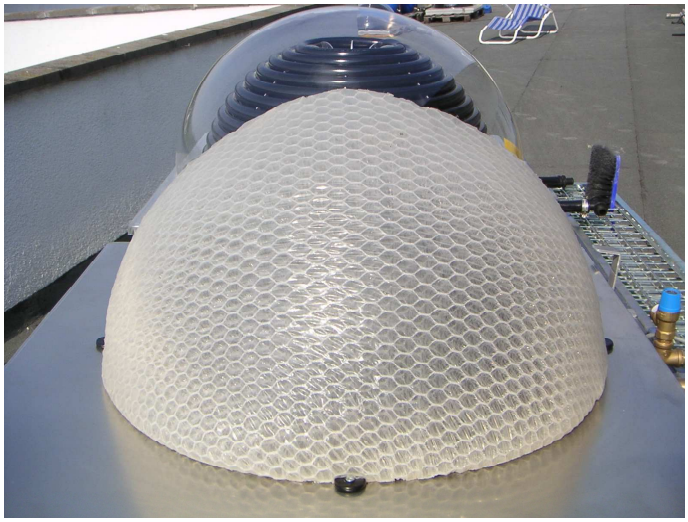

Abb. 43: Halbkugelförmiger Sonnenkollektor mit faserbasierter Abdeckung

6.4 Praxisversuche mit dem Gesamtsystem

6.4.1 Erwärmung von Schwimmbädern

6.4.1.1 Anlagenaufbau

Niedertemperatur-Sonnenkollektoren haben zur Zeit in der Beheizung von Schwimmbeckenwasser ihren größten Anwendungsbereich. Dies liegt auf der einen Seiten an der Tatsache, dass solche Sonnenkollektoren prinzipiell für diesen Anwendungsbereich prädestiniert sind, da sie das günstige Sonnenenergieangebot des Sommerhalbjahres während der Schwimmbadbenutzungszeit von Mai bis September nutzen können. Wegen der niedrigen erforderlichen Temperaturdifferenz zwischen Becken und Umgebungsluft arbeiten diese Kollektoren zudem mit einem günstigen Wirkungsgrad. Bis jetzt werden in diesem Bereich hauptsächlich konventionelle Flachkollektoren eingesetzt, wobei meistens eine oder mehrere Serien von 8 bis 20 Kollektoren benötigt werden, um den Energiebedarf zu decken. Auf der anderen Seite eignen sich die entwickelten mehrschichtigen Absorberschläuche der Halbkugelkollektoren aufgrund ihrer inneren Oberfläche und chemischen Beständigkeit ideal für die Erwärmung von Schwimmbeckenwasser.

Sonnenkollektoranlagen zur Beckenwassererwärmung von Schwimmbädern zeichnen sich in der Regel durch einen einfachen Systemaufbau aus. Ein zusätzlicher Wärmespeicher ist nicht erforderlich, da das Beckenwasser selbst einen großen Wärmespeicher darstellt. Das Beckenwasser wird entweder indirekt über die Kollektoren umgewälzt (Abb. 44) oder über einen zwischengeschalteten Wärmetauscher, wenn die Kollektoren aus Korrosionsgründen nicht mit Beckenwasser beaufschlagt werden dürfen [42]. Die Anbindung des Kollektorkreislaufes erfolgt im Umwälzkreislauf hinter einer Filteranlage zum Entfernen von Fremdstoffen aus dem Wasser, so dass die Kollektoren bzw. der Wärmetauscher von gereinigtem Wasser durchströmt werden. Eine hohe Beaufschlagung des Kollektors ist ungünstig, da hierdurch das mittlere Arbeitstemperaturniveau der Kollektoren verringert wird. Die Kollektoranlage sollte so konzipiert werden, dass im Wasserkreislauf keine zusätzliche Umwälzpumpe erforderlich ist.

Generell kann pro Quadratmeter Absorberfläche bei guter Sonneneinstrahlung eine Wärmeleistung zwischen 500 und 700 W gewonnen werden, so dass sich bei einer Durchflussmenge von 50 bis 80 l/h je Quadratmeter eine Aufheizung Δt von 5 bis 12 ℃ ergibt. Die über die Kollektoranlage gepumpte Wassermenge beträgt in der Regel weniger als 10 % der umgewälzten Beckenwassermenge.

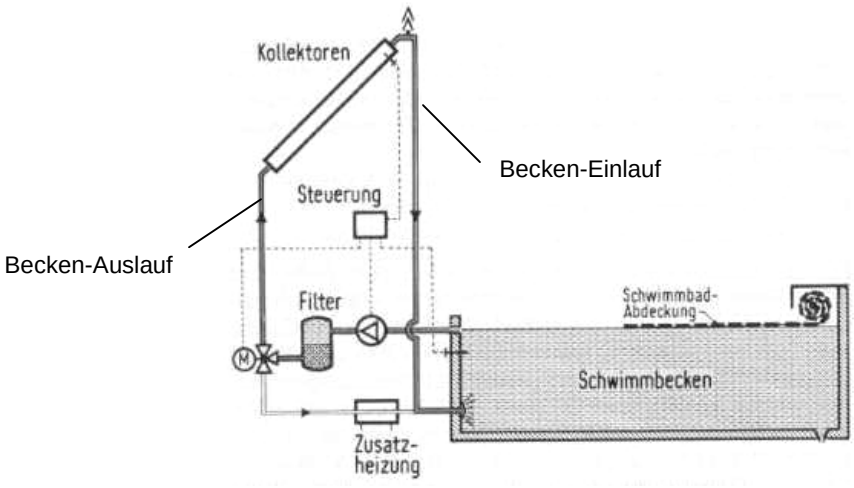

Abb. 44: Anlagenschema zur Schwimmbeckenwassererwärmung mit Sonnenflachkollektor [42]

Das Wasser von Schwimmbädern zeichnet sich dadurch aus, dass es für die Abtötung von Mikroorganismen eine hohe Chlorkonzentration und zudem meistens auch noch andere Inhaltsstoffe enthält, die sich aggressiv gegenüber Kunststoffen und Metallen auswirken. Wie zuvor beschrieben, werden daher größtenteils für die Beheizung der Schwimmbäder Wärmetauscher eingesetzt. Dies ist nicht nur kosten- und wartungsaufwändig, sondern bietet in der Regel nicht den Leistungstransfer, den eine direkte Warmwasserheizung über die Sonnenkollektoren ermöglicht. In den letzten 10 Jahren kamen für diesen Einsatzzweck viele Sonnenkollektoren auf den Markt, die den Kräften des aggressiven Chlors resistent sein sollten. Bedauerlicherweise hielten nur wenige dieser Kollektoren, meistens aus Kunststoff, dieses Versprechen. Damit konnte jedoch nur ein Aspekt des vielschichtigen Problems gelöst werden. Denn während Chlor die Rohrleitungen und andere Aggregate allmählich zersetzen, setzt sich das bei ca. 60 ℃ ausflockende Kalk an der Innensei te der Rohre ab. Auch wenn das Wasser extrem arm an Mineralstoffen ist, kann dies innerhalb von ein bis zwei Jahren zum Bruch der vom Chlor bereits beschädigten und verkalkten Rohre und/oder Absorber führen. Hier kommen die Vorteile der entwickelten mehrschichtigen Schlauchabsorber voll zur Geltung. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Kollektorsystemen ist ihre innere Oberfläche besonders glatt und enthält eine gleitende Mikrostruktur, so dass Kalk nach dem Ausflocken keinen Halt finden kann und vom Wasserstrom wegtransportiert wird. Daher wurden diese Schläuche nicht nur als Absorber in Halbkugelkollektoren, sondern auch als Leitungsrohr eingesetzt.

Eine mit Mehrschichtschläuchen ausgestattete Halbkugelkollektoranlage ist in der Abbildung 45 dargestellt.

Abb. 45: Kollektorenanlage zur Beckenwassererwärmung von Schwimmbädern

Die Anzahl der eingesetzten Kollektoren hängt von den Anforderungen bzw. der geforderten Leistung sowie der Sonneneinstrahlung ab, wie die Abbildung 46 zeigt. Die Abbildung 46 gibt beispielsweise zu erkennen, dass zur täglichen Erwärmung von einem Kubikmeter Wasser je nach Sonneneinstrahlung zwischen zwei bis fünf Halbkugelkollektoren notwendig sind.

.

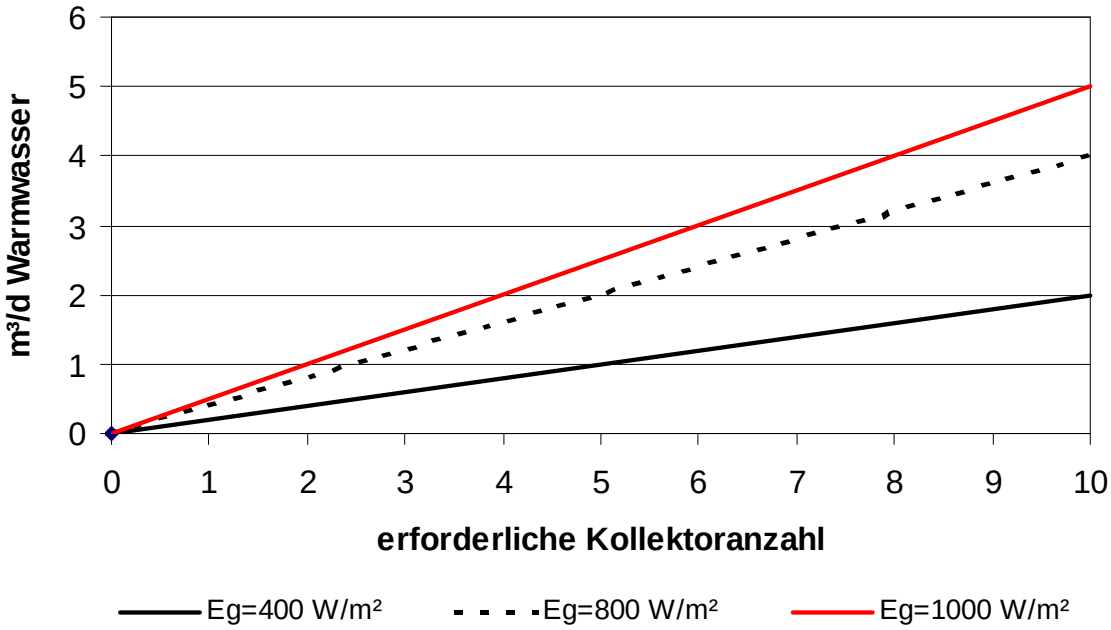

Abb. 46: Täglich erwärmbare Wassermenge als Funktion der erforderlichen Kollektoranzahl und Sonneneinstrahlung

In der folgenden Abbildung 47 ist die Montage (schematisch) von 4x5 halbkugelförmigen Kollektoren mit sphärisch aufgewickelten Rohr-/Schlauchabsorber mit Verlegung der Leitungen nach Tichelmann in Parallelschaltung wiedergegeben [65, 66]. Wie in Abbildung 47 zu erkennen ist, besteht das Prinzip darin, dass der durchfließende Wärmeträger überall die gleiche Gesamtweglänge zurücklegen muss. Dabei werden die Längen der Vorlauf- und Rücklaufleitungen gemeinsam betrachtet. In Folge dessen entstehen bei jedem Kollektor die gleichen Druckverluste, so dass der Massenstrom sich gleichmäßig aufteilt. Eine Erhöhung der Pumpenleistung ist nicht nötig, der Gesamtdruckverlust des Systems steigt nicht an [67].

In einzelnen Fällen, z.B. bei großen Niveauunterschiede zwischen den einzelnen Modulen, kann es notwendig sein, die Kollektormodule in Serienschaltung zu betreiben, damit der Massenstrom gleichmäßig aufgeteilt wird.

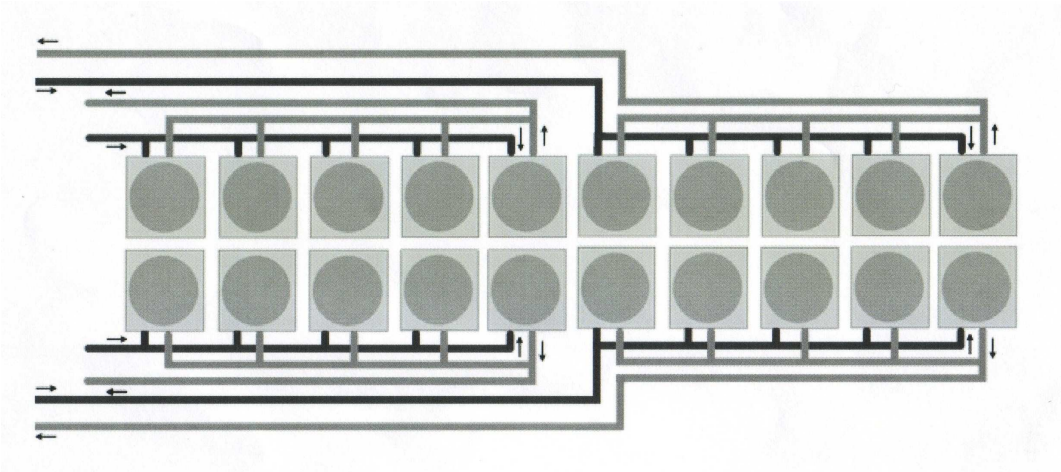

Abb. 47: Beispiel für die Parallelschaltung von 4x5 Halbkugelkollektoren

Der Tragrahmen für die Montage ist aus Aluminium-Winkelprofilen mit den Abmessungen 40 x 40 x 4 mm zusammengeschraubt. Der Abstand der Längsträger beträgt 850 mm (=Kollektorbreite). Die Länge berechnet sich aus der Anzahl der Kollektoren x 1000 mm. Dabei ist ein Abstand von 150 mm zwischen den Kollektoren vorgesehen. Zur Stabilisierung werden bei ca. 1700 mm, gemessen von den Enden, zwei Flachprofile von z.B. 40 x 3 x 850 mm eingesetzt. Die Anzahl der Stabilisatoren hängt von der Länge des Rahmens ab. Die Kuppeln werden durch ein Winkelprofil, das mittels einer Gewindestange und zwei Muttern mit dem Rahmen verspannt wird, gehalten. Dabei reicht es aus, wenn eine Kuppel an zwei schräg gegenüberliegenden Ecken gehalten wird. An den Enden des Rahmens werden die Kuppeln durch mit dem Rahmen verschraubte Aluminiumwinkel gehalten.
Beim Einsatz von Rohrabsorber können alle Absorber- und Leitungsrohre auf dem Rahmen vormontiert werden und anschließend an den Montageort getragen werden. Hier zeigt sich der große Vorteil der entwickelten Halbkugelkollektoren: Die Kollektoranlage besteht aus relativ wenigen und leichten Bauteilen, ist einfach zu transportieren und schnell zu montieren. Dagegen müssen anderen Kollektortypen aus Gewichtsgründen an Ort und Stelle montiert werden.

Bei mehr als etwa 10 Kollektoren sind diese parallel zu schalten (Abb. 48). Da der Strömungswiderstand proportional zur Strecke steigt, müsste ansonsten bei Serienschaltung der erforderliche Rohrdurchmesser zur Reduzierung des Strömungswiderstandes von 18 mm auf 22 mm erhöht werden. Damit würden jedoch die Rohre nicht mehr unter der transparenten Kuppel Platz finden.

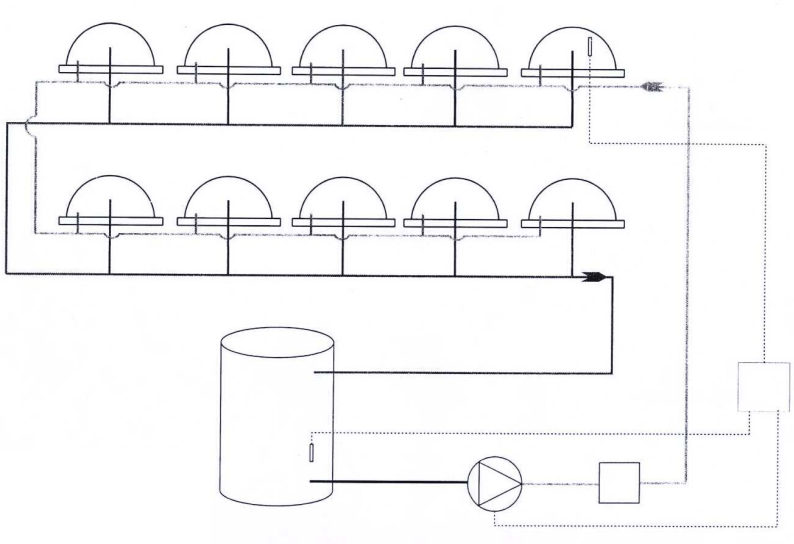

Abb. 48: Parallelschaltung von 10 Sonnenkollektoren

Die nachstehende Abbildung 49 zeigt den Aufbau bzw. das Zusammenschließen von Sonnenkollektoren für die Wassererwärmung von Schwimmbädern.

Abb. 49: Kollektorenanlage zur Beckenwassererwärmung von Schwimmbädern

Aus der Abbildung 49, aber auch Abbildung 45, kommt die ästhetische Seite der Kollektoren zur Geltung. Die Halbkugelform bietet einen erheblichen Vorteil gegenüber Flachkollektoren: Da ihre Höhe einen Meter nicht übersteigt, ist eine aus halbkugelförmigen Kollektoren bestehende Anlage in den meisten Fällen für den Betrachter kaum sichtbar. Und selbst wenn sie sichtbar sein sollte, bietet sie einen äußerst ästhetischen Anblick. Dies zeigt auch die folgende Abbildung 50, in der die Kollektoren in Mitten eines freien Gartengeländes in Bacharach unterhalb eines Schwimmbeckens aufgebaut wurden.

Abb. 50: Der Landschaft angepasste Halbkugelkollektoren zur Beckenwassererwärmung von Schwimmbädern

Bei geringem Bodenangebot können die Kollektoren auch zu einem sogenannten „Energiebaum“ aufgestellt werden (Abb. 51). Ein Energiebaum kann zur Warmwasseraufbereitung in größeren Mengen und neben der Erwärmung von Schwimmbadwasser unter anderem auch für die Wasserentsalzung [68, 69, 70] und Beheizung von Gebäuden eingesetzt werden. Er kann in Form von einer oder mehrerer Schraubenlinien, auf denen die Halbkugelkollektoren montiert sind, ausgebildet sein. In einem Metallrohr eines Durchmessers von 220 mm können in einer Höhe von 6 m ca. 30 bis 40 m² Absorptionsfläche installiert werden. Der geometrische Aufbau erhöht die Strömungsgeschwindigkeiten und bei geeigneter Regelung kann direkt oder indirekt Energie abgenommen werden. Bei der indirekten Energieabnahme können Pufferspeicher aus Beton verwendet werden. Durch die Thermik kann

man mit minimaler Energie die Kollektoren aufheizen und der Wasserauftrieb ermöglicht das leichte Zirkulieren des Wassers im Kollektor.

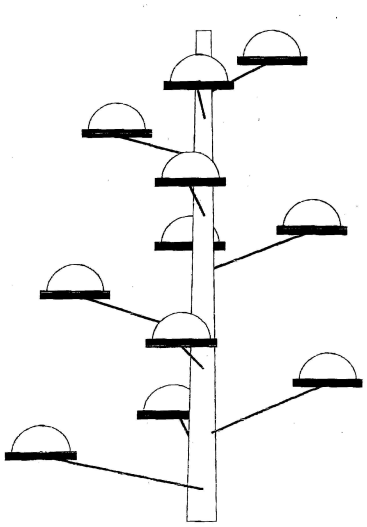

Abb. 51: Energiebaum

6.4.1.2 Versuchsergebnisse

Die folgenden Abbildungen 52 bis 54 zeigen typische Temperaturverläufe von einem halbkugelförmigen Kollektor für dessen Praxiseinsatz bei der Erwärmung von Beckenwasser eines privaten Schwimmbades in Mainz. Die Wasserdurchflussgeschwindigkeit lag bei 0,5 m³/h.

Zunächst ist in der Abbildung 52 der Temperaturverlauf über 6 Tage im Monat Juni aufgezeichnet. Diese Abbildung soll demonstrieren, wie effektiv der Kollektor bei relativ geringen Außentemperaturen arbeitet. Wiedergegeben sind die Temperaturverläufe des Kollektorauslaufes bzw. des Schwimmbeckenzulaufes, des Schwimmbeckenwassers, welcher identisch mit der Vorlauftemperatur ist, sowie die Umgebungstemperatur.

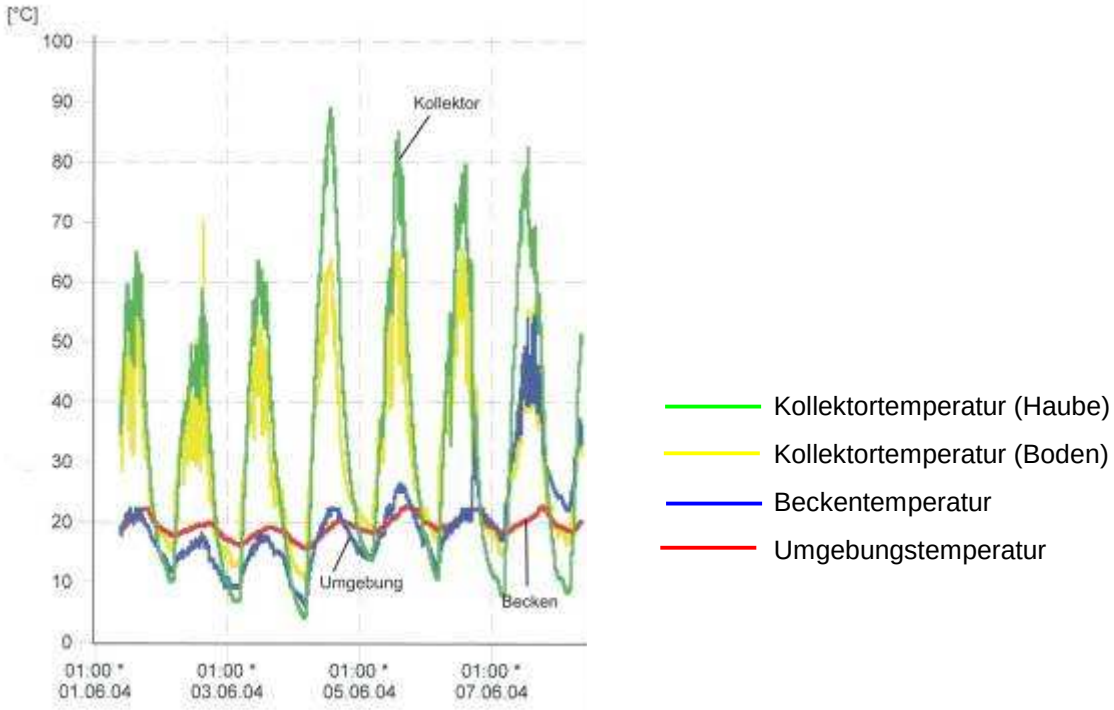

Abb. 52: Temperaturverläufe innerhalb/außerhalb des Kollektors während der Erwärmung von Schwimmbeckenwasser in Mainz (Praxisversuch 1)

Die Abbildung 52 zeigt, dass die Umgebungstemperatur von 5 ℃ in der Nacht bis 25 ℃ am Tage schwankte. Im Mittel lag diese bei knapp unter 20 ℃. Betrachtet man die Temperatur am Kollektorauslauf, so stellt man fest, dass diese tagsüber auf bis zu 90 ℃ (04.06.04) anstieg. Bei Anlagenstillstand konnten Temperaturen von bis zu 100 ℃ gemessen werden. Die dabei beobachtete Wasserdampfbildung und Wasserausdehnung machte deutlich, dass die temperaturbeständigen Rohrleitungen auch hohe Drücke aushalten müssen. Zur Garantie einer 100%igen Sicherheit und Langlebigkeit der Anlage wurden die Rohrleitungen daher für einen permanenten Druck von 16 bar ausgelegt. In der Regel lag die Kollektorauslauftemperatur bei 60 bis 80 ℃. Nachts sank die Auslauftemperatur auf bis unter 10 ℃. Um ein Abkühlen der Beckentemperatur zu verhindern, wird der Kollektorablauf zum Schwimmbecken bei Unterschreitung der Beckentemperatur abgeschaltet, so dass die Beckentemperatur von der Abkühlung der Kollektors nicht beeinflusst wird. Die Beckenwassertemperatur lag während der Untersuchung relativ konstant bei 20 ℃.

In der Abbildung 53 sind weitere Beispiele für aufgenommene Temperaturverläufe (Kollektorrücklauf, Umgebung) beim Einsatz halbkugelförmiger Kollektoren zu sehen. Diese Versuche wurden im Mai 2004 in Mainz bei teilweiser Bewölkung durchgeführt.

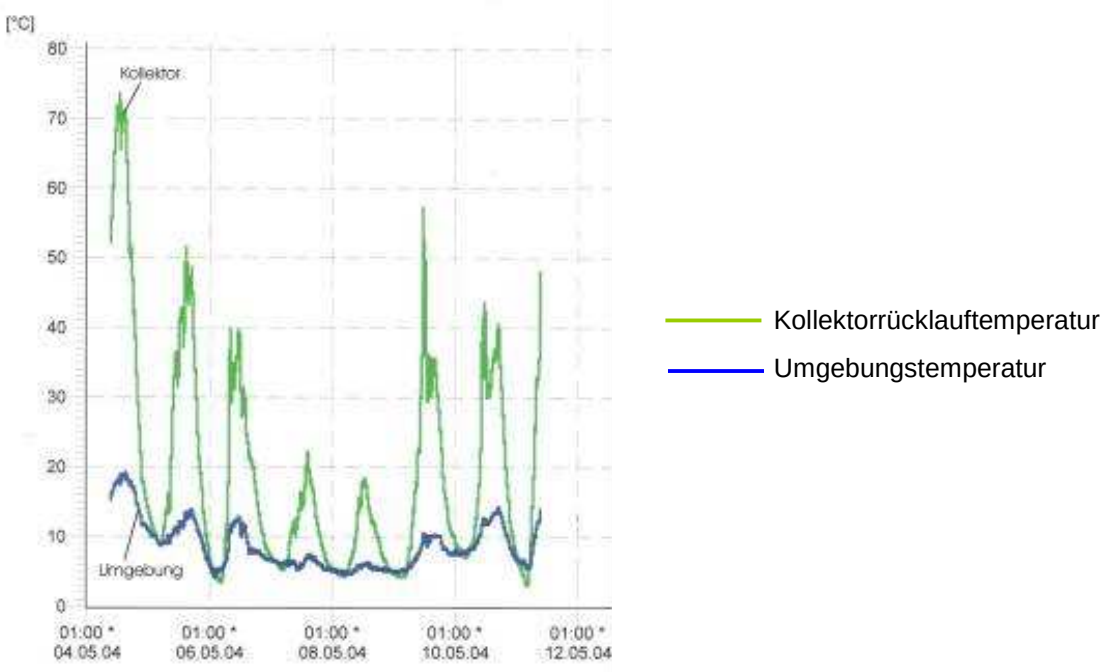

Abb. 53: Temperaturverläufe innerhalb/außerhalb des Kollektors während der Erwärmung von Schwimmbeckenwasser in Mainz (Praxisversuch 2)

Aus der Abbildung 53 ist zu erkennen, dass die Außen- bzw. Umgebungstemperatur beim Praxisversuch 2 im Mittel bei lediglich 10 ℃ lag. Die Temperatur reichte dabei von 5 bis 20 ℃. Der Temperaturverlauf der Kollektors macht deutlich, dass trotz der kalten Umgebungstemperatur durch den Einsatz der halbkugelförmigen Kollektoren (Auslauf-) Temperaturen von bis knapp über 70 ℃ erreicht werd en konnten. Betrachtet man den Quotient der Kollektorauslauftemperatur (Peakspitze) zur Umgebungstemperatur, so kann man feststellen, dass dieser relativ konstant zwischen 3,2 und 3,8 liegt. Daraus kann abgeleitet

werden, dass durch einen Halbkugelkollektor eine mehr als Verdreifachung der Umgebungstemperatur erreicht werden kann.

In der Abbildung 54 ist das Ergebnis von weiteren Temperaturverlaufmessungen zu sehen. Die hier aufgeführten Temperaturen wurden im Raum zwischen der transparenten Abdeckung (Kuppel) und dem Rohr-/Schlauchabsorber gemessen. Die Temperatursensoren waren dabei auf der Bodenplatte sowie auf dem Absorber unter der Kuppe angebracht.

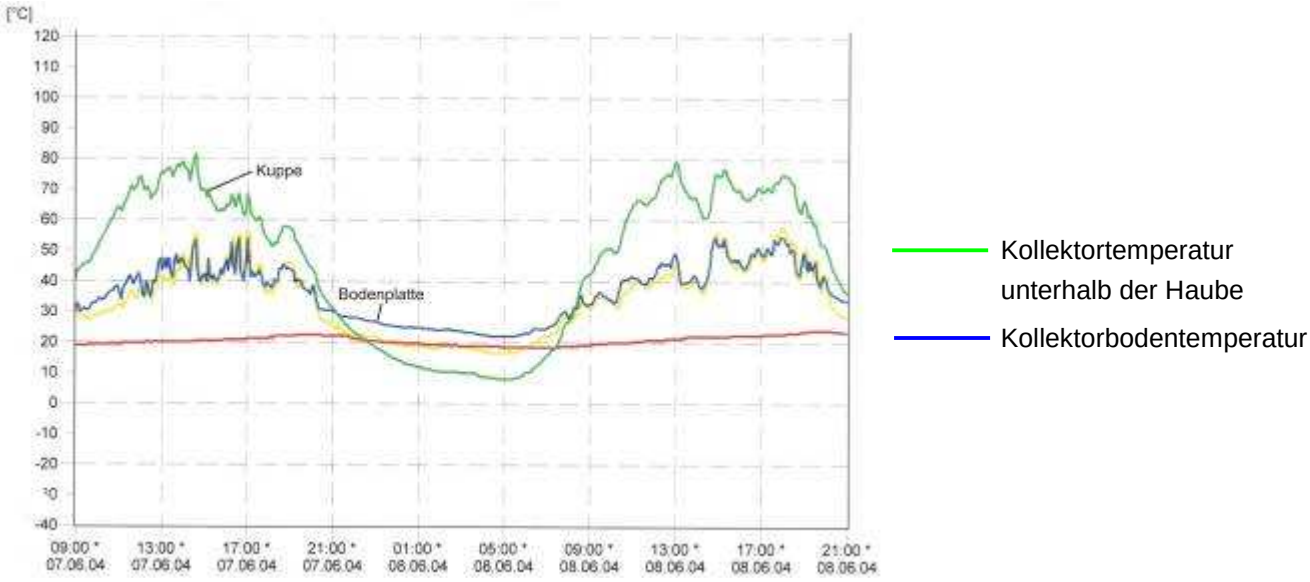

Abb. 54: Temperaturverläufe innerhalb/außerhalb des Kollektors während der Erwärmung von Schwimmbeckenwasser in Mainz (Praxisversuch 3)

Die beiden Kollektortemperaturverläufe in der Abbildung 54 zeigen deutlich, dass tagsüber ein Temperaturgradient zwischen Bodenplatte und Kuppe von bis zu 20 °C bestimmt werden konnte, wobei aufgrund des dichtebedingten Aufsteigens der heißen Luft im Kollektor, die höchste Temperatur an der Kuppel gemessen wurde. Dies macht deutlich, dass während des täglichen Betriebes zum Erreichen der maximal möglichen Kollektorauslauftemperatur die Wasserströmungsrichtung im Rohrabsorber vom Boden aus in Richtung Kollektorkuppe sein muss. Durch die Untersuchungen kam weiterhin zum Vorschein, dass in der Nacht (21.00-8.00 Uhr) die Bodentemperatur oberhalb der Temperatur der Kuppe liegt. Dies ist auf die hohe Wärmekapazität des Kollektorbodens bzw. Speicherung der tagsüber aufgenommenen Wärme sowie Auskühlungseffekte in der Kuppe zurückzuführen.

Das letzte Beispiel soll nicht nur der Wirkungsgrad der entwickelten Kollektoranlage sondern auch deren Nachhaltigkeit für die Beckenwassererwärmung deutlich machen. Eine Anlage in Ludwigshafen bestehend aus 45 Kollektoren wurde für die Erwärmung eines Schwimmbades (50 m³) mit einem Wasserdurchfluss von 7 m³/h eingesetzt. Bei einer mittleren Tagestemperatur von 20 °C konnte Beckenwasser nahezu konstant von 17 °C auf 21 °C erwärmt werden. Die Betriebszeit betrug 5 Stunden (9.00-14.00 Uhr). Dies entspricht über 5 Stunden einer Wärmeleistung von 284 kWh und einem Energieäquivalent von 28,4 m³ Erdgas.

6.4.2 Private Haushalte und Hotelanlagen

Neben der Beckenwassererwärmung von Schwimmbädern ist die Warmwasserbereitung vor allem unter den Klimaverhältnissen in Deutschland das interessanteste Anwendungsgebiet für

die Nutzung der Sonnenstrahlungsenergie mit Kollektoren [42]. Die Gründe hierfür sind die folgenden:

- Der ganzjährig annähernd gleichbleibende Energiebedarf ermöglicht eine Nutzung des hohen Strahlungsangebotes in den Sommermonaten, welche etwa drei Viertel der jährlich eingestrahlten Energie ausmacht.
- Energiegewinne sind bereits auf relativ niedrigem Temperaturniveau möglich, nämlich sobald die Temperatur des Wärmeangebotes die übliche Kaltwassertemperatur von etwa 10 ℃ übersteigt.
- Die weitverbreitete Warmwasserbereitung mit einem Ölheizkessel arbeitet im Sommer mit schlechten Nutzungsgrad, da die Kessel für Heizzwecke und für die Warmwasserproduktion ausgelegt sind und daher im Sommer nicht mit voller Leistung arbeiten können. Durch Stillegung des Kessels in der heizfreien Zeit und Erwärmung des Wassers mit Sonnenkollektoren kann eine relativ hohe Energieeinsparung erzielt werden. Sparsame elektronische Durchlauferhitzer ermöglichen auch bei Schlechtwetter die Erwärmung des Wassers zur Einstellung der gewünschten Temperatur.

Voraussetzung für den Einsatz von Sonnenkollektoren ist eine geeignete Einbau- oder Aufstellungsmöglichkeit der Kollektoren und das Vorhandensein einer zentralen Warmwasserversorgung, wie dies in den Abbildungen 55 und 56 dargestellt ist. Zu einer solaren Warmwasserbereitungsanlage gehören neben den Kollektoren ein Warmwasserspeicher, Rohrleitungen, Umwälzpumpen, die Systemregelung, Sicherheitseinrichtungen und eine Zusatzheizung. Das Systemkonzept wird wesentlich durch die Art der Nacherwärmung des Wassers und durch die Sicherheitsvorkehrungen gegen unzulässige Temperaturen und Drücke bei fehlender Nutzwärmeabnahme bestimmt. Die sicherheitstechnischen Systemanforderungen sind in der DIN EN 12975 festgelegt [46].

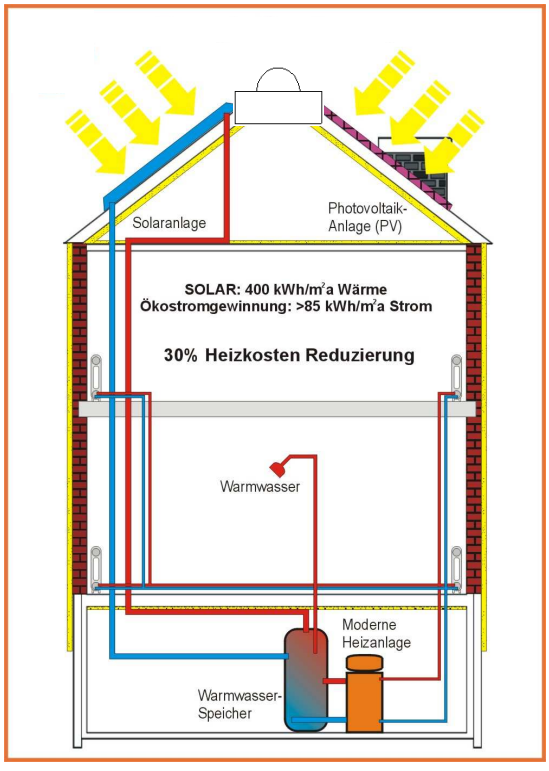

Abb. 55-56: Schema (links) und Einsatz (rechts) einer Solaranlage zur Wassererwärmung in privaten Haushalten in Kombination mit einer Photovoltaikanlage

Da das bereitgestellte Warmwasser nicht fortlaufend und in großen Mengen verbraucht wird, kommt es des öfteren dazu, dass mehr Energie zur Verfügung steht, als tatsächlich benötigt wird. Diese Wärmeenergie kann langfristig in einem zusätzlichen Speicher aufbewahrt werden, wofür es verschiedenste Ausführungen gibt. Ein interessantes Beispiel hierfür bietet ein Haus in Freiburg, welches das Prinzip der Warmwasserspeicherung in seiner Architektur integriert hat: Sein Kern besteht aus einem Wasserspeicher mit einem Radius von 2,5 Metern und einer Höhe von 7 Metern. Dieser Speicher nimmt vor allem im Sommer überschüssige Wärmeenergie auf. Im Winter setzt der Speicher diese Energie wieder frei und dient so als Heizung und Warmwasserspeicher. Ein solcher Speicher ist natürlich nicht notwendig, wenn man eine Solaranlage als Ergänzung für seine Heizung verwenden möchte. So haben sich etwa auch Fußbodenheizungen, die mit dem Wärmespeicher gekoppelt sind, als äußerst effektiv für das Heizen von Häusern bis zu 300 m^2 erwiesen. Dabei muss beim Einsatz der Halbkugelkollektoren mit einer Zahl von ca. 10 Sonnenkollektoren pro 100 m^2 gerechnet werden und es gilt nach wie vor das Prinzip, je größer die Kapazität des Speichers ist, desto weniger Energie wird zum Nachheizen gebraucht.

Für einen privaten Haushalt können sich herkömmliche Kollektoren als vollkommen ausreichend erweisen. Die Installationskosten sind akzeptabel und die Wartungskosten vom Typen und Hersteller des Sonnenkollektors abhängig. Die meisten marktüblichen Anlagen haben aufgrund der Materialauswahl insbesondere im Mittelmeerraum eine Lebenszeit von ca. 5-15 Jahren. Bei Anlagen mit halbkugelförmigen Kollektoren ist mit mehr als einer doppelten Lebenszeit zu rechnen. Dabei sind meistens Rohrverbindungen zwischen den Kollektoren oder andere Teile der Anlage anfälliger als die Kollektoren selbst.

Neben privaten Haushalten bestehen interessante Einsatzmöglichkeiten von Sonnenkollektoren für große Warmwasserverbraucher, wie Hotels. Hotels und Haushalte haben ähnliche, aber trotzdem klar differenzierbare Interessen beim Gebrauch von Sonnenkollektoren zur Warmwassergewinnung. Hotels sind hochgradig abhängig von Warmwasser für die Versorgung der einzelnen Zimmer, aber auch größerer Warmwasserverbraucher, wie etwa die Küchen. Um die Funktionsfähigkeit der einzelnen Verbraucher gewährleisten zu können, muss vor allem während der Betriebsmonate durchgehend und ohne jegliche Unterbrechung warmes Wasser zur Verfügung stehen. Für eine Sonnenkollektoranlage setzt dies voraus, dass sie in der Lage ist, schnell Wasser zu erhitzen, auch wenn die Sonnenbestrahlung nicht optimal ist. Aus diesen Gründen ist die Kollektoranlage immer in Kombination mit einem zusätzlichen Heizkessel aufzubauen.

6.4.3 Mobile Anlagen

Als mobile Anlage wird jede Vorrichtung bezeichnet, die ihre Ausrichtung zur Sonne in jeglicher Hinsicht ändern kann. Vor allem sind dies große Fahrzeuge, Campingfahrzeuge oder Schiffe. Das größte Hindernis solcher Anlagen ist die Tatsache, dass diese immer wieder mit Hilfe eines mobilen Gerüstes zur Sonne ausgerichtet werden müssen. Derzeit sind hierfür teure stationäre Tracking-Systeme auf dem Markt, welche nur alle paar Minuten eine Ausrichtung von wenigen Bruchteilen eines Grades vornehmen. Die Folge ist ein unverhältnismäßig hoher Stromverbrauch und enorme Installations- und Wartungskosten.

Die Form der Halbkugelkollektoren führt zwangsläufig auf effiziente Weise zur Lösung dieses Problem. Aufgrund ihrer Form sind die Kollektoren, wie bereits in vorherigen Kapiteln detailliert

beschrieben, zu jeder Zeit der Sonne zugewandt. Daher entfällt die Notwendigkeit eines Verfolgungssystems.

6.5 Simulation des Gesamtsystems und Vergleich mit Ergebnissen aus Praxisversuchen

Für das bessere Verständnis und die Beurteilung der in der Kollektoranlage ablaufenden Prozesse sowie deren Optimierung wurde eine Computersimulation der gesamte Anlage mit dem Programm Matlab/Simulink durchgeführt [71, 72]. Die Erstellung des Modells der Sonnenkollektoranlage erfolgte nach dem Top-Down-Prinzip, d.h. es wurde von dem vereinfachten Modell ausgegangen. Hierfür wurde die Anlage in die beiden wesentlichen Komponenten Kollektor und Wärmespeicher zerlegt. Die Ein- und Ausgangsgrößen (Energie- und Massenströme) der einzelnen Komponenten werden in Anlehnung an jene in Abbildung 57 bezeichnet.

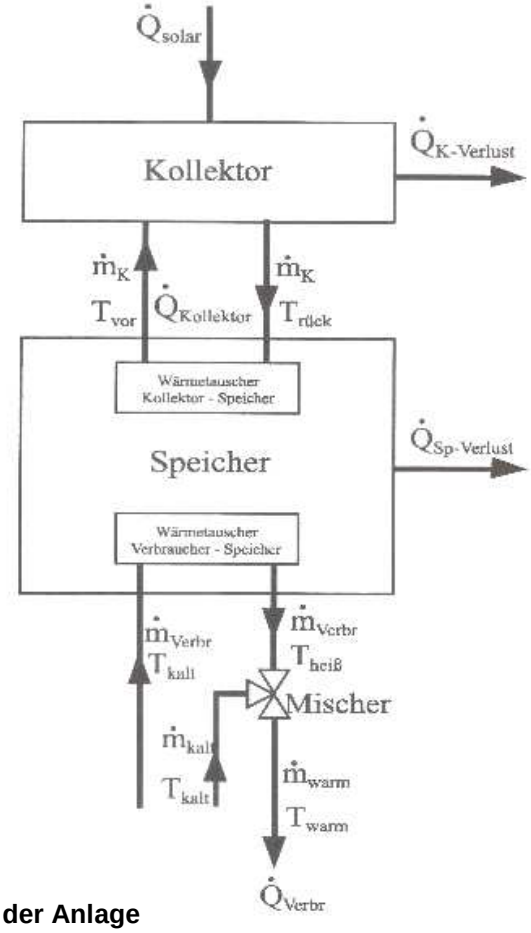

Abb. 57: Vereinfachtes Modell der Anlage

Vereinfacht bildet die absorbierte Strahlungsleistung $\dot{Q}_{solar}$ die Eingangsgröße des Kollektors. Der Kollektor wird dabei als konzentrierendes Element bezeichnet, d.h. die absorbierte Strahlungsleistung wird ohne Verzögerung an den Massenstrom des Wärmeträgers abgegeben. Weiterhin geht das Modell von verlust- und verzögerungsfreien Rohrleitungen aus. Somit ist z.B. die Vorlauftemperatur direkt am Kollektor und die Rücklauftemperatur des Wärmetauschers gleich. Außerdem wird vorläufig nur ein Kollektorstrang betrachtet.

Die Schnittstellen zur Umwelt bilden neben der absorbierten Strahlungsleistung $\dot{Q}_{solar}$ die Kollektorverluste $\dot{Q}_{K,Verlust}$, die Speicherverluste $\dot{Q}_{Sp,Verlust}$ sowie die vom Verbraucher entnommene Wärmemenge $\dot{Q}_{Verbr}$ Vom Kollektor wird die Wärmeleistung $\dot{Q}_{Kollektor}$ in den Speicher eingebracht.

6.5.1 Vereinfachtes Modell der Gesamtanlage

6.5.1.1 Kollektor

6.5.1.1.1 Stationäres Verhalten

In diesem Abschnitt soll das Kollektormodell hergeleitet werden, das sich für die Beschreibung der Kollektoren im stationären Zustand eignet. Dabei soll zunächst die Umwandlung der Sonnenstrahlung in Wärme näher betrachtet werden und anschließend die Verluste, die dabei auftreten.

Für die Herleitung des Kollektormodells wurden die Umgebungstemperatur und Einstrahlungswerte variiert, um deren Einfluss auf das System zu untersuchen. In der Realität gibt es weit mehr Faktoren, die sich gegenseitig beeinflussen, als simuliert werden können. Wie später gezeigt wird, können die Simulationswerte jedoch Aufschluss darüber geben, was bestimmte Phänomene in einer Kollektoranlage hervorrufen können, obwohl eine Übereinstimmung der Messwerte und Simulationswerte nicht immer gegeben ist.

Der Kollektor gilt als eine Funktion, deren Parameter (Eingabewerte) die Vorlauftemperatur, die Masse und das Volumen des Wärmeträgers (in diesem Fall Wasser) sowie die absorbierte Strahlung sind. Die Vorlauftemperatur wird dabei vom Speicher bezogen, als Anfangswert für die Simulation wird die Umgebungstemperatur angenommen. Die Eigenschaften des Wärmeträgers lassen sich statisch in Hinsicht auf den Absorberdurchmesser und die Absorberlänge festlegen. Der Ausgabewert ist die Rücklauftemperatur.

Zur Berechnung der absorbierten Strahlung $\dot{Q}_{solar}$ muss zwischen den beiden Komponenten direkte und diffuse Strahlung unterschieden werden. Wie in Kapitel 1 beschrieben versteht man unter direkter Strahlung die Strahlung, die direkt aus Richtung der Sonne kommt, während diffuse Strahlung keine Vorzugsrichtung hat, da sie sich durch Streuung eines Teils der Sonneneinstrahlung an der Atmosphäre und an Wolken ergibt. In der Globalstrahlung sind beide Komponenten enthalten. Es gilt:

$$E_g = E_{direkt} + E_{diff} \quad => \quad E_{direkt} = E_g - E_{diff} \qquad [W/m^2] \qquad \text{(Gl. 6.2)}$$

mit: E_g: globale Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Fläche [W/m²], E_{direkt}: direkte Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Fläche [W/m²], E_{diff}: Diffuse Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Fläche [W/m²].

Da vom Pyranometer nur die Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Fläche geliefert wird, gilt

$$E_\varphi = \frac{E_{direkt}}{\cos\varphi} = \frac{E_g - E_{diff}}{\cos\varphi} \qquad [W/m^2] \qquad \text{(Gl. 6.3)}$$

mit: E_φ: Bestrahlungsstärke auf eine zur Sonne senkrecht stehende Fläche [W/m²], φ: Einstrahlwinkel der Strahlung zur Vertikalen [°].

Die Einstrahlungsleistungen beziehen sich immer auf eine horizontale Fläche. Die Berechnung der absorbierten Strahlungsleistung $\dot{Q}_{solar}$ wird unterteilt in die Komponenten der direkten und diffusen Strahlung:

$$\dot{Q}_{solar} = \dot{Q}_{solar/direkt} + \dot{Q}_{solar/diff} \quad [W] \qquad \text{(Gl. 6.4)}$$

mit: $\dot{Q}_{solar/direkt}$: absorbierte direkte Strahlungsleistung [W], $\dot{Q}_{solar/diff}$: absorbierte diffuse Strahlungsleistung [W].

Von der absorbierten Strahlungsleistung $\dot{Q}_{solar}$ müssen noch die im weiteren beschriebenen thermischen Verluste abgezogen werden.

Um die absorbierte Strahlungsleistung zu berechnen, muss man die Bezugsfläche, die die Strahlung absorbiert, kennen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die projizierte Fläche sich mit dem Einstrahlwinkel ändert (Abb. 58).

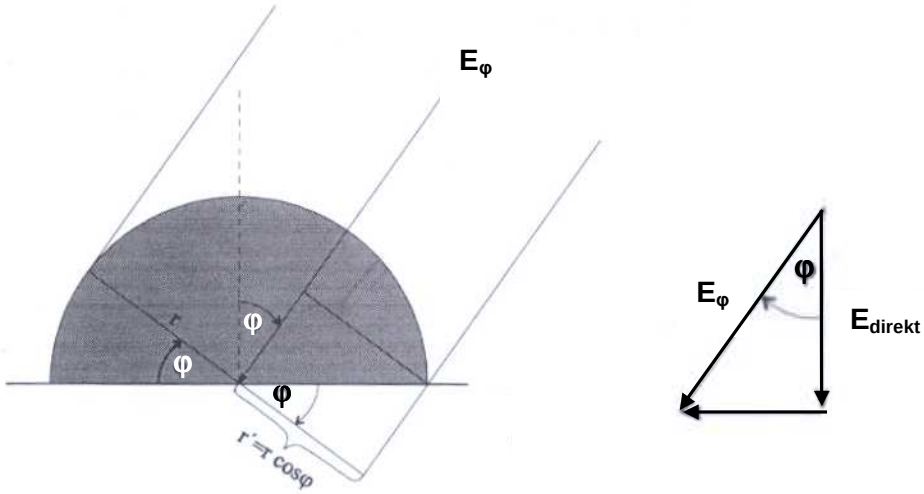

Abb. 58: Projizierte Fläche in Seitenansicht

Definiert man φ' als Winkel zwischen dem Horizont und der Sonne, so ist φ=90°-φ' der Einstrahlwinkel der Strahlung zur Vertikalen. Für einen Halbkugelkollektor mit einem Radius r_{Abs} erhält man die Projektionsfläche $A_{Proj(\varphi)}$:

$$A_{Proj(\varphi)} = \frac{\pi \cdot r_{Abs}^2}{2} + \cos(\varphi) \cdot \frac{\pi \cdot r_{Abs}^2}{2} \quad [m^2] \qquad \text{(Gl. 6.5)}$$

mit: r_{Abs}: Absorberradius [m], φ: Einstrahlwinkel der Strahlung zur Vertikalen [°].

Daraus ergeben sich Einstrahlungsflächen von $A_{(\varphi=0°)} = \pi \cdot r_{Abs}^2$ bis $A_{(\varphi=90°)} = 0{,}5 \cdot (\pi \cdot r_{Abs}^2)$.

Die vom Absorber aufnehmbare Strahlungsenergie ist wesentlich von den optischen Verlusten abhängig, die durch die Kollektorabdeckung zustande kommen. Hier kommt der Transmissionsgrad τ_{Abdeck}, als Maß der Lichtdurchlässigkeit der Abdeckung, welcher ein Wert von 0 bis 1 (1=komplette Durchlässigkeit) annehmen kann, zur Geltung. Die Bestrahlungsstärke, welche durch die Abdeckung hindurchdringt und auf den Absorber trifft, ergibt sich somit zu $E_{\varphi} \cdot \tau_{Abdeck}$. Die vom Absorber umgewandelte Strahlung wird durch den Absorptionsgrad α ausgedrückt. Dieser ist immer kleiner als 1, da aufgrund des 2. Hauptsatzes der Wärmelehre niemals die gesamte aufgenommene Energie zur Verfügung gestellt werden

kann. Mit E_φ, τ_{Abdeck}, α und dem Einstrahlwinkel φ lässt sich die absorbierte Strahlung der direkten Einstrahlung $\dot{Q}_{solar/direkt}$ berechnen zu:

$$\dot{Q}_{solar/direkt} = A_{Proj\,(\varphi)} \cdot \alpha \cdot E_\varphi \cdot \tau_{Abdeck} \quad [W] \qquad \text{(Gl. 6.6)}$$

mit: $A_{Proj(\varphi)}$: Projektionsfläche [m²], α: Absorptionsgrad [-], E_φ: Bestrahlungsstärke [W/m²], τ_{Abdeck}: Transmissionsgrad der transparenten Abdeckung[-].

Bei der diffusen Strahlung wird davon ausgegangen, dass diese sich gleichmäßig auf die gesamte Absorberfläche auswirkt. Die Bezugsfläche ist in diesem Fall die gesamte halbkugelförmige Absorberfläche. Für die diffuse Einstrahlung $\dot{Q}_{solar/diff}$ gilt somit:

$$\dot{Q}_{solar/diff} = A_{Abs} \cdot \alpha \cdot E_{diff} \cdot \tau_{Abdeck} = 2 \cdot \pi \cdot r_{Abs}^{\,2} \cdot \alpha \cdot E_{diff} \cdot \tau_{Abdeck} \quad [W] \qquad \text{(Gl. 6.7)}$$

mit: A_{Abs}: Absorberfläche [m²], α: Absorptionsgrad [-], E_{diff}: diffuse Bestrahlungsstärke [W/m²], τ_{Abdeck}: Transmissionsgrad der Abdeckung [-], r_{Abs}: Absorberradius [m].

Durch das Aufsummieren der direkten und diffusen Strahlung erhält man die gesamte absorbierte Strahlungsleistung $\dot{Q}_{solar}$ zu:

$$\dot{Q}_{solar} = \alpha \cdot \tau_{Abdeck} \cdot \pi \cdot r_{Abs}^2 \cdot \left(2 \cdot E_{diff} + \frac{(1+\cos\varphi)}{2} \cdot \frac{E_g - E_{diff}}{\cos\varphi} \right) \quad [W] \qquad \text{(Gl. 6.8)}$$

mit: α: Absorptionsgrad [-], τ_{Abdeck}: Transmissionsgrad der Abdeckung [-], r_{Abs}: Absorberradius [m], E_{diff}: diffuse Bestrahlungsstärke [W/m²], E_g: globale Bestrahlungsstärke [W/m²], φ: Einstrahlwinkel der Strahlung zur Vertikalen [°].

Davon müssen in der Simulation noch die thermischen Verluste (Wärmeverluste) am Kollektor abgezogen werden [73]. Die bezeichnende Größe hierfür ist der Emissionsgrad. Die Wärmeverluste spalten sich in drei Bereiche [74, 75]:

- Wärmeverluste durch Wärmestrahlung [76] mittels elektromagnetischer Wellen. Sie erfolgt hauptsächlich im infraroten Spektrum (Wellenlängen > 800 nm). Die Wärmeabstrahlung $\dot{Q}_{Abstr}$ verhält sich proportional zur vierten Potenz der Absorbertemperatur. Linear gelten hierbei die Absorberfläche, der Emissionsgrad und die Stefan-Bolzmann-Konstante.

  $$\dot{Q}_{Abstr} = \varepsilon \cdot \varsigma \cdot A_{Abs} \cdot T_{Abs}^{\,4} \quad [W] \qquad \text{(Gl. 6.9)}$$

  mit: ε: Emissionsgrad [-], ς: Stefan-Boltzmann-Konstante ($5{,}76 \cdot 10^{-8}$ W/(m²·K⁴)), A_{Abs}: Absorberfläche [m²], T_{Abs}: Absorbertemperatur [K].

- Wärmeleitungsverluste finden innerhalb von Stoffen statt, indem von Temperatur angeregte Elektronen sich im Atomgitter des Materials bewegen.
- Wärmeverluste durch Konvektion. Konvektion ist dadurch gekennzeichnet, dass die Wärmeübertragung durch den Transport von Teilchen (Gase oder Fluide) bewerkstelligt wird, welche ihre kinetische Energie mitführen. Als Beispiel hierfür lässt sich etwa die aufsteigende heiße Luft an einer Heizung nennen.
  Die Wärmeübergänge durch Leitung und Konvektion werden durch den Wärmeübergangskoeffizienten a* beschrieben. Betrachtet werden dabei die Wärmeübergänge Abdeckung-Außenluft (a^*_{Konv}) und Kollektorbodenfläche-Boden

($a^*_{Leit/Boden}$). Damit lassen sich die Wärmeverluste $\dot{Q}_{Leit/Konvektion}$ durch Wärmeleitung und Konvektion für Halbkugelkollektoren wie folgt zusammenfassen:

$$\dot{Q}_{Leit/Konvektion} = (T_K - T_A)\cdot(a^*_{Leit/Boden}\cdot\pi\cdot r^2_{Abs} + a^*_{Konv}\cdot 2\cdot\pi\cdot r^2_{Abdeck}) \quad [W] \qquad \text{(Gl. 6.10)}$$

mit: T_K: Lufttemperatur unter der Kollektorabdeckung [K], T_A: Umgebungs- bzw. Außentemperatur [K]. $a^*_{Leit/Boden}$: Wärmeübergangskoeffizient Kollektorbodenfläche-Boden [W/m²·K], a^*_{Konv}: Wärmeübergangskoeffizient Abdeckung-Außenluft [W/m²·K], r_{Abdeck}: Radius der Kollektorabdeckung [m].

Nach Abzug der Wärmeverluste ergibt sich die vom Kollektor an den Speicher abgegebene Leistung des Kollektors $\dot{Q}_{Kollektor}$ (Gl. 6.11). Dabei wird angenommen, dass die Bodentemperatur gleich der Außentemperatur ist, so dass die Konvektions- und Wärmeleitungsverluste des Kollektors durch eine gemeinsame Konstante $k_{Leit/Konv}$ beschrieben werden können.

$$\dot{Q}_{Kollektor} = \dot{Q}_{Solar} - \dot{Q}_{K,\,Verluste} \quad [W] \qquad \text{(Gl. 6.11)}$$

$$= \alpha\cdot\tau_{Abdeck}\cdot\pi\cdot r_{Abs}^{\,2}\left(2\cdot E_{diff} + \frac{1+\cos\varphi}{2}\cdot\frac{E_g - E_{diff}}{\cos\varphi}\right) - \varepsilon\cdot\varsigma\cdot 2\cdot\pi\cdot r_{Abs}^{\,2}\cdot T_{Abs}^{\,4} - (T_K - T_A)\cdot k_{Leit/Konv}$$

mit: α: Absorptionsgrad [-], τ_{Abdeck}: Transmissionsgrad [-], r_{Abs}: Absorberradius [m], E_{diff}: diffuse Bestrahlungsstärke [W/m²], E_g: globale Bestrahlungsstärke [W/m²], φ: Einstrahlwinkel der Strahlung zur Vertikalen [°], T_{Abs}: Absorbertemperatur [K], ε: Emissionsgrad [-], ς: Stefan-Bolzmann-Konstante ($5{,}76\cdot10^{-8}$ W/(m²·K⁴)), T_K: Lufttemperatur im Kollektor [K], T_A: Umgebungs- bzw. Außentemperatur [K], $k_{Leit/Konv}$: Proportionalitätskonstante zur Beschreibung der Wärmeverluste [W/K].

Die Kollektorleistung $\dot{Q}_{Kollektor}$ kann auch durch die Vor- und Rücklauftemperatur sowie den Massenstrom und der mittleren Wärmekapazität der Wärmeträgerflüssigkeit berechnet werden [80]:

$$\dot{Q}_{Kollektor} = (T_{Rück} - T_{Vor})\cdot\dot{m}_K\cdot c_p \quad [W] \qquad \text{(Gl. 6.12)}$$

mit: $T_{Rück}$: Rücklauftemperatur [K], T_{Vor}: Vorlauftemperatur [K], $\dot{m}_K$: Massenstrom [Kg/s], c_p: Wärmekapazität [J/kg·K].

Daraus ergibt sich für die Rücklauftemperatur $T_{Rück}$ die folgende Funktion:

$$T_{Rück} = T_{Vor} + \qquad \text{(Gl. 6.13)}$$

$$\frac{\alpha\cdot\tau_{Abdeck}\cdot\pi\cdot r^2_{Absorber}\cdot 2\cdot E_{diff} + \frac{1+\cos\varphi}{2}\cdot\frac{E_g - E_{diff}}{\cos\varphi} - \varepsilon\cdot\varsigma\cdot 2\cdot\pi\cdot r^2_{Abs}\cdot T^4_{Abs} - (T_K - T_A)\cdot k_{Leit/Konv}}{\dot{m}_K\cdot c_p} \quad [W]$$

mit: T_{Vor}: Vorlauftemperatur [K], α: Absorptionsgrad [-], τ_{Abdeck}: Transmissionsgrad [-], E_{diff}: diffuse Bestrahlungsstärke [W/m²], E_g: globale Bestrahlungsstärke [W/m²], φ: Einstrahlwinkel der Strahlung zur Vertikalen [°], ε: Emissionsgrad [-], ς: Stefan-Bolzmann-Konstante (5,76·10-8 W/(m2·K4)), r_{Abs}: Absorberradius [m], T_{Abs}: Absorbertemperatur [K], TK: Lufttemperatur im Kollektor [K], TA: Umgebungs- bzw. Außentemperatur [K], $k_{Leit/Konv}$: Proportionalitätskonstante zur Beschreibung der Wärmeverluste [W/K], $\dot{m}_K$: Massenstrom [kg/s], c_p: Wärmekapazität [J/kg·K].

6.5.1.1.1 Dynamisches Verhalten

- **Verhalten des Kollektors bei sich ändernder Vorlauftemperatur**

Durch das Volumen V_K des Kollektors erreicht ein Volumenelement, das zum Zeitpunkt t mit der Temperatur $T_{Vor}(t)$ in den Kollektor eintritt, den Ausgang des Kollektors erst zum Zeitpunkt t+T. Die vom Volumenfluss abhängige Totzeit T ergibt sich zu:

$$T = \frac{V_K}{V^{\circ}_K} \qquad [s] \qquad \text{(Gl. 6.14)}$$

mit: V_K: Kollektorvolumen [m³], V°_K: Volumenfluss im Kollekor [m³/s].

Eine Änderung der Vorlauftemperatur macht sich also erst nach Ablauf der Totzeit T am Rücklauf des Kollektors bemerkbar. Damit ergibt sich für die Rücklauftemperatur $T_{Rück}$:

$$T_{Rück}^{(t)} = T_{Vor}^{(t-T)} + \frac{\alpha \cdot \tau_{Abdeck} \cdot \pi \cdot r_{Abs}^2 \cdot 2 \cdot E_{diff} + \frac{1+\cos\varphi}{2} \cdot \frac{E_g - E_{diff}}{\cos\varphi} - \varepsilon \cdot \varsigma \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{Abs}^2 \cdot T_{Abs}^4 - (T_K - T_A) \cdot k_{Leit/Konv}}{\dot{m}_K \cdot c_p} \quad [W] \qquad \text{(Gl. 6.15)}$$

mit: T_{Vor}: Vorlauftemperatur [K], α: Absorptionsgrad [-], τ_{Abdeck}: Transmissionsgrad [-], r_{Abs}: Absorberradius [m], E_{diff}: diffuse Bestrahlungsstärke [W/m²], E_g: globale Bestrahlungsstärke [W/m²], φ: Einstrahlwinkel der Strahlung zur Vertikalen [°], ε: Emissionsgrad [-], ς: Stefan-Bolzmann-Konstante ($5{,}76 \cdot 10^{-8}$ W/(m²·K⁴)), T_{Abs}: Absorbertemperatur [K], T_K: Lufttemperatur im Kollektor [K], T_A: Umgebungs- bzw. Außentemperatur [K], $k_{Leit/Konv}$: Proportionalitätskonstante zur Beschreibung der Wärmeverluste [W/K], $\dot{m}_K$: Massenstrom [Kg/s], c_p: Wärmekapazität [J/kg·K].

- **Stillstand**

Beim Sonderfall, dass die Anlage sich im Stillstand befindet, ist der Massenstrom Null und die absorbierte Wärme führt zur Erhitzung des Kollektors, bis die gesamte Einstrahlungsleistung durch die Verlustleistung ausgeglichen wird. Es tritt dann ein stationärer Zustand ein. Dabei dient der gesamte Kollektor mit seiner Masse als Wärmespeicher.

- **Anlaufverhalten**

Zur Beschreibung des Anlaufverhaltens des Kollektors wird näherungsweise davon ausgegangen, dass die Temperatur vor dem Einschalten im ganzen Absorber identisch ist. Wird die Pumpe eingeschaltet, so fließt während der Totzeit, die sich aus Rohrvolumen und Volumenfluss ergibt, die Wärmeträgerflüssigkeit konstanter Temperatur aus dem Kollektor. Erst nach Ablauf der Totzeit macht sich die am Kollektor herrschende Temperatur bemerkbar.

6.5.1.2 Wärmespeicher

Das zweite Element in der vereinfachten Kollektoranlage bildet der Wärmespeicher. Die Abbildung 59 gibt die Energieflüsse des Speichers wieder.

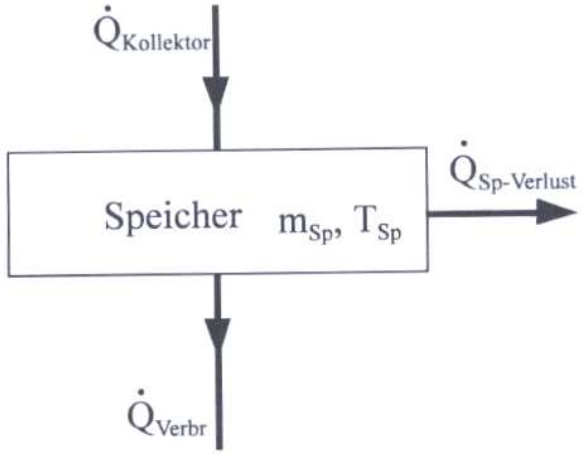

Abb. 59: Energieflüsse des Wärmespeichers

Die Energiebilanz für den Speicher lässt sich darstellen durch die vom Kollektor bereitgestellte Nutzleistung, die durch den Verbraucher entzogene Leistung sowie Speicherverluste. Die Verluste am Speicher setzen sich analog zum Kollektor zusammen aus Wärmestrahlung, Konvektion und Wärmeleitung [80]. Dementsprechend gilt für die Wärmemenge des Speichers:

$$\dot{Q}_{Sp} = \dot{Q}_{Kollektor} - \dot{Q}_{Verbr} - \dot{Q}_{Sp,Verluste} \quad [W] \qquad \text{(Gl. 6.16)}$$

mit $\dot{Q}_{Sp,Verluste} = \dot{Q}_{Sp,Abstr} + \dot{Q}_{Sp,Konv} + \dot{Q}_{Sp,Leit} = \varepsilon \cdot \varsigma \cdot A \cdot T_W^4 + a^*_{Sp}\, k \cdot A \cdot (T_W - T_U)$

mit: ε: Emissionsgrad [-], ς: Stefan-Bolzmann-Konstante ($5{,}76 \cdot 10^{-8}$ W/($m^2 \cdot K^4$)), A: Speicheroberfläche [m^2], T_W: Speicherwandtemperatur [K], a^*_{Sp}: Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2·K], k: Wärmedurchgangskoeffizient [W/m^2·K], T_U: Umgebungstemperatur [K].

Nach der Speichertemperatur T_{Sp} aufgelöst und durch Einsetzen der Verbrauchertemperatur im Ein- und Auslauf (T_{kalt}, $T_{heiß}$) des Speichers ergibt sich:

$$T_{Sp} = \frac{\dot{m}_K \cdot c_p \cdot (T_{Rück} - T_{Vor}) - \dot{m}_K \cdot c_p \cdot (T_{heiß} - T_{kalt}) - \dot{Q}_{Sp,Verluste}}{\dot{m}_K \cdot c_p} \quad [K] \qquad \text{(Gl. 6.17)}$$

mit: $\dot{m}_K$: Massestrom des Wärmeträgers [kg/s], c_p: spezifische Wärmekapazität [J/kg·K], $T_{Rück}$: Rücklauftemperatur [K], T_{Vor}: Vorlauftemperatur [K], $T_{heiß}$: Verbrauchertemperatur (heiß) [K], T_{kalt}: Verbrauchertemperatur (kalt) [K], $\dot{Q}_{Sp,\,Verluste}$: Speicherverluste [W].

Auf die Modellierung der Rohrleitungen wurde im Rahmen der Arbeit nicht eingegangen. Im Verlauf der Simulation wurden Wetter und Umgebungsumstände teilweise simuliert oder anhand von aufgenommenen Messwerten als Eingabe für die Simulation benutzt.

6.5.2 Bestimmung der Modellparameter

6.5.2.1 Kollektor

- **Transmissionsgrad τ_{Abdeck} der Kollektorabdeckung**

Zur Bestimmung des Transmissionsgrades der Kollektorabdeckung wurde eine Messreihe mit dem Strahlungssensor (Pyranometer CM11 der Fa. Kipp&Zonen, Delft (NL)) aufgenommen. Hierbei wurde die für die Simulation ausgewählte transparente Abdeckung aus PMMA in Abständen von zwei Minuten über den Strahlungssensor gelegt und wieder entfernt, und dabei die Globalstrahlung gemessen. Um eine möglichst gleichbleibende Einstrahlung zu erzielen, wurde diese Messung am einem wolkenfreien Mai-Tag durchgeführt.

Die Bestimmung des Transmissionsgrades stellt eine Vereinfachung dar. Wegen der gekrümmten Oberfläche der Abdeckung ist der Einstrahlwinkel an jedem Punkt der Abdeckung anders und damit auch der Transmissionsgrad. In dem Versuch wurde die Abdeckung so über den Pyranometer plaziert, dass dieser sich im Zentrum der Bodenfläche der Abdeckung befand. Demnach wurde der Transmissionsgrad für senkrecht auf die Abdeckung einfallende Strahlung bestimmt.

Die Abbildung 60 zeigt das Ergebnis dieser Messreihe. Man kann anhand der Einbrüche im Verlauf der gemessenen Strahlung erkennen, dass der Sensor dreimal mit der Kollektorabdeckung abgedeckt wurde. Betrachtet man die Phasen ohne Abdeckung, kann man erkennen, dass die Einstrahlung mit der Zeit stetig leicht anstieg. Dies ist auf den täglichen Verlauf der Einstrahlung mit dem Sonnenstand zurückzuführen.

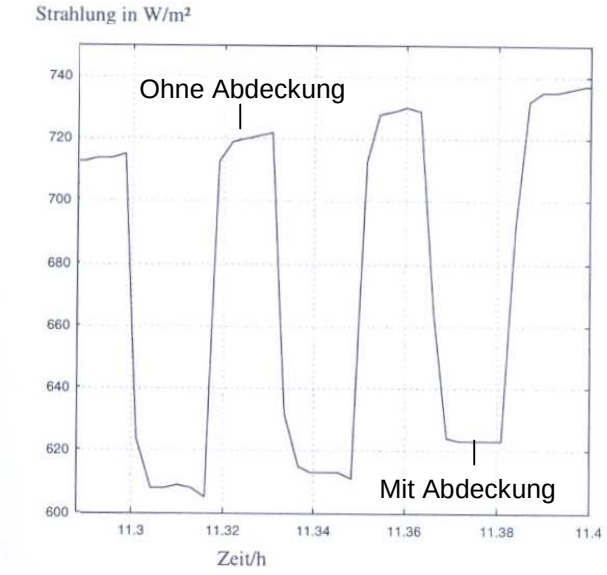

Abb. 60: Bestimmung des Transmissionsgrades der Kollektorabdeckung

Der Transmissionsgrad τ_{Abdeck} lässt sich darstellen als Verhältnis der Einstrahlung, die durch die Abdeckung dringt und der Einstrahlung, die ungehindert den Sensor erreicht:

$$\tau_{Abdeck} = \frac{E_{Abdeck}}{E} \qquad [W] \qquad \text{(Gl. 6.18)}$$

mit: E_{Abdeck}: Strahlung mit Abdeckung [W/m²], E: Strahlung ohne Abdeckung [W/m²].

Zur Berechnung von τ_{Abdeck} wird jeweils der Mittelwert der Einstrahlung kurz vor und nach Aufbringen der Abdeckung genommen (Abb. 60).
Es wird nun nacheinander für jeweils ein Mittelwertpaar der Strahlung ohne Abdeckung und dem darauffolgenden Wert mit Abdeckung der Transmissionsgrad bestimmt.

$$\tau_{Abdeck,1} = \frac{608}{706} = 0{,}853 \qquad \tau_{Abdeck,2} = \frac{613}{706} = 0{,}851 \qquad \tau_{Abdeck,3} = \frac{623}{706} = 0{,}853$$

Die drei Werte stimmen fast exakt überein. Durch Mittelwertbestimmung wurde der Wert der Transmissionsgrad bestimmt zu:

τ_{Abdeck}=0,852

- **Bezugsfläche des Kollektors**

Zur Berechnung der absorbierten Strahlung und der Kollektorverluste werden die Flächeninhalte verschiedener Oberflächen benötigt. Die Berechnung der Flächen wird für je ein Kollektorpaar berechnet. Zur Berechnung der projizierten Fläche wird die Bodenfläche A_{Boden} benötigt. Dieser ergibt sich als Kreisfläche mit Absorberradius multipliziert mit der Zahl Zwei:

$A_{Boden} = \pi \cdot r^2_{Abs} = \pi \cdot (0{,}35m)^2 = 0{,}38\ m^2$

Für die Absorberverluste aber auch für die Absorption diffuser Strahlung ist die Halbkugelfläche A_{Abs} des Absorbers entscheidend:

$A_{Abs} = 2 \cdot \pi \cdot r^2_{Abs} = 0{,}77\ m^2$

Für die Berechnung der Konvektionsverluste wird die Halbkugeloberfläche der Abdeckung A_{Abdeck} benötigt:

$A_{Abdeck} = 2 \cdot \pi \cdot r^2_{Abdeck} = 2 \cdot \pi \cdot (0{,}4\ m)^2 = 1\ m^2$

- **Parameter zur Berechnung der Kollektorverluste**

Die Berechnung der Kollektorverluste erfolgt in der Simulation durch folgende Ausdrücke:

$$\dot{Q}_{Abstr} = k_{Abstr} \cdot T_{Abs}^4 \qquad \text{(Gl. 6.19)}$$

$$\dot{Q}_{Leit/Konv} = (T_K - T_A)\ A_{Abdeck} \cdot k_{Leit/Konv} \qquad \text{(Gl. 6.20)}$$

mit: k_{Abstr}: Proportionalitätskonstante zur Beschreibung der Kollektorwärmeabstrahlung [W/K^4], T_{Abs}: Absorbertemperatur [K], T_K: Lufttemperatur im Kollektor [K], T_A: Umgebungs- bzw. Außentemperatur [K], A_{Abdeck}: halbkugelförmige Abdeckungoberfläche [m²], $k_{Leit/Konv}$: Proportionalitätskonstante zur Beschreibung der Wärmeverluste [W/K].

Die Parameter k_{Abstr} und $k_{Leit/Konv}$ können leider nicht einzeln bestimmt werden, da in der Regel beide Verluste gleichzeitig auftreten. Es wurde vereinfacht angenommen, dass die beiden Verluste bei Stillstand der Anlage identisch sind. Es wurde der Versuch durchgeführt, bei dem die Kollektoren im Stillstand betrieben wurden und die Kollektortemperatur sowie Einstrahlung aufgezeichnet wurden. Da die diffuse Strahlung nicht gemessen wird, wurde die absorbierte Strahlungsleistung geschätzt und mit der erreichten Kollektortemperatur die Parameter k_{Abstr} und $k_{Leit/Konv}$ bestimmt. Er ergab sich:

$k_{Abstr} = 2{,}13 \cdot 10^{-8}\ W/K^4$

$k_{Leit/Konv} = 2{,}92\ W/(K \cdot m^2)$

6.5.2.2 Wärmespeicher

Wichtige Parameter des Speichers sind das gesamte Speichervolumen, das Volumen des unteren Wärmetauschers (Abb. 18) sowie der Wärmeübergangskoeffizienten am unteren Wärmetauscher (zwischen dem Wärmeträger im Wärmetauscher und im Speicher) zur Berechnung der Verluste.

Das Volumen des Gesamtspeichers ergibt sich mit 500 Liter durch dessen Baugröße. Das untere Wärmetauschervolumen wurde empirisch mit den Messvolumen zu 50 Liter ermittelt.

Der Wärmeübergangskoeffizient des Speichers wurde ebenfalls empirisch ermittelt. Hierzu wurde der Temperaturverlauf des aufgeheizten Speichers über 16 Stunden aufgezeichnet. Die Anlage war während dieser Zeit ausgeschaltet, so dass sich der Speicher nur aufgrund der Verluste abkühlte. Es ergab sich ein Wärmeübergangskoeffizient zu:

$a^*_{Sp}=0{,}7269\ W/(K\cdot m^2)$

6.5.3 Auswertung und Vergleich der simulierten und gemessenen Messdaten

In diesem Kapitel werden exemplarisch einzelne Simulationsergebnisse verglichen mit experimentell bestimmten Ergebnissen der wesentlichen Komponenten Kollektor und Wärmespeicher vorgestellt. Hierbei werden als Eingangssignale zum Teil künstliche Signale, zum Teil auch Messsignale verwendet. Die Verwendung von Messsignalen hat den Vorteil, dass das Ausgangssignal des Simulationsblockes direkt mit dem gemessenen Ausgangssignal der realen Anlage verglichen werden kann, wobei das Modell neben der Globalstrahlung auch die diffuse Strahlung als Eingangsgröße verwendet wird.

6.5.3.1 Kollektor

Für die Auswertung der experimentell gemessenen und simulierten Daten sind prinzipiell drei unterschiedliche Betriebszustände zu betrachten:

- Anlaufphase
- Betriebsverhalten
- Anlagenstillstand

6.5.3.1.1 Anlaufphase

In der Anlaufphase, d.h. wird die Anlage in Betrieb genommen, fließt das im Kollektor erhitzte Wasser in den Speicher und wird durch kaltes Wasser aus dem Vorlauf im Kollektor ersetzt. Dadurch erreicht die reale Anlage aufgrund der langfristig gespeicherten Energie kurzfristig einen Wirkungsgrad von mehr als 100 %, obwohl dies per Definition nicht möglich ist. Während den nächsten Wasserkreislaufzyklen wiederholen sich diese Schwankungen mehrmals, jedes Mal mit abnehmender Intensität.

Die Abbildung 61 zeigt das Anlaufverhalten, welches durch eine Simulation erzeugt wurde, d.h. auch die Eingangsgröße $T_{Vor,1}$ ist eine durch die Simulation erzeugte Größe. Man erkennt an dem Sprung von $T_{Rück,1}$ bei t=10,2 Stunden den Einschaltpunkt. $T_{Rück,1}$ springt auf die Temperatur, die der Absorber durch die Sonneneinstrahlung zu diesem Zeitpunkt erreicht hat. Diese Temperatur wird für die Dauer der Totzeit des Kollektor ausgegeben, bis sich die am Anfang noch niedrige Vorlauftemperatur am Rücklauf des Kollektors durch einen Temperatureinbruch bemerkbar macht. Nachdem das noch kalte Wasser aus den

Rohrleitungen des Vorlaufes durch wärmeres aus dem Wärmetauscher verdrängt ist, steigt auch die Vorlauftemperatur wieder an. Dies erkennt man mit entsprechender Verzögerung auch bei der Rücklauftemperatur, die dann ebenfalls wieder ansteigt.

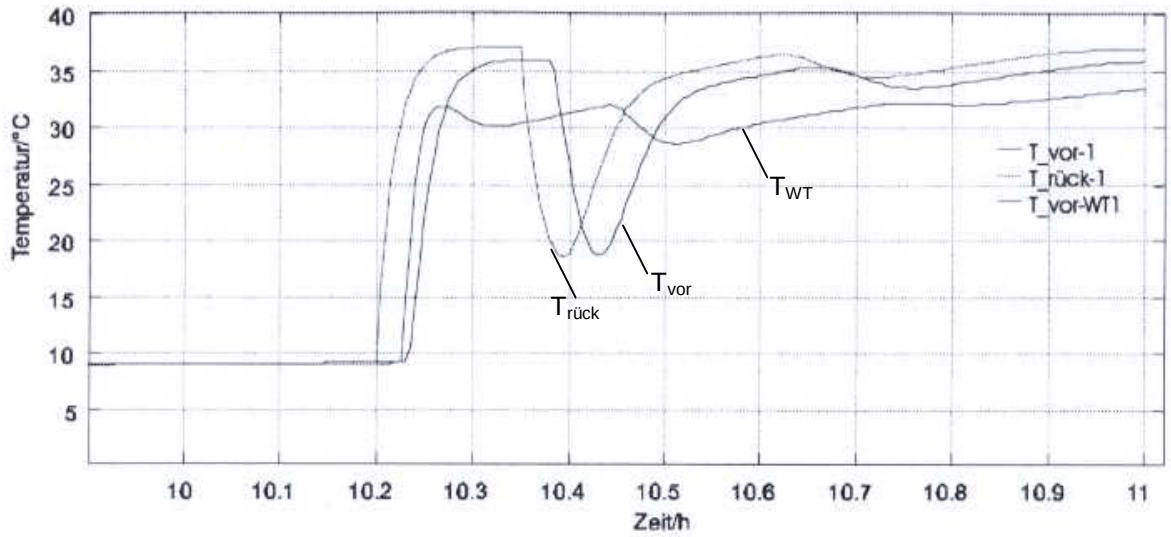

Abb. 61: Anlaufverhalten Kollektorpaar 1 (Simulation)

Abbildung 62 zeigt zum Vergleich den gemessenen Verlauf von einem Einschaltvorgang. Qualitativ stimmen die Verläufe gut überein. Allerdings fällt der Einbruch von $T_{Rück,1}$ in der Simulation wesentlich stärker aus. Im Modell wird die auf die Rücklauftemperatur glättend wirkende Absorbermasse für den Betriebsfall durch ein PT1-Glied berücksichtigt.

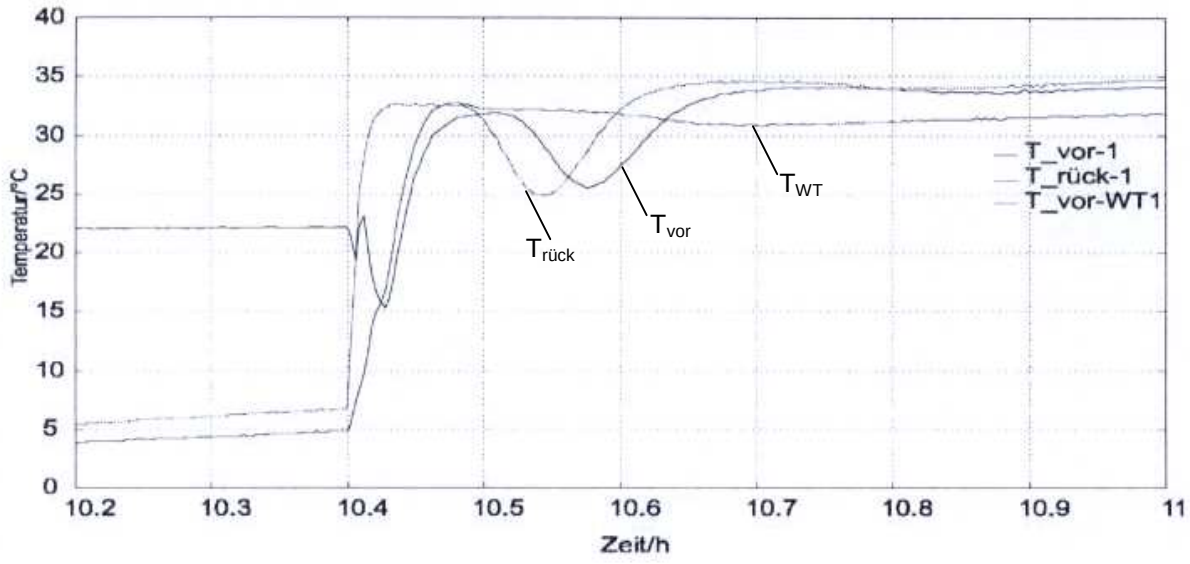

Abb. 62: Anlaufverhalten Kollektorpaar 1 (Messwerte)

Eine Wirkungsgradbestimmung macht erst Sinn, wenn die Anlaufphase bzw. der Einschwingprozess beendet ist. Dieser Einpendlungsprozess ist abhängig vom Massenstrom des Wärmeträgers (Wasser) und der im Kollektor befindlichen Wassermenge. Eine in der Praxis bewährte Faustregel besagt, dass der Einschwingprozess die 5-fache Dauer der Kollektorkonstante (Kollektordurchströmungsdauer) hat. Haben beispielsweise die eingesetzten Kollektoren ein Wärmeträgervolumen von 12 Liter und die Durchflussgeschwindigkeit beträgt 1

Liter pro Minute, so benötigt der Wärmeträger 12 Minuten ($\tau_{Kollektor}$) um den Kollektor zu durchströmen. Daraus folgt eine benötigte Einpendeldauer $\tau_{Einschwing}$ von einer Stunde, bis zuverlässige Messwerte erhalten werden können.

6.5.3.1.2 Betriebsverhalten

Die nachfolgenden Abbildungen 63 bis 66 zeigen exemplarisch die Simulationsergebnisse des Betriebsverhaltens des Kollektors im Vergleich zu Messwerten für zwei Versuchstage im April und August. Als gemessene Eingangsdaten wurden dem Simulationsblock die Außentemperatur T_A, die Vorlauftemperatur T_{Vor}, die Globalstrahlung E_g sowie der Durchfluss F, der bei 1 l/min lag, aufgenommen. Da die diffuse Strahlung für die Versuchsreihen messtechnisch nicht kontinuierlich erfasst werden konnte, wurde diese für die Simulation zu konstant 150 W/m² angenommen.

- **Versuchsreihe 1: Monat April 2004**

Die gemessene Globalstrahlung ist für den Versuchstag in Abbildung 63 dargestellt. An dem glatten Verlauf der Globalstrahlung erkennt man, dass der Himmel an diesem Tag nahezu wolkenfrei war.

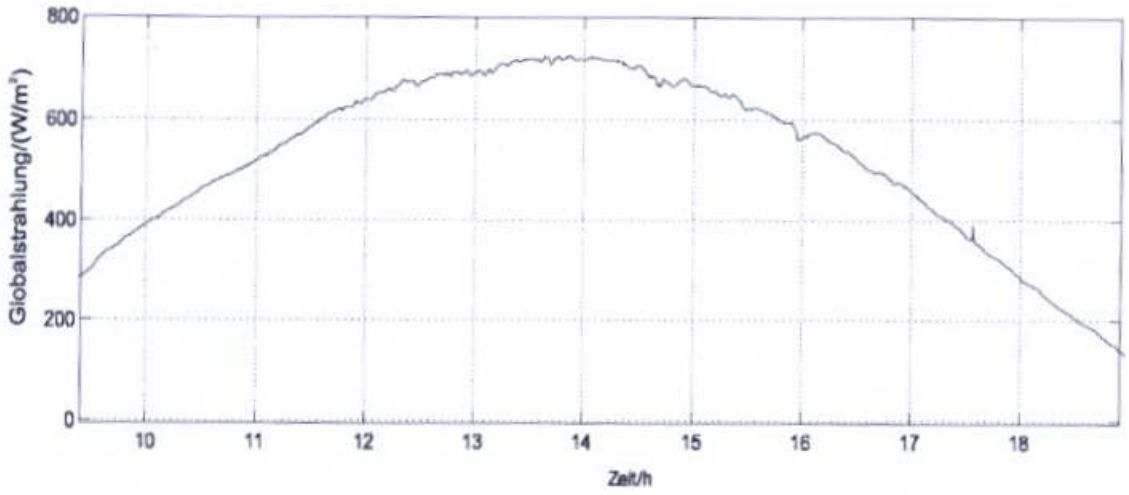

Abb. 63: Ermittelte Globalstrahlung (Monat April 2004)

In der Abbildung 64 sind sowohl die gemessenen Größen wie auch die simulierte Rücklauftemperatur dargestellt.

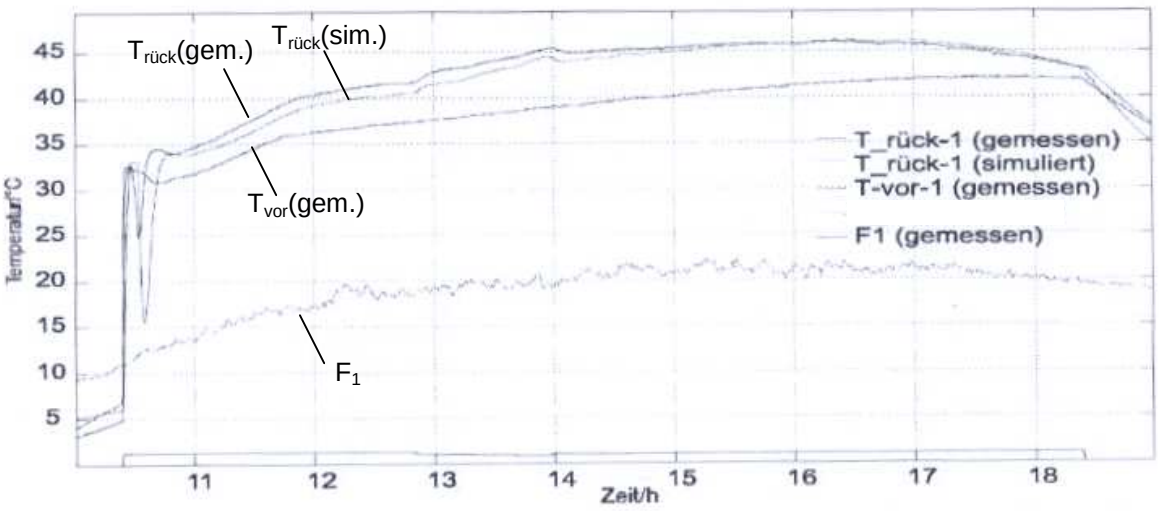

Abb. 64: Simuliertes Betriebsverhalten im Vergleich mit Messergebnissen für einen April-Tag

Die Abbildung 64 gibt zu erkennen, dass um ca. 10:20 Uhr die Pumpe eingeschaltet wurde und zu Beginn das typische Einschwingverhalten der Rücklauftemperatur des Kollektors. Wie erwähnt, schwingt die simulierte Rücklauftemperatur stärker als die gemessene Größe. Nachdem die Einschwingvorgänge um ca. 11:00 Uhr abgeklungen sind, verlaufen die simulierte und gemessene Rücklauftemperatur $T_{Rück}$ bis etwa 14:00 Uhr parallel, wobei die simulierte Rücklauftemperatur etwa 1 ℃ niedriger ist. Im Ansc hluss daran nähern sich die beiden Temperaturen an und verlaufen ab ca. 15:30 Uhr bis zum Zeitpunkt des Abschaltens auf einer Linie.

- **Versuchsreihe 2: Monat August 2004**

Die nachstehende Abbildung 65 zeigt den zeitlichen Verlauf der Globalstrahlung für einen Versuchstag im August. Der unruhige Verlauf gibt zu erkennen, dass es sich um einen Tag mit aufgelockerter Bewölkung handelt. Die Globalstrahlung erreicht Spitzenwerte von 1.000 W/m², bricht allerdings bei Wolken immer wieder bis auf unter 300 W/m² ein.

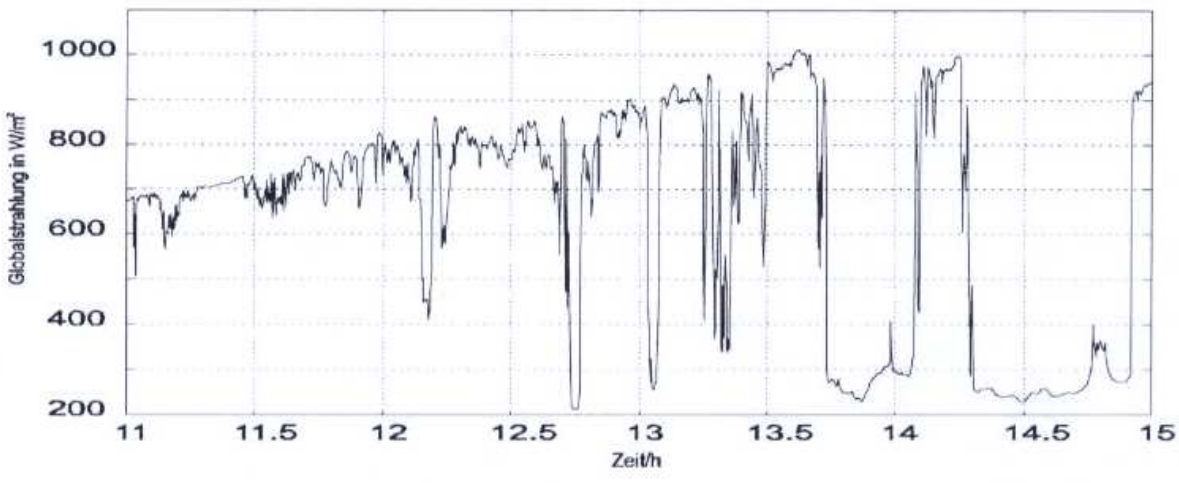

Abb. 65: Ermittelte Globalstrahlung (Monat August 2004)

Die Abbildung 66 zeigt den simulierten Verlauf der Kollektorrücklauftemperatur im Vergleich mit den Messergebnissen für den Versuchstag im August 2004.

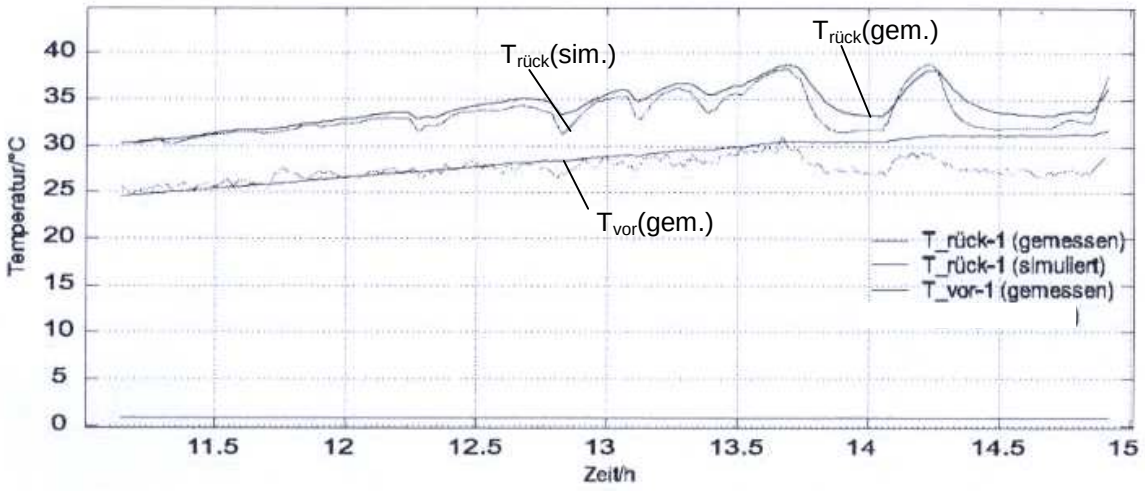

Abb. 66: Simuliertes Betriebsverhalten im Vergleich mit Messergebnissen für einen August-Tag

Die Simulationsergebnisse für die Phase hoher Einstrahlung korrelieren mit den gemessenen. Bei den Einbrüchen der Globalstrahlung sinkt die Rücklauftemperatur in der Simulation allerdings viel stärker ab als bei der realen Anlage. Dies liegt an der Annahme konstanter diffuser Einstrahlung. Diese Annahme trifft für wolkenfreie Tage zu, bei aufgelockerter Bewölkung jedoch schwankt die diffuse Strahlung erheblich. So ist anzunehmen, dass in dem Moment, in dem die Sonne von einer Wolke verdeckt wird, sich die Globalstrahlung zu einem größeren Teil aus diffuser Strahlung und einem geringen Teil direkter Strahlung zusammensetzt. Da bei der Absorption diffuser Strahlung die gesamte Absorberoberfläche Bezugsfläche ist, wird von der realen Anlage mehr Energie aufgenommen als von dem Simulationsmodell bei dem die diffuse Strahlung konstant angenommen ist.

6.5.3.1.3 Anlagenstillstand

Der Stillstand einer Anlage kommt dann zustande, wenn die aufgenommene Wärmeenergie geringer ist, als die des Speichers. Dieser Fall tritt immer dann auf, wenn die Kollektoren z.B. während der Nacht oder eines bewölkten Himmels abgedunkelt werden. Während des Anlagenstillstandes gleicht sich die Wassertemperatur im Kollektor in der Regel der Umgebungstemperatur an. Daher macht die Inbetriebnahme der Anlage nur dann Sinn, wenn $T_{Kollektor} \geq T_{außen}$.

Schaltet man die Anlage bei Tage bei normaler Sonneneinstrahlung ab, so beginnt sich das Wasser im Kollektor bis zu dem Punkt zu erhitzen, bei dem die Wärmeabstrahlung und die Konvektion sämtliche aufgenommene Energie wieder freisetzen. Im Falle der getesteten halbkugelförmigen Kollektoren erwärmte sich das Wasser in den Kollektoren im Stillstand auf eine Temperatur von ca. 80 °C bei einer mittleren E instrahlung von 800 W/m^2.

6.5.3.2 Wärmespeicher

Die nachfolgende Abbildung 67 gibt exemplarisch das Ergebnis der Simulation des Speichers inkl. Wärmetauschers mit Messwerten eines April-Tages 2004 als Eingangsgröße wieder. Zum Vergleich sind die Messverläufe der dargestellten Messgrößen in der Abbildung 68 wiedergegeben. Als gemessene Größe wurden die Vorlauftemperatur des Wärmetauschers $T_{Vor\text{-}WT}$ und der gesamte Durchfluss F_{ges} der drei Kollektorpaare auf den Eingang des Systems eingesetzt. Der Durchfluss ist nicht in der Abbildung 67 eingezeichnet. Dieser war bis t=10,4 Stunden null. Anschließend wurde die Anlage eingeschaltet, der Durchfluss lag bei 3 l/min. Die Raumtemperatur T_U lag bei 20 °C. Weiterhin wurde eine initiale Speic hertemperatur von 35 °C eingestellt, um die gleichen Anfangsbedingungen zu erreichen, wie sie bei dem gemessenen Verlauf vorgelegen haben.

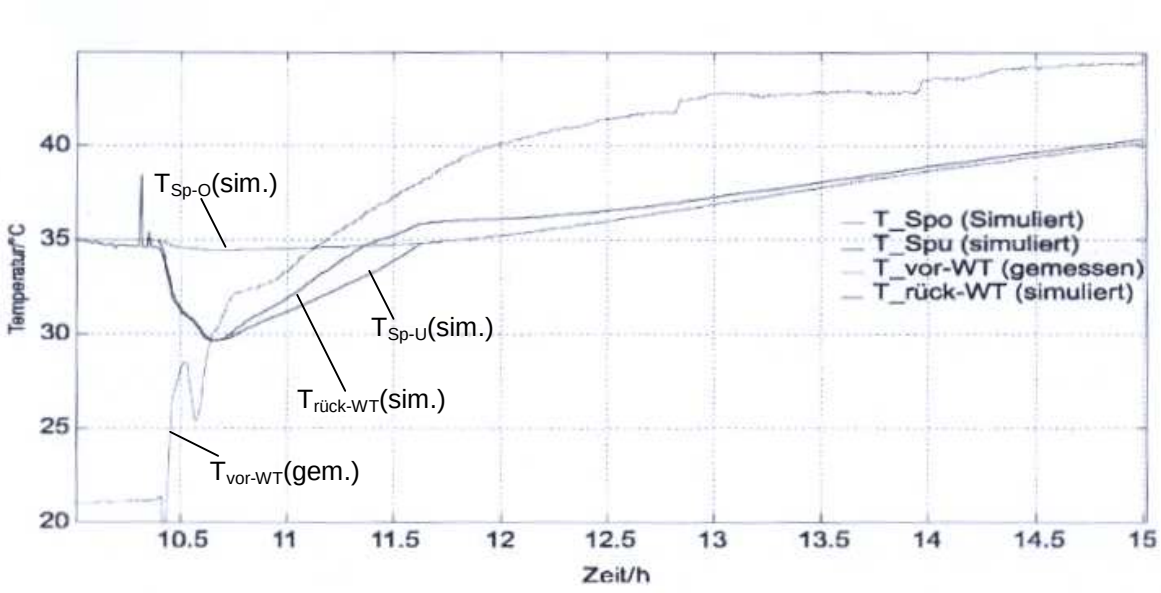

Abb. 67: Speichersimulation mit gemessenen Eingangswerten für einen April-Tag (2004)

Als erstes soll in der Abbildung 67 die obere Speichertemperatur ($T_{Sp\text{-}O}$) bei einem Wasserspeichervolumen von 500 Liter betrachtet werden. Da in der Simulation die obere Speichertemperatur als mittlere Speichertemperatur realisiert ist, sinkt diese ab, wenn beim Einschalten zunächst kaltes Wasser durch den Wärmetauscher in den Speicher strömt. Dieser Temperaturabfall fällt jedoch wegen der hohen Speichermasse sehr gering aus (<1 K). Bei den Messwerten wirkt sich der Einschaltvorgang nicht auf die obere Speichertemperatur aus.

Um 11:45 Uhr erreicht die simulierte Größe $T_{Sp\text{-}O}$ wieder die 35 °C und beginnt ab da an annähernd linear zu steigen. Dies ist auch der Zeitpunkt, in dem der Kurvenverlauf für die gemessene Temperatur ($T_{Sp\text{-}O}$) einen Knick aufweist und zu steigen beginnt. Um 15:00 Uhr erreichen sowohl die simulierte obere Speichertemperatur als auch die gemessene mit sehr geringer Abweichung 40 °C.

Die weitere Größe, die beurteilt werden soll, ist die untere Speichertemperatur ($T_{Sp\text{-}U}$) bei einem Wasserspeichervolumen von 50 Litern. In der Phase, in der dem Speicher Energie entzogen wird, wird die gesamte Verlustenergie auf den unteren Speicher umgelegt, so dass die untere Speichertemperatur erheblich tiefer absinkt, als die obere Speichertemperatur. Wenn danach dem Speicher so viel Energie zugeführt wird, wie ihm beim Anfahren entzogen wurde,

schneidet T_{Sp-U} die Kurve von T_{Sp-O}. Dies ist kurz nach halb zwölf der Fall. Ab diesem Zeitpunkt verläuft T_{Sp-U} genau auf der Linie von T_{Sp-O}.

Vergleicht man experimentell gemessenen Werte (Abb. 68) mit den simulierten (Abb. 67) für den selben Tag, erkennt man, dass die Verläufe der simulierten und gemessenen Kurven von T_{Sp-U} ähnlich sind. Allerdings verläuft die gemessene Kurve am Ende flacher in Richtung T_{Sp-O}. Die simulierte Kurve fällt beim Einschaltvorgang ca. 1,5 ℃ tiefer ab als die gemessene Kurve. Hier könnte durch eine Anpassung des Speichervolumens des unteren Speicher hin zu größeren Werten eine Korrektur vorgenommen werden.

Ebenso wie die untere Speichertemperatur fällt auch die simulierte Rücklauftemperatur des Wärmespeichers/-tauschers ($T_{Rück-WT}$) im Vergleich mit den gemessenen etwas zu tief aus, da diese in der Anfangsphase durch einen guten Wärmeübergang vom Wärmetauscher zum unteren Speicherbereich stark an die untere Speichertemperatur gekoppelt ist. Die Verläufe der simulierten und gemessenen Kurven sind sehr ähnlich. Beispielsweise tritt der Knick von $T_{Rück-WT}$ in der Simulation und bei den Messwerten zum gleichen Zeitpunkt auf.

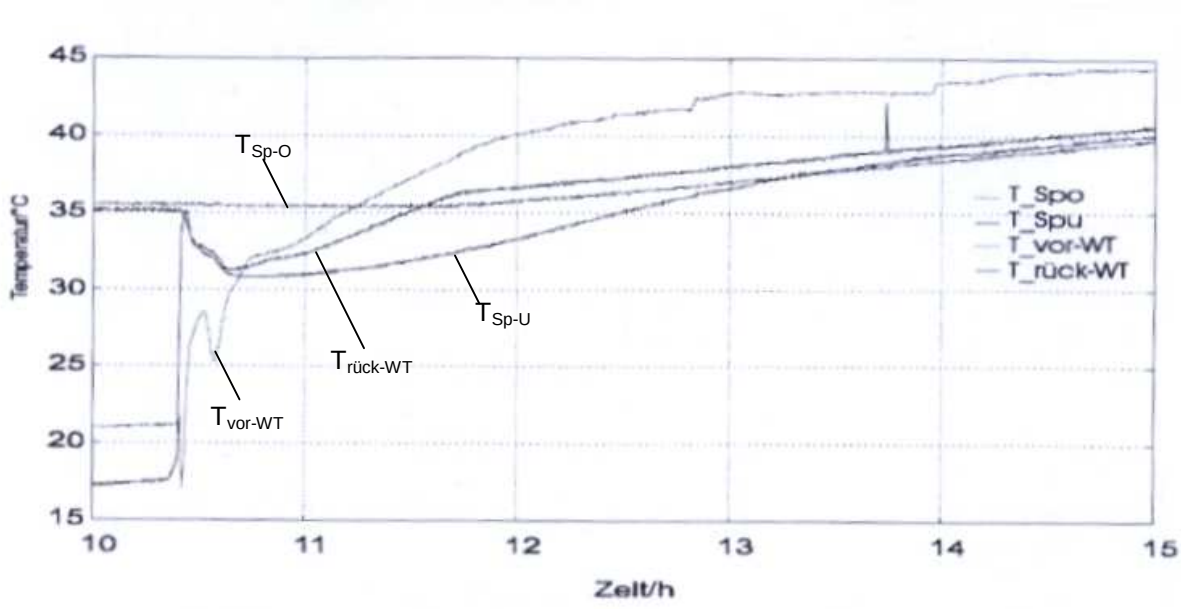

Abb. 68: Speichermesswerte für einen April-Tag

7. Entwicklung von Hochtemperaturkollektoren

7.1 Entwicklung der idealen Bauform

Wie im Kapitel 2 beschrieben, werden derzeit in der Hochtemperatur-Solarthermie hauptsächlich fokussierende Parabolrinnenkollektoren eingesetzt, welche - anders als die halbkugelförmigen Kollektoren in Kapitel 6 - durch ein sehr teures zwei- oder dreiachsiges Tracking-System kontinuierlich zur Sonne ausgerichtet werden müssen. Die Parabolrinnenkollektoren reflektieren bzw. fokussieren durch eine Spiegeloberfläche die Sonnenstrahlen auf ein Absorberrohr. Experimentelle Untersuchungen sowie mathematische Betrachtungen mit der Methode der Finiten-Elemente (FEM) [77, 78] mit handelsüblichen Parabolrinnenkollektoren machten jedoch deutlich, dass die derzeit eingesetzten Parabolrinnenkollektoren zwar technisch in der Lage sind, die Sonnenstrahlung genau auf eine Brennzone (Absorberrohr) zu fokussieren, jedoch aufgrund der robusten Bauweise sehr kostenintensiv in ihrer Bauweise sind. Darüber hinaus zeigten die Untersuchungen, dass die derzeitigen Kollektoren ohne Tracking-System jedoch nur dafür ausgelegt sind, senkrecht zum Absorberrohr einfallende Sonnenstrahlen in Richtung Absorberrohr zu fokussieren. Fallen die Sonnenstrahlen jedoch z.B. zu später Tageszeit schräg auf die Parabolrinne ein, so bildet sich der Fokus der reflektierten Strahlen zum Teil außerhalb der Parabol(fokus)rinne (Parafokus). Der Wirkungsgrad eines solchen Kollektors ist demnach sehr stark Tageszeit abhängig. Die Abbildung 69 soll dies verdeutlichen: Auf der linken Seite wird ein schräg einfallender Sonnenstrahl nach links in Richtung Kollektorstirnseite gelenkt. Dadurch kommt es außerhalb des Kollektors zu einer unkontrollierten Erwärmung der Peripherie mit einer möglichen Schädigung von Dichtungen oder anderen Elementen außerhalb des Kollektors. Auf der rechten Seite der Abbildung 69 wird ein senkrecht einfallender Sonnenstrahl durch die Parabolrinnenspiegelung in Richtung Absorberrohr reflektiert.

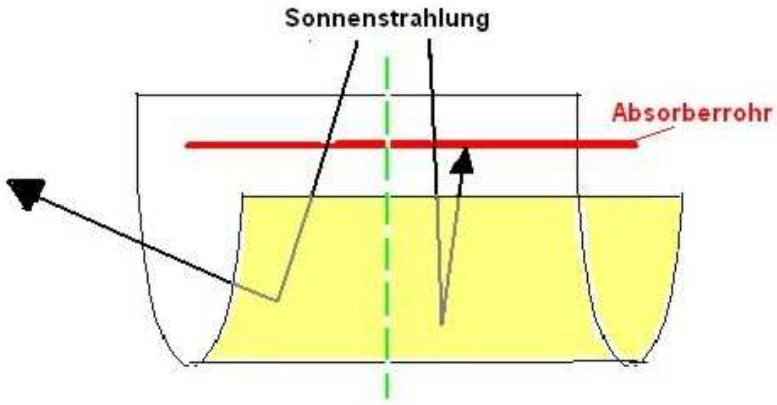

Abb. 69: Reflektion von Sonnenstrahlen
(l.: Schräg einfallender Strahl, r.: Senkrecht einfallender Strahl)

Prinzipiell hat die richtige Fokussierung entscheidenden Einfluss auf den Kollektorwirkungsgrad. Jede kleinste Abweichung vom optimalen Reflektionswinkel führt zwangsläufig zu Effizienzeinbußen. Die folgende Abbildung 70 zeigt dies schematisch: Auf der linken Seite der Abbildung treffen die senkrecht einfallenden Sonnenstrahlen oberhalb des Absorberrohres zusammen und damit auf eine i.d.R. daraufliegende transparente Kollektorabdeckung. Diese Fehlkonstruktion hat zur Folge, dass die Abdeckung aufgrund der thermischen Erwärmung beschädigt wird. Auf der rechten Seite der Abbildung 70 treffen die reflektierten Sonnenstrahlen unterhalb des Absorberrohres zusammen, so dass die Sonnenenergie auch hier nicht optimal genutzt werden kann.

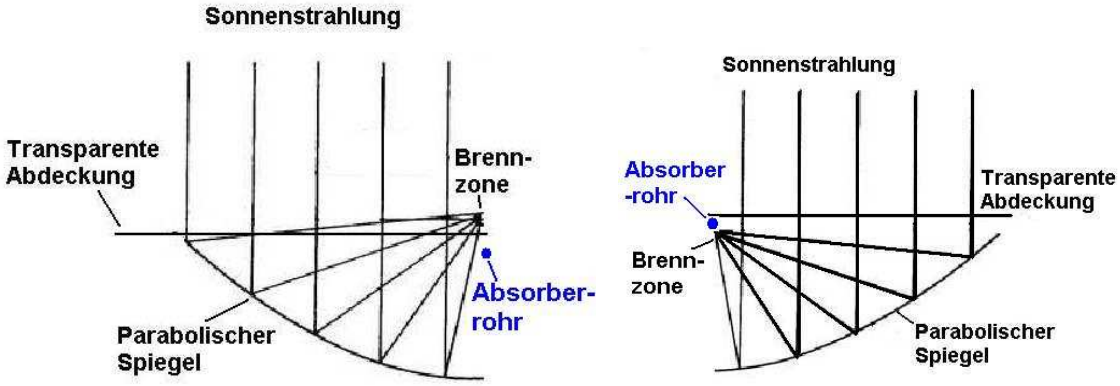

Abb. 70: Nicht axiale Lichtreflektion eines paraboloiden Spiegels

Im Anschluss an der Analyse der handelsüblichen Parabolrinnenkollektoren wurde die Methode der Finiten-Elemente eingesetzt, um paraboloide Sonnenkollektoren zu entwickeln, welche die Sonnenstrahlen Tageszeit unabhängig optimal auf einem Absorberrohr fokussieren. Damit sollte das Problem der größtenteils empirisch gebauten Kollektoren bei der Suche nach Methoden die Brennzone zu einer Ebene umzuwandeln oder die Spiegelfläche zu strecken, elegant umgangen werden.

Durch die FEM-Methode wurde sowohl die Geometrie als auch der Aufbau (Position des Absorberrohres) von Kollektoren mit verschiedenen (symmetrischen) Parabolöffnungen bestimmt. Als Basis der FEM-Methode diente die folgende Parabelgleichung (Gl. 7.1), die bereits die Fokussierung für Parabelrinnen enthält:

$$y = x^2 / 4f \qquad \text{(Gl. 7.1)}$$

mit: y: Höhenkoordinate, x: Längskoordinate, f: Brennweite.

Diese Basisformel setzt voraus:

- die Sonnenstrahlen treffen parallel zur Parabelspiegelachse ein,
- die Strahlen werden auf den Brennpunkt fokussiert,
- der Brennpunkt liegt auf der y-Achse.

Damit kann die Lage des Absorberrohres (Brennweite y) in Abhängigkeit von der Höhe und Öffnungsweite der Parabel berechnet werden.

Beispielhaft werden in nachfolgenden Abbildungen 71 zwei Berechnungen dargestellt, bei denen das Absorberrohr in und außerhalb der Spiegelfläche (Parabolrinne) liegt. Die Lage des Absorberrohres entspricht dabei dem Brennpunkt f, welcher in den Abbildungen 71 einen roten Kreis bildet.

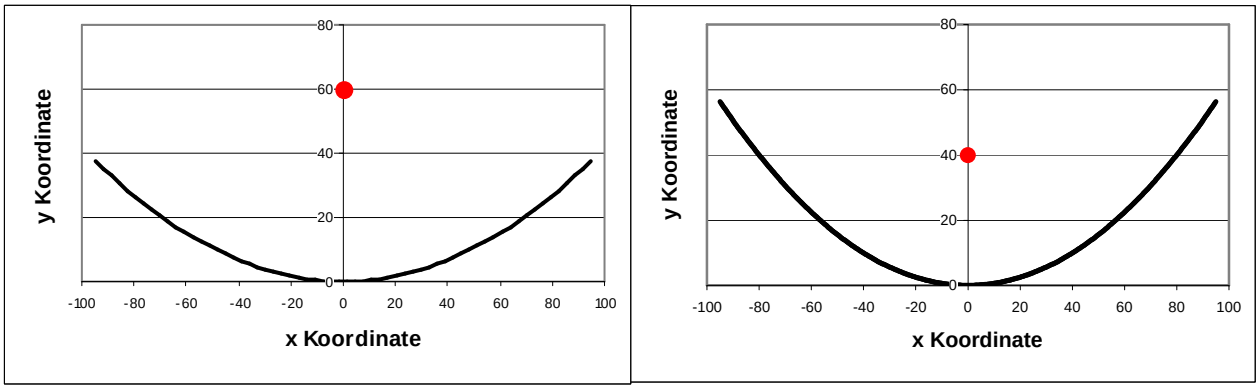

Abb. 71: Basisberechnung der Parabolrinnen (Brennpunkt f außerhalb (l.) und innerhalb (r.) der Parabolrinne)

Mit dieser sehr effektiven Methode konnte unter anderem die Position der Brennzone mathematisch mit einer Genauigkeit von kleiner einem Prozent bestimmt werden, so dass die eingefangenen Sonnenstrahlen unabhängig von der Tageszeit optimal auf das Absorberrohr fokussiert werden.

Im Anschluss an den mathematischen FEM-Berechnungen wurde das Ergebnis experimentell überprüft. Hierfür wurden Parabolrinnenkollektoren aus Holz mit einer Aluminium bedampften Polyesterfolie als Spiegelfläche eingesetzt. An den Stirnseiten wurden Spiegel eingesetzt, um eine Fokussierung im Parafokus der Sonnenstrahlung außerhalb der Reflektionsfläche zu vermeiden. Als Absorberrohr diente ein Kupferrohr. Die Parabolöffnungen betrugen 0,2 m, 0,4 m und 1,0 m.

Während den experimentellen Untersuchungen konnte optisch beobachtet werden, dass der Fokus der reflektierten Strahlung nicht wie mathematisch berechnet, eine kreisförmige Brennzone bildete. Es bildete sich statt dessen exakt um die berechnete „Fokuslinie“ am Absorber eine sogenannten „Kaustikzone“ (Brennzone). Durch eine umfangreiche Vektor- und Matrizenanalyse konnte die entstehende Kaustikkurve bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln berechnet und simuliert werden. Die folgenden Abbildungen 72 und 73 zeigen die durch die reflektierte Strahlung entstehende Kaustikkurve sowohl optisch (Abb. 72) als auch in einer Simulation (Abb. 73). In den Abbildungen wird sichtbar, dass die Kaustikkurve ein griechisches Alpha (α) bildet.

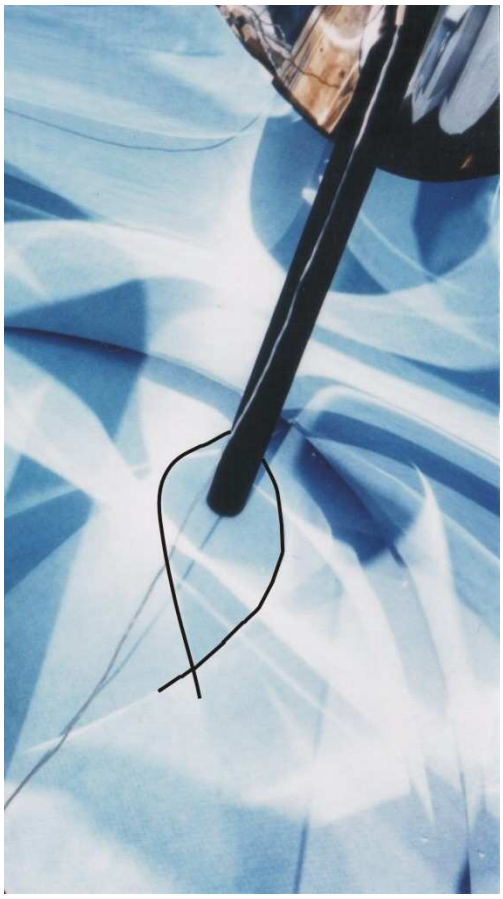

Abb. 72: Alphaförmige Kaustikzone im Fokus eines Parabolrinnenkollektors

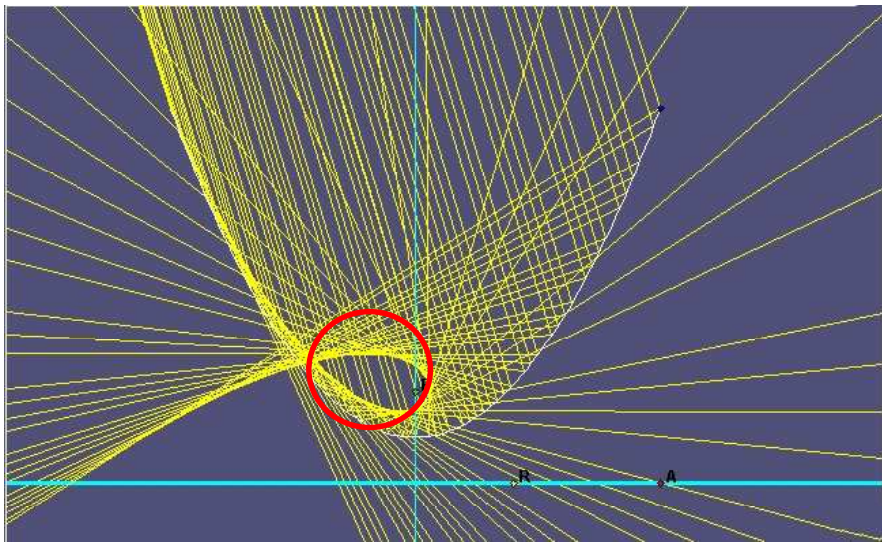

Abb. 73: Durch Strahlungsreflektion erzeugte alphaförmige Kaustikkurve (Simulation)

Die mathematische Berechnungen der Kaustikzone für verschiedene Parabolrinnenkollektormodelle ergaben, dass für die optimale Aufnahme der reflektierten Sonnenstrahlung der Durchmesser des Absorberrohres um den Faktor Fünf größer als der Durchmesser der (zuvor) berechneten kreisförmigen Brennzone sein sollte. Der Kreis in der Abbildung 73 demonstriert den erforderlichen Durchmesser des Absorberrohres für die dargestellte alphaförmige Kaustikzone.

7.2 Entwicklung von Prototypen

Ausgehend von den in Kapitel 7.1 beschriebenen FEM- und Matrizenberechnungen zur Bestimmung der optimalen Kollektorbauform wurden erste Prototypen entwickelt. Dabei musste zunächst eine Konstruktion zur Stützung der Spiegelfläche mit entsprechender Parabelöffnung und anschließend die entsprechenden Materialien für die Spiegelfläche und den Rohrabsorber entwickelt werden.

Gegenwärtig werden für die Spiegelflächen der Parabolrinnenkollektoren Metallbleche eingesetzt, welche durch Gießen, Schneiden und/oder Stanzen in ihre gewünschte Form gebracht werden. Dieser Herstellungsprozess hat jedoch einen gravierenden Nachteil: Aufgrund der während der Formgebung entstehenden Relaxationsspannung der Spiegelmaterialien, besteht die Gefahr, dass diese mit der Zeit ihre gewünschte (exakte) Parabelöffnung verlieren. Damit geht auch der ursprünglich gewünschte Öffnungswinkel der Parabolrinne verloren, so dass die Kollektorleistung mit zunehmender Zeit abnimmt. Daher wurde im Rahmen der Arbeit nach neuen Wegen gesucht, um eine Konstruktion zu entwickeln, welche die gewünschte Parabolöffnung dauerhaft garantiert.

Die experimentellen Untersuchungen führten zunächst zur Erstellung einer Styroporform, in welche ein dünnes Metallblech als Spiegel geklebt wurde. Das Metallblech wurde relaxationsspannungsfrei in die Styroporform befestigt, so dass die Spiegelform keine Beeinflussung durch den 3-achsigen Spannungszustand erfuhr. Als Prototypen wurden zunächst Kollektoren mit verschiedenen Parabelöffnungen (0,2 m, 0,5 m, 1,0 m) gebaut. Die Kollektoren mit 0,2 und 0,5 m Öffnung wurden mit einem selektiv schwarz beschichteten Kupferrohr als Absorber ausgestattet, der Kollektoren mit einer Öffnung von einem Meter mit einem schwarzen PVC-Rohr. Die nachstehende Abbildung 74 zeigt einen Prototyp mit vier parallelen Kollektoren bestehend aus einer Styroporform und einer (jeweiligen) Parabelöffnung von 0,2 m. Im Hintergrund der Abbildung 74 sind die verspiegelten Stirnseiten der Kollektoren zur Verbesserung des Kollektorwirkungsgrades erkennbar (siehe Kapitel 7.1).

Abb. 74: Erster Prototyp eines paraboloiden Spiegelkollektors

Der Einsatz der geschlossenen Styroporkonstruktion in Praxisversuchen zeigte, dass sich die Spiegelflächen und damit die Styroporform aufgrund der sich aufheizenden eingeschlossenen Luft auf bis 70 ℃ übermäßig erwärmte und verformte . Darüber hinaus verformte sich relativ schnell das PVC-Absorberrohr. Aus diesem Grunde wurde ein weiteres Konstruktionsmodell entwickelt, welches aus einem Rahmengestell aus Metall bestand, in welches ein dünnes Spiegelblech sowie ein Rohrabsorber in der Brennzone gesteckt wurden.

Die Fertigung der Rahmengestelleinzelteile (Platten, Stäbe) erfolgte durch eine Laserscheidmaschine und orientierte sich an den mathematischen Berechnungen zur Parabolöffnung und Kaustikzone. Anhand der Berechnungen konnten die Abmessungen der Einzelteile berechnet werden und diese in den Computer der Laserscheidmaschine eingegeben werden. In Anschluss daran wurden die gewünschten Gestelleinzelteile aus einer Edelstahlplatte mit einer Dicke von 2 mm ausgeschnitten. Die Abbildung 75 zeigt die lasergeschnittenen Einzelteilen. Die beiden unteren Teile in der Abbildung 75 sind für die (verspiegelte) Gestellenden (Kollektorstirnseite) bestimmt. Hierbei ist jeweils ein Loch zu erkennen, durch welches das Absorberrohr durchgesteckt wird.

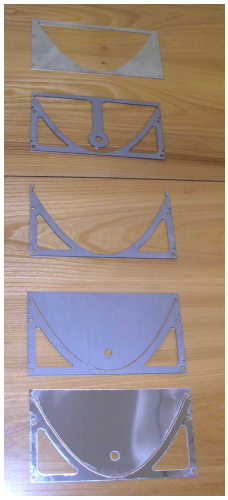

Abb. 75: Lasergeschnittene Einzelteile für den Aufbau eines paraboloiden Sonnenkollektors

In der Abbildung 76 sind zusammengebaute Gestelle für den Aufbau von einem bzw. vier Parabolspiegelkollektoren wiedergegeben. Durch die angewendete Laserschneidetechnik sowie die Art der gewölbten formschlüssigen Konstruktion war es möglich, die mathematisch kalkulierte Parabelöffnung (dauerhaft) mit einer Genauigkeit von ±0,2 % zu montieren. Prinzipiell ermöglicht die entwickelte Rahmenkonstruktion den Aufbau von paraboloidförmigen Kollektoren mit beliebiger Parabelöffnung, d.h. Kollektoren mit beliebiger Länge und Breite können für den Hausgebrauch oder auch für Solarkraftwerke montiert und voll funktionstüchtig gebaut werden.

Abb. 76: Edelstahlrahmenkonstruktion für einen bzw. vier paraboloide Sonnenkollektoren

Die Materialauswahl für die Spiegelfläche stellte anfangs ein Problem dar, da die Funktionstüchtigkeit der zunächst eingesetzten polierten Aluminiumbleche mit einer Dicke von 0,5 mm aufgrund einer raschen Oxidation zeitlich begrenzt war.

Eine weitere Versuchsreihe wurde mit einer Aluminium bedampften Kunststofffolie aus Polyester als Spiegelfläche durchgeführt. Da ein Teil der Sonnenenergie von der Folie absorbiert wurde, verformte diese sich jedoch nach kurzer Zeit.
Der Weg zur Ermittlung des optimalen Spiegelmaterials führte versuchsweise zu einem mittels Elektrophorese verspiegelten Aluminiumblech der Fa. Alanod (Ennepetal). Tests mit Prototypen mit Kupferrohrabsorber zeigten äußerst positive Ergebnisse. So konnte bei senkrechter Sonneneinstrahlung Wasserdampf mit einer Temperatur von etwa 120 ℃ erzeugt werden.
Ein weiterer Lösungsansatz führte zu einem Aluminiumblech (1 mm Dicke), welches mit einer elektrolytisch bedampften Aluminiumschicht versehen wurde. Die Spiegelfläche oxidierte nicht und wies darüber hinaus einen hohen Reflexionsgrad (>95 %) und geringen Ausdehnungskoeffizienten auf. Praxisversuche zeigten, dass dieses Material bis dato das am Geeignetste ist.

Die Umsetzung des mathematisch bestimmten Rohrabsorber-Außendurchmessers in der Kaustikzone stellte eine weitere Herausforderung dar. Die Berechnungen zeigten, dass beispielsweise für eine gewählte Parabelöffnung von 90 cm der Außendurchmesser 28 mm betragen muss. Versuche mit einem Kollektor mit diesen Ausmaßen zeigten jedoch, dass aufgrund des großen durchströmten Rohrquerschnittes und damit der großen transportierten Wärmeträgermenge, der Wärmeträger nicht auf die gewünschte Temperatur erwärmt werden konnte. Infolge dessen wurde eine temperaturbeständige Kupferdoppelrohrkonstruktion bestehend aus einem schwarz lackierten Außenrohr (∅ 28 mm) mit hohem Absorptionsgrad und einem Innenrohr (∅ 16 mm) entwickelt und eingesetzt. Der Wärmeträger strömt zwischen den Rohren. Die Abbildung 77 verdeutlicht die Konstruktion im Vergleich zu einem volldurchströmten Absorberrohr mit gleicher Absorberoberfläche. Die Abbildung 77 macht deutlich, dass bei gleicher Absorberoberfläche der durch den Wärmeträger durchströmte Querschnitt wesentlich geringer wird.

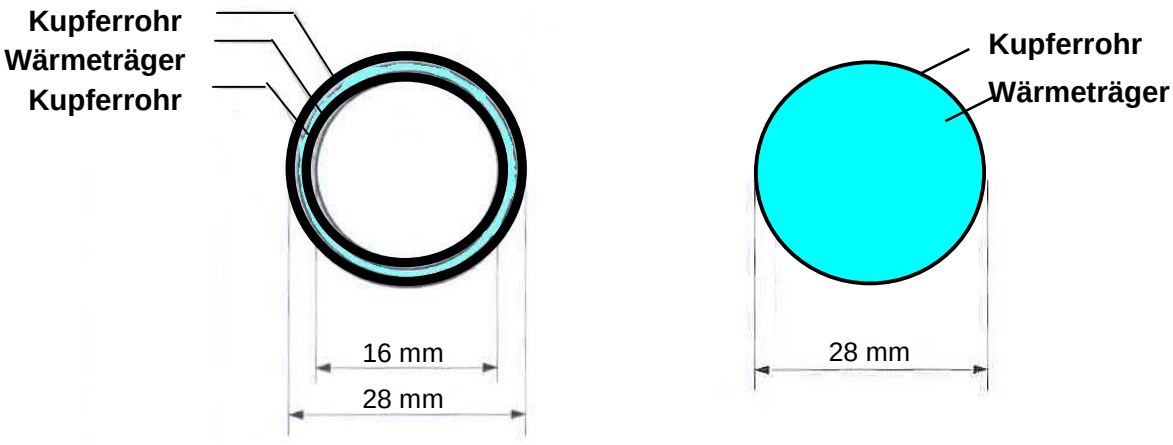

Abb. 77: Querschnitt (schematisch) eines Doppelrohrabsorber (l.) und Vollrohrabsorber (r.)

Da jedoch mit zunehmender Absorbertemperatur sowie Absorberfläche bzw. Emissionsfläche die Wärmeverluste des Absorbers steigen, wurde zu Versuchszwecken das Absorberrohr durch ein umgebendes hitzeresistentes Glasrohr (∅ 35 mm) der Fa. Schott, welches auch unter Vakuum gesetzt werden kann, gedämmt. Dadurch konnte der Wärmeverlust um 20 % reduziert werden.

Zur Reduzierung der Wärmeverluste wurden darüber hinaus verschiedene transparente Kollektorabdeckungen (PE-Folie, PMMA-Scheibe, Fensterscheibe) eingesetzt, auf welche in Kapitel 7.3.3.2 näher eingegangen wird.

7.3 Versuchergebnisse

7.3.1 Technikumversuche

7.3.3.1 Vermessung und Eichung der Lichtleistung des Versuchsprüfstandes

Bevor die fertig entwickelten Prototypen im Technikumprüfstand untersucht werden konnten, wurde zunächst die Lichtstärke des Prüfstandes ohne Kollektor bestimmt. Das Pyranometer befand sich für diese Untersuchung direkt unter einem Strahler, zwischen zwei Strahler sowie jeweils in einem 8 cm Abstand von diesen Positionen (Abb. 78, links). Die rechte Seite der Abbildung 78 zeigt die vom eingesetzten Pyranometer aufgenommene Lichtstärke als Funktion von dessen vertikalem Abstand zu den Strahlern.

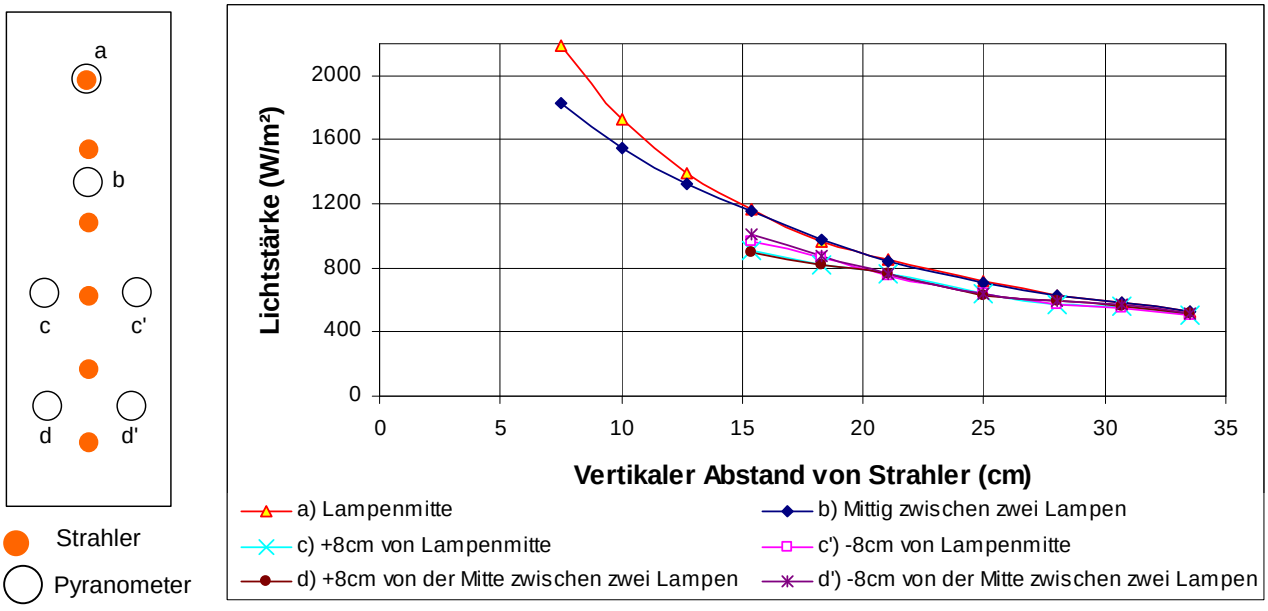

Abb. 78: Lichtstärke in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand zur Strahlungsquelle

Die Abbildung 78 lässt erkennen, dass die Lichtstärke parabolisch mit zunehmendem vertikalen Abstand des Pyranometer zur Lampe abnimmt. Die Lichtstärken nähern sich asymptotisch einer Lichtstärke von etwa 400 W/m² an. Weiterhin ist zu erkennen, dass ab einem vertikalen Abstand von etwa 15 cm die Position des Pyranometers – ob mittig unter einem Strahler (a) oder zwischen zwei benachbarten (b) – keinen Einfluss auf die aufgenommene Lichtleistung hat. Ab diesem vertikalen Abstand ist die Strahlungsleistung mittig zwischen zwei Lampen demnach mit einer Lampe identisch. Wird die Position des Pyranometers von einer dieser Positionen horizontal verschoben, so nimmt die aufgenommene Lichtleistung leicht ab.

Auf Basis der Lichtstärkenvermessung in Abbildung 78 konnte die von einem Parabolrinnenkollektor über seine gesamte Projektionsfläche von 1,0 x 0,2 m aufgenommene Lichtstärke bestimmt werden. Die gemittelte Lichtstärke ist in der Abbildung 79 als Funktion des vertikalen Abstandes zu den Lampen wiedergegeben. Die Funktion muss bei der Bestimmung eines jeden Kollektorwirkungsgrades berücksichtigt werden.

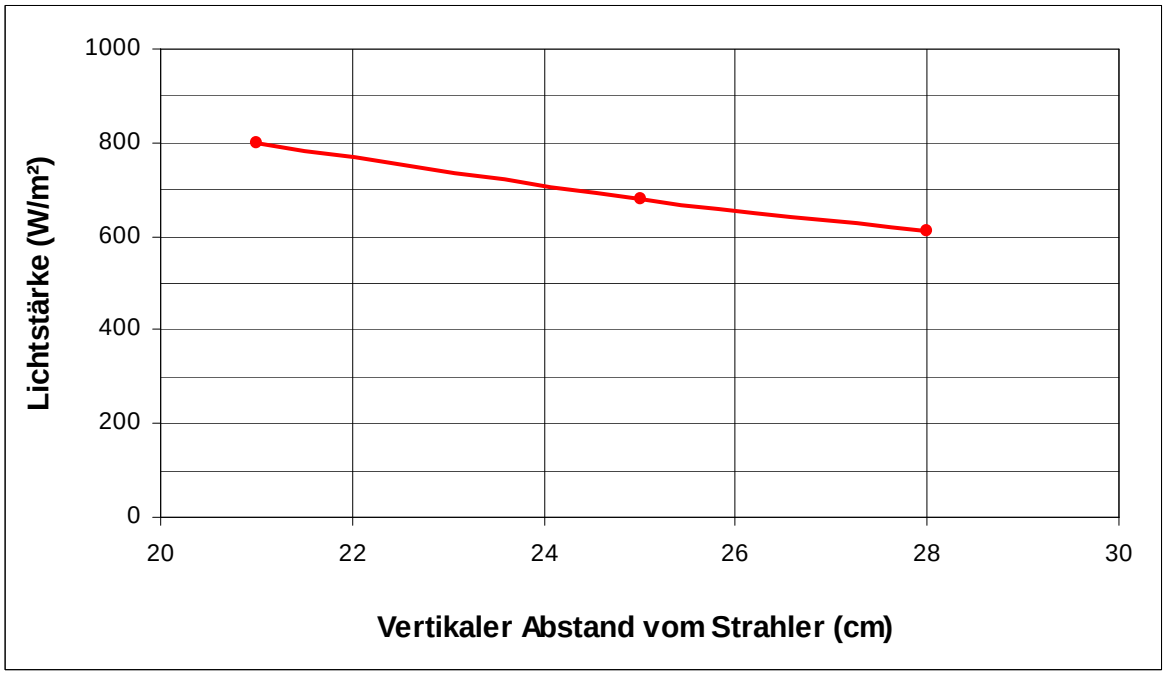

Abb. 79: Mittlere aufgenommene Lichtstärke eines Kollektors in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand zur Strahlungsquelle

Die nachfolgende Abbildung 80 zeigt die Lichtstärke mit zunehmender (horizontaler) Abweichung zur Strahlermitte. Der vertikale Abstand des Pyranometers zu den Strahler betrug 21,5 cm, 24,5 cm und 27,5 cm.

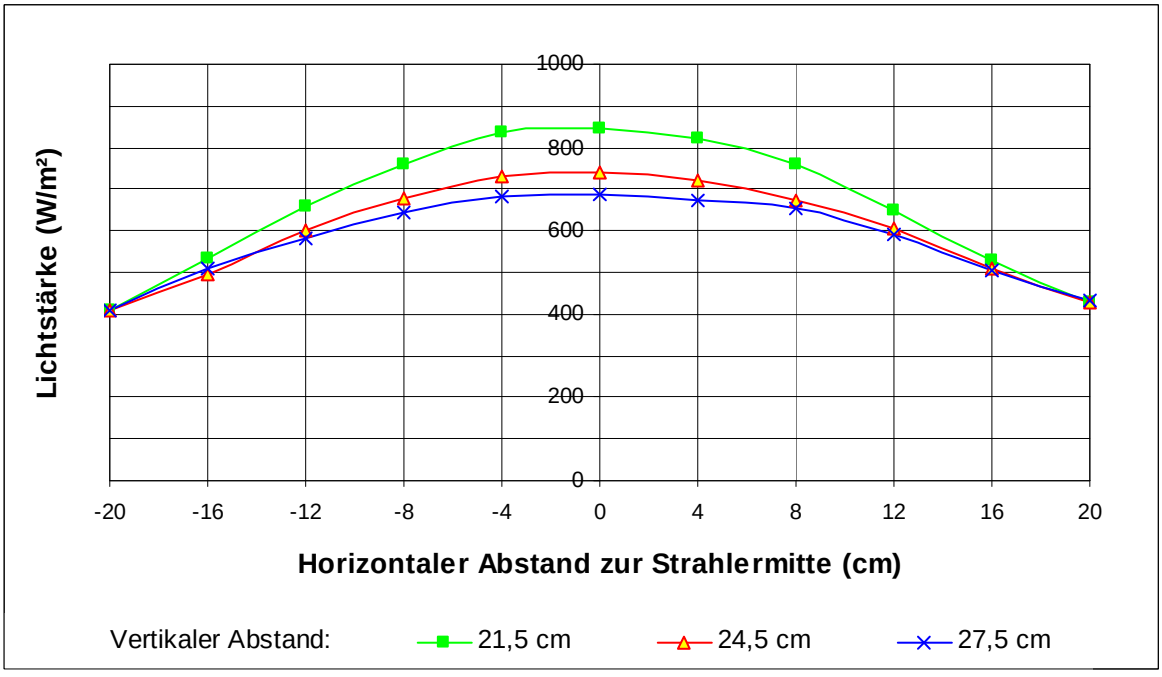

Abb. 80: Lichtstärke in Abhängigkeit von der Messposition außerhalb der Strahlermitte

Die Abbildung 80 offenbart eine hyperbelförmige Verteilung der Lichtstärke. Dabei nimmt die aufgenommene Lichtleistung mit zunehmendem horizontalem Abstand zur Strahlermitte ab. Darüber hinaus konnte beobachtet werden, dass bei einem horizontalen Pyranometerabstand zur Strahlermitte von über etwa 16 cm, die aufgenommene Lichtstärke für die gewählten vertikalen Abstände zu den Strahlern identisch ist.

7.3.3.2 Kollektorprüfung

Nach der Vermessung der Lichtstärke des Prüfstandes wurde der entwickelte Kollektor in den Prüfstand gelegt und untersucht. Die Kollektorvorlauftemperatur lag bei 16 °C. Zunächst wurde die Kollektorrücklauftemperatur als Funktion des vertikalen Kollektorabstandes zur Strahlungsquelle aufgenommen (Abb. 81). Dabei wurden teilweise zur Windsimulation ein Ventilator eingeschaltet sowie folgende transparente Kollektorabdeckungen eingesetzt [56] (Tab. 7):

Kollektorabdeckung	**Transmissionsgrad τ**
PMMA-Scheibe (Dicke: 4 mm)	84,0 %
Fensterglas (Dicke: 4,5 mm)	87,5 %
Polyethylenfolie (PE)	95,5 %

Tab. 7: Eingesetzte transparente HT-Kollektorabdeckungen

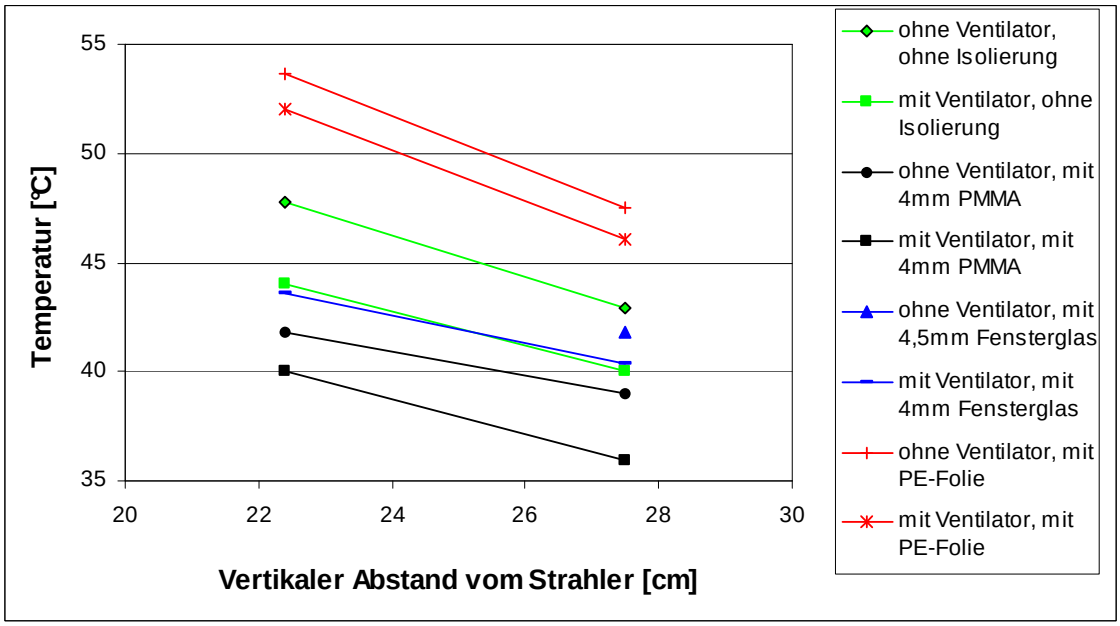

Abb. 81: Kollektorrücklauftemperatur als Funktion des vertikalen Abstandes zur Strahlungsquelle

Die Abbildung 81 zeigt zunächst, dass die Kollektorrücklauftemperatur - analog zu den Eichversuchen in Kapitel 7.3.3.1 - mit zunehmendem vertikalem Abstand zur Strahlungsquelle abnimmt.

Weiterhin zeigt die Abbildung 81, dass durch den Einsatz des Ventilators zur Windsimulation die Kollektorauslauftemperatur reduziert wird. Ohne Kollektorabdeckung kühlt der Ventilator den Kollektor um 3 bis 5 °C und mit Abdeckung um 2 bis 3 °C ab.

Die Kollektorabdeckungen haben aufgrund ihrer jeweiligen Transmissionsgrade einen unterschiedlichen Einfluss auf die Kollektorrücklauftemperatur. Der Vergleich der verschiedenen

Abdeckungen zeigt, dass durch Einsatz einer PE-Folie die höchste und einer PMMA-Platte die niedrigste Kollektorrücklauftemperatur erreicht wurde. Die Temperatur beim Einsatz einer Fensterglasscheibe lag zwischen diesen beiden. Prinzipiell führt der Einsatz einer PE-Folie aufgrund ihres hohen Transmissionsgrades und eines gewünschten Treibhauseffektes zu einer höheren Rücklauftemperaturen als beim Verzicht. Aufgrund der geringen mechanischen und UV-Beständigkeit ist eine PE-Folie jedoch als Abdeckung weniger geeignet als eine PMMA- oder Fensterglasplatte [53, 56].

Ausgehend von der Kollektorrücklauftemperatur in Abbildung 81 sowie der Eichkurve in Abbildung 78 wurde der Wirkungsgrad als Funktion des vertikalen Kollektorabstandes zur Strahlungsquelle bestimmt (Abb. 82).

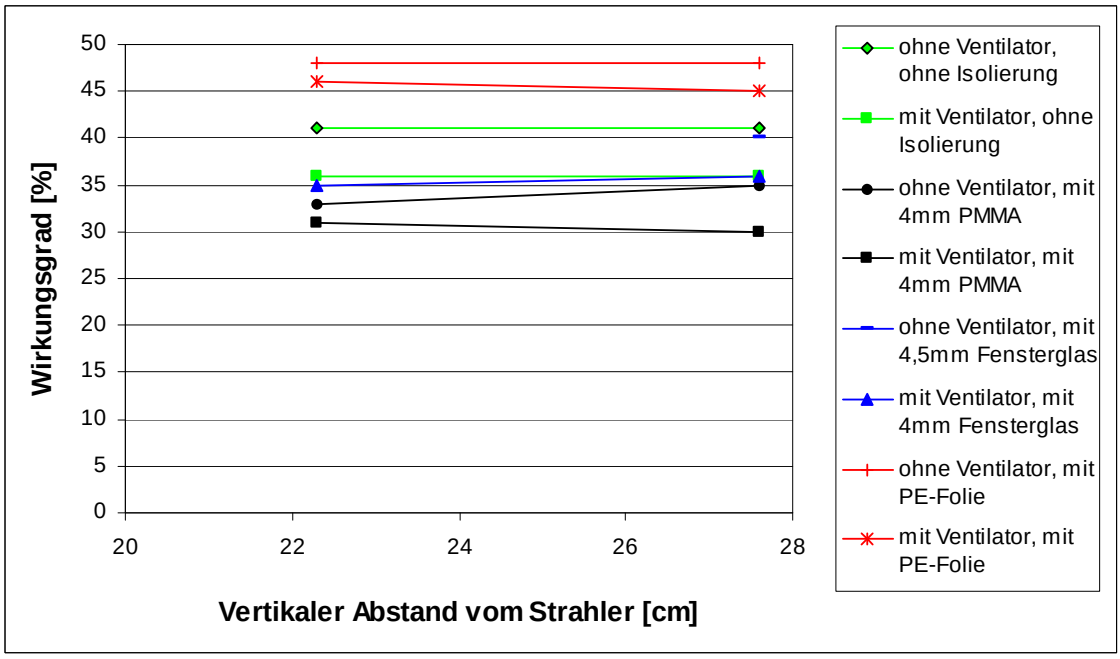

Abb. 82: Wirkungsgrad als Funktion des vertikalen Kollektorabstandes zur Strahlungsquelle

Die Abbildung 82 gibt zu erkennen, dass der gewählte vertikale Kollektorabstand keinen signifikanten Einfluss auf den Kollektorwirkungsgrad hat. Der höchste Wirkungsgrad wurde beim Einsatz der PE-Folie als Kollektorabdeckung (mit und ohne Windsimulation) erreicht, die niedrigste beim Einsatz der PMMA-Scheibe.

Ein Vergleich der Wirkungsgrad für eine Temperaturerhöhung von dT=40 °C und einem Wirkungsgrad von 50 % mit Standardkurven von Sonnenkollektoren zeigt, dass diese Kennwerte oberhalb der einfachen Standardkollektoren liegen. Der Wirkungsgrad muss jedoch in weiteren Entwicklungsarbeiten z.B. durch die Verwendung einer selektiven Beschichtung bzw. Lacks oder durch Optimierung des Absorberrohrs verbessert werden [17].

7.3.2 Feldversuche

Erste Freiluftversuche mit einem Parabolrinnenkollektor ohne Abdeckung und einer Parabelöffnung von 200 x 4 mm und einem Doppelrohrabsorber von 4x1 m (Innen-∅ 16 mm, Außen-∅ 28 mm) im Monat Mai (Außentemperatur 22 °C) zeigten, dass der eingesetzte Kollektor in der Lage ist, einen Speicher mit 200 Liter Wasser bei einem Durchfluss von 4 Liter/min innerhalb von etwa 7 Stunden von 20 °C auf bis zu 60 °C aufzuwärmen. Die

Diagramme in der Abbildung 83 geben die während des Versuchszeitraumes auftretende Globalstrahlung sowie im Vergleich dazu die Leistungsaufnahme des Kollektors wieder. Die Globalstrahlung stieg während dieses wolkenfreien Versuchstages (6:43 Uhr bis 20:00 Uhr) auf bis zu 800 W/m² an. Die vom Kollektor aufgenommene Leistung stiegt nach der Inbetriebnahme um 8:30 Uhr auf 670 W/m². Über den gesamten Versuchstag lag der Wirkungsgrad bei guten 52 %.

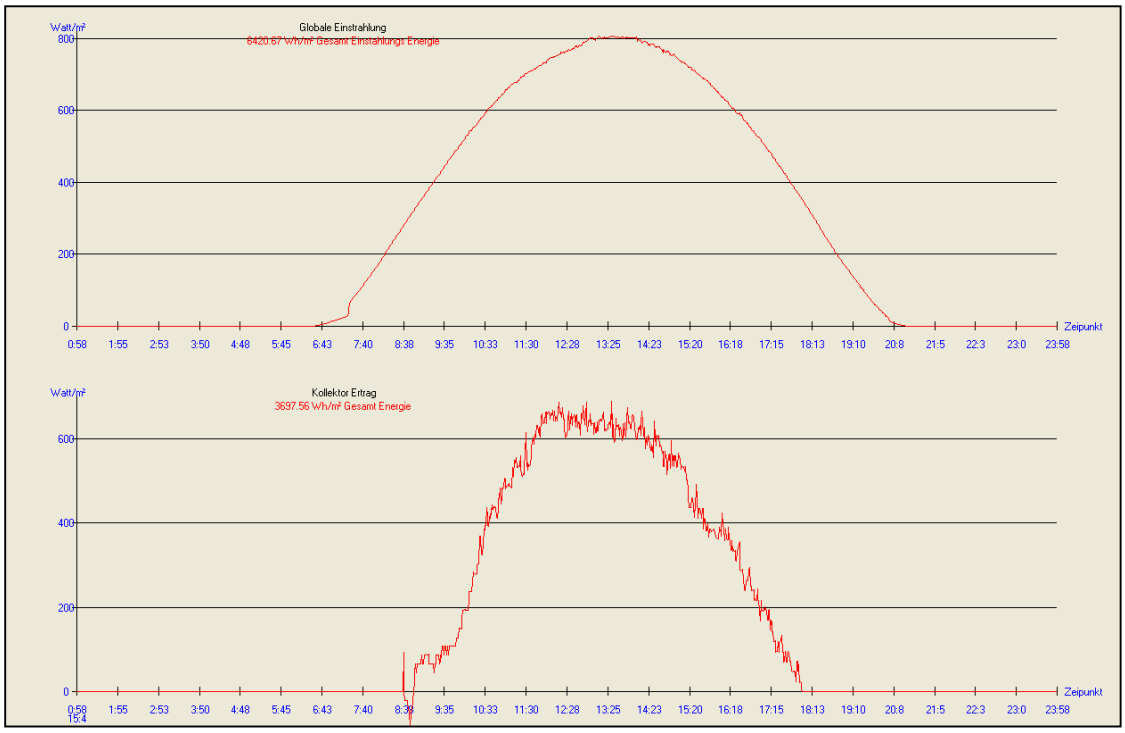

Abb. 83: Ermittelte Globalstrahlung (oben) und Leistungsaufnahme eines paraboloiden Sonnenkollektors (unten)

7.4 Einsatzbereich

Durch den Einsatz der entwickelten Parabolrinnenkollektoren eröffnet sich die Möglichkeit Dampf zum Antreiben einer Turbine zu erzeugen und gleichzeitig Strom zu gewinnen. Um die nötige Kraft zu erhalten, müssen mehrere Hochtemperaturkollektor hintereinander geschaltet werden, um die erforderlichen Temperaturen von 200 bis 250 ℃ zu erreichen. In mitteleuropäischen Regionen ist aufgrund der geringen Sonnenstrahlungsleistung die Dampferzeugung mit einem Kollektor alleine lediglich im Hochsommer möglich. Der erzeugte Dampf kann nach dessen Kondensation als Basis für die Gewinnung von Süßwasser z.B. als Trinkwasser in wasserarmen Regionen verwendet werden. Die Dampferzeugung deckt jedoch derzeit ein weiteres Problem auf: Die Ablagerung von Reststoffen wie Salzen und Mineralstoffen in den Kollektoren während des Verdampfungsprozesses. Daher ist eine kontinuierliche Dampfproduktion zur Zeit nur realisierbar, so bald salz- bzw. mineralstoffarmes Prozesswasser eingesetzt wird.

Die Versuche des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) in Köln in Zusammenarbeit mit dem Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart haben gezeigt, dass durch den Einsatz von parabolischen Kollektoren mit einem Nachführungssystem (Trackingsystem) unter der Berücksichtigung der Strahlungsstärke und des Einfallwinkels bei klarem Himmel Temperaturen von 175 ℃ erreicht werden können [81].

8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die folgende Kostenberechnung für den Betrieb eines im Rahmen der Arbeit entwickelten Halbkugel-Niedertemperaturkollektors, eines Parabol-Hochtemperaturkollektors sowie eines konventionellen, handelsüblichen Flachkollektors [79] geht von folgenden Basisdaten (Jahr 2008) aus:

- Kollektorbezugsflächen (Brutto-, Apertur-, Absorberfläche):
  Halbkugelkollektor: 0,71 m², 0,35 m², 0,57 m²
  Parabolkollektor: 1,00 m², 0,92 m², 0,35 m²
  Flachkollektor: 1,00 m², 0,92 m², 0,88 m²
- Investitionskosten pro m² Kollektor:
  Halbkugelkollektor: 330 Euro
  Parabolkollektor: 500 Euro
  Flachkollektor: 450 Euro
- Wärmeträgervolumen:
  Halbkugelkollektor: 9,0 Liter
  Parabolkollektor: 0,3 Liter
  Flachkollektor: 0,8 Liter
- Kollektordurchfluss:
  Halbkugelkollektor: 1,50 Liter/min
  Parabolkollektor: 4,00 Liter/min
  Flachkollektor: 3,75 Liter/min
- Mittlerer jährlicher Ertrag:
  Halbkugelkollektor: 750 kWh/a
  Parabolkollektor: 640 kWh/a
  Flachkollektor: 600 kWh/a
- Energiepreis (über die nächsten 10 Jahre): 0,15 Euro/kWh

Die Herstellungs- und Betriebsdaten können je nach den Anforderungen im konkreten Einzelfall variieren.

Die Kostenbetrachtung umfasst eine Kollektornutzungsdauer von 10 Jahre, da die Garantielaufzeit der Kollektoren mindestens 10 Jahre betragen sollte.

Auf Basis der Daten ergeben sich für einen 10-jährigen Betrieb der Sonnenkollektoren überschlägig folgender Energieertrag, der damit verbundene Gewinn und die folgende Amortisationszeiten (Tab. 8).

Bezeichnung	**Energieertrag innerhalb von 10 Jahren (kWh)**	**Eingesparte Kosten für Strom**	**Amortisationszeit**
Halbkugelkollektor	7.500	1.125 €	3,4 Jahre
Parabelkollektor	6.600	960 €	4,2 Jahre
Flachkollektor	6.400	900 €	5,0 Jahre

Tab. 8: Mittlerer jährlicher Ertrag und Gewinn

9. Zusammenfassung

Ausgehend vor der aktuellen Energiesituation und der Notwendigkeit der Nutzung von regenerativen Energiequellen - vornehmlich die Sonne -, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Sonnenkollektoren für den Nieder- und Hochtemperaturbereich (NT/HT) entwickelt und erprobt. Ausgangspunkt der Kollektorenentwicklung war eine Analyse des Standes der Technik und der auf dem Markt verfügbaren Sonnenkollektoren.

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Sonnenkollektoren wurden zunächst Prüf- bzw. Messstände aufgebaut und in Betrieb genommen.

Aufbauend auf der Analyse und den Defiziten der handelsüblichen Kollektoren wurde in einer Planungs- und Entwicklungsphase ermittelt, dass für den **Niedertemperaturbereich** zur Warmwassergewinnung die Halbkugel die effizienteste Kollektorbauform ist. Verglichen mit herkömmlichen Flachkollektoren, weisen halbkugelförmige Kollektoren in erster Linie funktionelle Vorteile auf, wie

- die Dauer der Sonneneinstrahlung, da halbkugelförmige Kollektoren unabhängig vom Einsatzort und der jahreszeitabhängigen Sonnenhöhe nicht nach der Sonne ausgerichtet werden müssen,
- die hohe mechanische Stabilität bei Wind oder Unwetter,
- den Neigungswinkel, welcher eine bessere Abreinigung z.B. von Staub ermöglicht und
- eine um den Faktor 5 größere Absorberfläche bei gleicher Bodenfläche.

Nach der Definition der Kollektorbauform wurden verschiedene Absorberrohr- und -schlauchmaterialien nach Entwicklung einer Wickelmaschine sphärisch aufgerollt und untersucht. Dabei zeigten die Untersuchungen, dass mehrschichtige Schläuche aufgrund des Wirkungsgrades, der inneren Oberflächenstruktur sowie der hohen chemischen, mechanischen und UV-Beständigkeit als Absorber am Geeignetsten sind. Die Untersuchungen zeigten weiterhin, dass Halbkugelkollektoren bei gleichem Absorbermaterial einen um etwa 25 % höheren Wirkungsgrad als Flachkollektoren besitzen.

In weiteren Untersuchungen wurden neue Konzepte für die Herstellung weiterer Kollektorkomponenten wie diverse Anschlüsse und eines Kollektorrahmens für einen schnellen und maßgeschneiderten Zusammenbau entwickelt und realisiert. Dabei konnten die für den Rahmen ursprünglich eingesetzten Kunststoffteile und -platten durch einen lasergeschnittenen, zusammensetzbaren Edelstahlrahmen ersetzt werden, welcher eine wesentlich höhere mechanische und thermische Beständigkeit aufweist.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit lag in der Entwicklung einer halbkugelförmigen transparenten Kollektorabdeckung. Materialuntersuchungen ergaben, dass GS-PMMA (Fa. Röhm, Darmstadt) von den derzeit verfügbaren Materialien wie Glas, aufgrund seines Gewichtes, Transmissionsgrades, der mechanischen Eigenschaften, Temperaturresistenz, Umformbarkeit sowie des Preises am Besten geeignet ist. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen ermöglichten die Realisierung einer wirtschaftlichen Verfahrenstechnik zur Umformung von GS-PMMA-Platten zu halbkugelförmigen Kollektorabdeckungen. Darüber hinaus wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf die erste Schritte für die Entwicklung einer flexibleren, elastischeren, leichteren und bruchfesteren Kollektorabdeckung auf textiler Basis durchgeführt.

Die entwickelten halbkugelförmigen Sonnenkollektoren wurden in Praxisversuchen für die Beckenwassererwärmung von Schwimmbädern eingesetzt. Die Ergebnisse zeigten, dass

tagsüber Temperaturen im Kollektorrücklauf, unabhängig von der Umgebungstemperatur, von bis zu 90 °C erreicht werden konnten. Die Versuchse rgebnisse zeigen ferner, dass die halbkugelförmigen Kollektoren der effizienteste und nachhaltigste Weg zur Warmwassererwärmung für Schwimmbäder, aber auch für private Haushalte und Hotelanlagen sowie für mobile Anlagen sind.

Zur Beurteilung der in der gesamten NT-Kollektoranlage ablaufenden Prozesse sowie deren Optimierung wurde ferner ein Computersimulationsprogramm entwickelt. Dieses ist in der Lage, aus verschiedenen Eingangsgrößen den Temperaturverlauf an den Sensormessstellen zu simulieren. Vergleiche mit Messergebnissen aus der Praxis zeigten, dass sich durch die Simulation das Verhalten einer realen Anlage relativ genau zu beschreiben lässt.

Nach dem derzeitigen Stand der Technik werden überwiegend fokussierende Parabolrinnenkollektoren für die **Hochtemperatur-Solarthermie** eingesetzt. Experimentelle Untersuchungen sowie mathematische Betrachtungen mit der Methode der Finiten-Elemente (FEM) mit handelsüblichen Parabolrinnenkollektoren machten deutlich, dass die derzeit eingesetzten Parabolrinnenkollektoren ohne ein teures Tracking-System nur dafür ausgelegt sind, senkrecht zum Absorberrohr einfallende Sonnenstrahlen in Richtung Rohr zu fokussieren. Fallen die Sonnenstrahlen jedoch z.B. zu später Tageszeit schräg auf die Parabolrinne ein, so bildet sich der Fokus der reflektierten Strahlen zum Teil außerhalb der Parabol(fokus)rinne (Parafokus) und der Wirkungsgrad des Kollektors sinkt.

Zur Entwicklung eines neuen hocheffizienten Parabolrinnenkollektors wurde zunächst mittels FEM, Vektoren- und Matrizenrechnung die mathematisch optimalste Parabelöffnung sowie die Position und der notwendige Durchmesser des Absorberrohres zur exakten Fokussierung der Sonnenstrahlen unabhängig von der Tageszeit bestimmt. Ausgehend von den mathematischen Betrachtungen wurde zur Umsetzung in technische Produkte zunächst eine Verfahrenstechnik zur Erstellung eines Kollektorrahmengestells auf Basis einer Laserschneidtechnik entwickelt. Das entwickelte Rahmengestell ermöglicht den schnellen und einfachen Einbau eines Spiegels und Absorberrohes mit einer Genauigkeit von ±0,2 % gegenüber den mathematischen Betrachtungen.

Neben der Bestimmung der Kollektorgeometrie sowie Entwicklung eines Rahmengestelles wurden neue Werkstoffe für den Kollektorspiegel und das Absorberrohr entwickelt und getestet. Während den Versuchen erwies sich ein elektrolytisch bedampftes Aluminiumblech aufgrund des hohen Reflexionsgrades (>95 %) und folglich seiner geringen Erwärmung als am Geeignetsten. Als Absorberrohr wurde ein schwarzes Kupferdoppelrohr eingesetzt, welches zwischen den Rohren mit einem Wärmeträger durchströmt wird.

Praxisversuche mit den ersten paraboloiden Kollektorprototypen im Technikum sowie im Freiland zeigten, dass Wirkungsgrade oberhalb von Standardkurven konkurrierender Sonnenkollektoren zu erreichen sind.

Den Abschluss der Arbeit bildete eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, welche aufzeigt, dass beim Aufbau und Einsatz der entwickelten Kollektoren gegenüber einem konventionellen Flachkollektor mit erheblich kürzeren Amortisationszeiten zu rechnen ist.

10. Summary

Considering the current energy situation and necessity of use of regenerative energy sources - mainly the sun - solar collectors for the low and high-temperature range of application ('NT/HT') were developed and tested within the scope of the present work. An analysis of the state-of-the-art and the commercially available sun collectors was the starting point of collector development.

At first test stands for checking the performance of sun collectors were designed and put into operation.

Based on the analysis and deficits of the commercially available sun collectors - within the stage of planning and development - it could be determined that the hemisphere is the most efficient collector design in the **low-temperature range** for the procurement of hot water. Compared to conventional flat-plate collectors, hemispheric collectors mainly show functional advantages such as

- the duration of insolation as hemispheric collectors - independent of usage site and seasonal solar altitude - and, therefore, need not be oriented to the sun,
- excellent mechanical stability in wind and thunderstorms,
- inclination angle, which e.g. allows improved dedusting behavior and an absorber surface that is larger by a factor of five at equal ground area.

Subsequent to the definition of the collector design different absorber tube materials were spherically wound using a winding machine that had been developed before and then were tested. According to the investigations, it turned out that multi-layered tubes are optimal as absorbers due to efficiency, inner surface structure as well as due to excellent chemical, mechanical and UV-resistance. The investigations, moreover, showed that spherical collectors have an efficiency that is by 25 % higher than the efficiency of flat-plate collectors - at equal absorber materials.

New concepts for the production of further collector components such as diverse connections and a collector frame for a quick and tailor-made assembly were developed and realized within the scope of further investigations. In this way the plastic components and plates originally used for the frame could be replaced by a lasered, sectional frame made of stainless steel - a frame that shows considerably improved resistance to mechanical and thermal stress.

Another research activity of this work centered on the development of a hemispheric, transparent collector cover. According to material analyses GS-PMMA proved to be the most suitable material currently available among all commercial materials such as glass - due to its weight, degree of transmission, mechanical properties, temperature resistance, forming behavior as well as regarding price. Extensive experimental investigations enabled the realization of an economic processing technology for the forming of GS-PMMA-plates into collector covers. Moreover, the first steps towards the development of a more flexible, elastic, lighter and break-proof collector cover on textile basis were taken in close cooperation with the Institute of Textile Technology and Process Engineering (ITV) Denkendorf.

In practical trials the developed hemispheric solar collectors were used for the heating of swimming pools. The results showed that during the day collector runback temperatures up to 90 °C could be reached independent of the ambient temperature. The test results, moreover,

showed that hemispheric collectors are the most efficient and sustainable way for the heating of swimming pools, but also for private households and hotels as well as mobile installations.

For the purpose of evaluation of the complete running processes of the 'NT'-collector installation as well as of its optimization, a computer simulation program was additionally developed. It, thus, becomes possible to simulate - from different input quantities - the course of temperature at the sensor measuring points. Comparisons with measuring results from practice showed that the behavior of a real installation can be described rather well by performing simulations.

According to the current state-of-the art mainly focusing parabolic through collectors are used in the field of **high-temperature solar heating systems**. Experimental investigations as well as mathematical considerations using the FEM-method with commercial parabolic through collectors clearly showed that the currently used parabolic through collectors without a costly tracking system only are designed to focus incident rays of sunlight towards the vertical absorber tube. If, however, the rays of sunlight are incident in diagonal direction towards the parabolic through collector e.g. later in the day, the focus of the reflecting rays partly is formed outside of the parabolic focal through collector, thus reducing the efficiency of the collector.

For the development of a new and highly efficient parabolic through collector at first the mathematically optimal parabolic opening as well as position and diameter of the absorber tube for the exact focusing of the rays of sunlight independent of the time of day was determined by means of FEM simulations, vector calculations and matrix algebra. Based on mathematical considerations and for the purpose of implementation of technical products, at first the processing technology for the design of a collector rack based on laser cutting technology was developed. The developed rack enables the quick and easy fitting of a mirror and absorber tube at an exactness of ±0,2 % compared to the mathematical considerations.

Besides the determination of the collector geometry a rack and new materials for the collector mirror and the absorber tube were developed and tested. In the trials an electrolytically vaporized aluminium plate proved to be optimal due to its high degree of reflection (>95 %) and thus because of a low degree of heating. A black copper double tube that is passed through by a heat transfer medium between the tubes served as absorber tube.

Practical trials in the lab as well as field trials with the first parabolic collector types showed that degrees of efficiency can be achieved which are superior to the standard values of competing sun collectors.

Economic considerations at the end of the work showed that at the assembly and use of the developed collectors - compared to conventional flat-plate collectors - a considerably shorter payback period can be expected.

11. Diskussion und Ausblick

Angesichts der immer knapper werdenden fossilen Energieträger ist die Menschheit früher oder später gezwungen, die Sonne als nachhaltige und einzige überall zur Verfügung stehende Energiequelle zu nutzen. Die Entwicklung nachhaltiger Techniken zur Nutzung der Sonnenenergie ist bereits in vollem Gange. In dieser Arbeit wurde dargelegt, dass Sonnenkollektoren ein breites Spektrum der benötigten Energie decken können. Ihr Einsatzgebiet ist vielfältig: Neben der Warmwassererzeugung zählt unter anderem auch die Dampferzeugung zur Stromgewinnung und als Basis für die Gewinnung von Trinkwasser dazu.

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich die Bauweise der herkömmlichen Sonnenkollektoren verändert, deren Form und Funktionsprinzipien sind aber nach wie vor identisch. Es versteht sich, dass durch die fehlende Anpassung der derzeitigen Kollektoren auch deren Anfälligkeit gegenüber äußeren Einflüssen gleich geblieben ist. Momentan gibt es keine Entwicklungen in der Solarthermiebranche, welche zu einer merklich bedeutenden Steigerung der Ausbeute führen. Der Grund hierfür könnte in der Problematik liegen, dass für die Unternehmen einzig die verkaufte Menge im Vordergrund steht. Die Verwirklichung bzw. das Experimentieren mit revolutionären Ideen in Form und Funktion der Sonnenkollektoren birgt für den einzelnen Investor ein zu großes finanzielles Risiko. Aus diesem Grunde werden derzeit lediglich neue Zusatzsysteme entwickelt, welche die Kosten einer Anlage in die Höhe treiben und/oder weitere Unkosten verursachen. Ein Beispiel dafür sind Tracking-Systeme zur kontinuierlichen Ausrichtung der Kollektoren, welche neue Wartungs- und Installationskosten verursachen.

Die vorliegende Arbeit hat sich dieser Problematik angenommen und halbkugelförmige Kollektoren für die Niedertemperatur-Solarthermie sowie paraboloide Kollektoren für die Hochtemperatur-Solarthermie entwickelt. Ausgehend von diesen Entwicklungen kann durch die von der Fa. SolarEnergie Stefanakis (Stadecken-Elsheim) produzierten Produkte ein weites Anwendungsspektrum von der Warmwasserproduktion für private Schwimmbäder und/oder Haushalte bis zur Dampferzeugung im industriellen Maßstab gedeckt werden.

Die wiedergegebenen Ergebnisse sowie vor allem die über Jahrzehnte langwierig erarbeiteten Erfahrungen zeigen eindeutig, dass die verwendeten Technologien, von den Eigenschaften der Einzelkomponenten bis hin zu den Leistungen der Gesamtanlagen, ein hohes und noch zu steigerndes Potential für die Energiegewinnung besitzen.

Zukünftige Entwicklungsziele beinhalten die Weiterentwicklung und Optimierung einzelner Elemente und die Kombination verschiedener erneuerbarer Energiequellen. Großes Potential wird beispielsweise in eine Kombination aus Solarthermie und Photovoltaik, welche elektronische Regelungssysteme, Tracking-Systeme und Pumpen antreiben kann, gesehen. Obwohl erste Prototypen derzeit noch optimiert werden müssen, zeigen diese schon in ihrer derzeitigen Entwicklungsphase große Vorteile unter Berücksichtigung des gesamten Energieverbrauches der Anlage, d.h. nicht nur des Wirkungsgrades der Kollektoren, sondern auch unter Berücksichtigung des Stromverbrauches für Pumpen und Steuerungen. Die Nachhaltigkeit eines solchen kombinierten Systems wäre in ihrem Wesen kaum zu übertreffen. Wäre das nicht der größte Schritt eine zukünftige Energiekrise zu überwinden?

12. Literaturverzeichnis

[1] Bührke, T. ; Wengenmayr, R.:
Erneuerbare Energie - Alternative Energiekonzepte für die Zukunft
Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2007

[2] Messe Frankfurt GmbH:
Warmwasser mit Sonnenenergie
Dokumentation zur Sonderschau „Warmwasser mit Sonnenenergie“ für die ISH’87
Internationale Fachmesse Sanitär, Heizung, Klima, Frankfurt, 1987

[3] Marko, A.:
Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden: Für Ingenieure und Architekten
Springer-Verlag, Berlin, 1. Auflage, 1997

[4] Stacey, W.M.:
Nuclear Reactor Physics
Wiley & Sons Verlag, New York, 2. Auflage, 2007

[5] Winter, F.:
Auch Uran wird knapp
Sonnenenergie - Das Fachmagazin für erneuerbare Energien, 1-2/2007

[6] Busmann, W.; Kabus, F.; Seibt, P.:
Geothermie. Wärme aus der Erde. Technologie, Konzepte, Projekte
Verlag C.F. Müller, Heidelberg, 1991

[7] Kaltschmitt, M.; Huenges, E.; Wolff, H.:
Energie aus Erdwärme
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1999

[8] Gasch, R.; Twele, J.:
Windkraftanlagen
Teubner Verlag, Wiesbaden, 5. Auflage, 2007

[9] Hau, E.:
Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit
Springer Verlag, Berlin, 3. Auflage, 2002

[10] Melde, L.:
Dezentrale, regenerative Energiequelle - Die Biogasanlage
GRIN Verlag, München, 2000

[11] Braun, R.:
Biogas - Methangärung organischer Abfallstoffe. Grundlagen und Anwendungsbeispiele
Springer Verlag, Berlin, 1982

[12] *Pakt mit der Sonne*
Focus, 27/1995

[13] Faninger, G. (Hrsg.):
Die Marktentwicklung der thermischen Solartechnik in Österreich
Berichtsjahr 2001, Forschungszentrum Seibersdorf, Universität Klagenfurt, 2002

[14] Sandlöbes, S.:
Solarenergie - Techniken und Möglichkeiten
Studienarbeit, Lehr- und Forschungsgebiet für Abfallwirtschaft, Aachen, 2005

[15] Streicher, W.:
Sonnenenergienutzung
Institut für Wärmetechnik, TU Graz, 307.036, 2 VO, (03-11)

[16] Deutscher Fachverband Solarenergie (DFS) e.V.:
Solarmarkt Deutschland
Lecture Solar'97, Freiburg, 1997

[17] Stine, W.; Geyer, M.:
Power From The Sun
http://www.powerfromthesun.net, Stand: November 2007

[18] Wagner & Co. Solartechnik GmbH:
So baue ich eine Solaranlage: Handbuch für Technik, Planung und Montage
Wagner & Co Verlag, Cölbe, 15. Auflage, 1999

[19] Institut für Solarenergieforschung Hameln / Emmerthal GmbH
Woher kommt die Strahlung ?
http://www.nils-isfh.de, Stand: September 2007

[20] Ladener, H.; Späte, F.:
Solaranlagen – Handbuch der thermischen Solarenergienutzung
Ökobuch Verlag, Staufen, 1999

[21] *Sonnenenergie - Das Fachmagazin für erneuerbare Energien,* 6/1997

[22] Recknagel, H.; Spenger, E.; Schramek, E.R.:
Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 97/98
R. Oldenbourg Verlag, München, 68. Auflage, 1997

[23] METEONORM:
Das klimatologische Grundlagenwerk für Solarplaner, Bundesamt für Energiewirtschaft
Hrsg.: Infoenergie, Brugg (CH), 2000

[24] Weischet, W.:
Einführung in die allgemeine Klimatologie
Teubner Verlag, Stuttgart, 3. Auflage, 1983

[25] Sun Therm® Projekt:
Um Licht-Jahre voraus!
Unternehmensprospekt, www.sunthermprojekt.de, Stand: Juli 2005

[26] Solarpraxis AG:
Photovoltaik und Solarthermie
Informations-CD des Verlages, 2000

[27] Haselhuhn, R.:
Photovoltaik - Gebäude liefern Strom
TÜV-Verlag, Köln, 5. Auflage, 2005

[28] Hanus, B.; Stempel, U.:
Sonnenenergie im Haus
Franzis Verlag, Poing, 2007

[29] Zarza, E.; Blanco, M.:
Advanced M.E.D solar desalination plant seven years of experience at the plataforma solar de Almeria
Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production, Santorini (Greece), 10.-12.June 1996

[30] Frei U.; Häuselmann, T.; Flückinger, F.; Frey, R.:
Leistungsdaten Thermischer Sonnenkollektoren
Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle, Technikum Rapperswil, Hrsg: Infoenergie Brugg, 1995

[31] Prognos AG:
Evaluierung des 4. Energieforschungsprogrammes Erneuerbare Energien
Auftraggeber: FZ Jülich/PTJ-EEN, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Juli 2007

[32] www.solarserver.de
Der Solarserver: Das Internetportal zur Sonnenenergie, Stand: Januar 2007

[33] *Meßtechnische Untersuchung an Sonnenkollektoren - Teil 1 und 2*
Fachbereich Elektrotechnik, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik der Universität Kaiserslautern: 1997

[34] Hausner, R.:
Ecological and energetic evaluation of transparent insulation systems
Symposium EuroSun 1996

[35] Drück, H.:
Der Speicher – das Herz der Kombianlage
Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Beitrag Solar 99 Pforzheim

[36] Müller, H..E.; Dünnleder, W.; Mühlenberg, W.:
Legionellen - Ein aktuelles Problem der Sanitärhygiene. Infektion und Bekämpfung
Expert-Verlag, 3. Auflage, 2007

[37] Sunset Energietechnik GmbH:
Solarwärme von Sunset - Für mehr Lebensqualität und eine gesunde Umwelt
Unternehmensprospekt, www.sunset-solar.com, Stand: Januar 2005

[38] Berner, J.:
Zurück in die Zukunft
Sonnenenergie - Das Fachmagazin für erneuerbare Energien, 1-2/2007

[39] Kuckelkorn, T.; Benz, N.; Neumayr, A.; Graf, W.; Lüpfert, W.:
Herausforderungen in der Produktion von Receivern für Parabolrinnenkraftwerke
Vortrag auf der Jahrestagung des ForschungsVerbunds Sonnenenergie, Hannover, 26./27.09.2007

[40] Lüpfert, E.; Pottler, K.; Ulmer, S.; Schiel, W.; Platzer, W.:
Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung solarthermischer Kraftwerkskomponenten
Vortrag auf der Jahrestagung des ForschungsVerbunds Sonnenenergie, Hannover, 26./27.09.2007

[41] Wattendorf, U.:
Absorption / Emission, Strahlungsgesetze, Rotationspektren, Rotations-Raman
Seminarvortrag im Rahmen des Physikalisch-Chemischen Fortgeschrittenenpraktikums, 8.5.2001

[42] Rheinisch-Westfällisches Elektrizitätswerk AG:
RWE Bau-Handbuch: Technischer Ausbau 1987/88
Energieverlag, Heidelberg, ISBN 3-87200-654-1

[43] Blumenberg, J.; Spinnler, M.:
Thermische Sonnenenergieanlagen
Lehrstuhl für Thermodynamik der Technischen Universität München
http://www.td.mw.tum.de/tum-td/de/, Stand: September 2007

[44] Gombert, A.; Reineke-Kock, R.; Fenske, K.; Hofmann, T.:
Optische Beschichtungen für Solarkollektoren – Technologieentwicklung und Qualitätssicherung
Vortrag auf der Jahrestagung des ForschungsVerbunds Sonnenenergie, Hannover, 26./27.09.2007

[45] *Sonnenenergie - Das Fachmagazin für erneuerbare Energien*
Unbekanntes Heft, Abb. 30-17, S. 17

[46] DIN EN 12975, vormals DIN 4757: Solarthermische Anlagen:
Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile: Kollektoren

[47] Bachmann, S.; Peter, M.; Drück, H.; Heidemann, W.; Müller-Steinhagen H.:
Prüfung von Reglern für thermische Solaranlagen
OTTI - 14. Symposium Thermische Solarenergie, 12. -14.05.2004

[48] Kipp & Zonen B.V.:
Instruction Manual, Pyranometer CM Series
www.kippzonen.com, Stand: November 2006

[49] Dr. Hönle AG:
Simulation natürlicher Sonnenstrahlung
Unternehmensprospekt
http://www.hoenle.de/uploads/tx_hoenle/SoSi_A4_d__E-Mail__01.pdf, Stand: März 2008

[50] Platzer, W.:
Bestimmung des solaren Energiegewinnes durch Massivwände mit transparenter Wärmedämmung
Fachverband Transparente Wärmedämmung e.V., Juni 2000

[51] Papula, L.:
Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler
Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 3. Auflage, 1990

[52] Gerth, D.:
Warmwasserzirkulationsleitung aus Kupferrohr - Wasserschaden infolge Korrosion - Erosion des Rohres
aus: Bauschäden-Sammlung, Band 1, G. Zimmermann (Hrsg.), Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 4. Auflage, 2000

[53] Ehrenstein, G.W; Pongartz, S.:
Beständigkeit von Kunststoffen
Carl Hanser Verlag, München, 2007

[54] Platzer, W.J.:
Energetische Bewertung von Transparenter Wärmedämmung
Bauphysik*,* 2/1999

[55] Platzer W.J.; Goetzberger, A.:
Recent Advances in Transparent Insulation Technology
Symposium EuroSun, 1996

[56] Nentwig, J.:
Kunststoff-Folien: Herstellung-Eigenschaften-Anwendung
Carl Hanser Verlag, München, 3. Auflage, 2006

[57] Nigischer, W.:
Eigenschaften von Glas
http://www.fn-glas.at, Stand: Juli 2003

[58] Röhm Kunststoff GmbH:
Das Problem: Sonnenkollektor-Abdeckungen - Der derzeit dafür beste Werkstoff: Plexiglas
Unternehmensprospekt

[59] Stegmaier, T.; Linke, M.; Geuer, M.; Planck, H.; Stefanakis, J.:
Entwicklung von flexiblen und transparenten Wärmedämmungen für solarthermische Anwendungen
Technische Textilien/Technical Textiles, 2/2006

[60] Stefanakis, J.; Stegmaier, T.:
Mobiler Kugelsonnenkollektor mit textilbasierter, transparenter bionischer Wärmedämmung nach dem Vorbild des Eisbärfells
Textbeitrag für die Preisverleihung des Prof.-Adalbert-Seifriz-Preis, 2006

[61] Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf:
Development of flexible and extremely economic sun collectors
Schlussbericht des SME/CRAFT European Research Project „FLEXCOLL“ (CRAFT-1999-71816), 2005

[62] Nachtigall, W.:
Bionik- Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler
Springer-Verlag, Berlin, 1998

[63] Tributsch, H.; Goslowsky, H.; Küppers, U.; Wetzel, H.:
Light collection and solar sensing through the polar bear pelt
Solarenergy Materials, 21/1990

[64] Gries, T.; Klopp, K.:
Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien. Verfahren und Anwendungen
Springer-Verlag, Berlin, 2007

[65] Rietschel, H.; Raiß, W.:
Heiz- und Klimatechnik. Bd. 1: Grundlagen, Systeme, Ausführung. Bd. 2: Verfahren und Unterlagen zur Berechnung
Springer-Verlag, Berlin, 15. Auflage, 1968/70

[66] Grote, H.; Feldhausen, J.:
Taschenbuch für den Maschinenbau
Springer-Verlag, Berlin, Berlin; 22. Auflage, 2007

[67] *Auslegung von Kälte- und Klimaanlagen: Hydraulischer Abgleich von Indirekten Systemen*
http://www.cooltool-software.com/hydr_abgl/hydr_abgleich.htm, Stand März 2008

[68] Kronenberg, G.; Lokiec, F.:
Low-temperature distillation processes in single- and dual-purpose plants
Desalination 136, 2001

[69] Duffie, J.A.; Beckman, W.A.:
Solar Engineering of Thermal Processes
John Wiley & Sons Verlag, New York, 1980

[70] Rheinländer, J.; Gräter. F.:
Technologies for the desalination of typically 10 m³ of water per day
Desalination 139, 2001

[71] Fachbereich Elektrotechnik, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik der Universität Kaiserslautern:
Mathematische Modellierung und messtechnische Untersuchungen eines Prüfstandes für Solarkollektoranlagen
Diplomarbeit D102, 1997

[72] Schrag, T.:
Modellierung, Simulation und Optimierung solarthermischer Anlagen in einer objektorientierten Simulationsumgebung
Fachbereich Informatik der Technischen Universität Berlin, 2001

[73] Heinzel, V.; Holzinger, J.; Reinhardt, V.:
Flachkollektor-Wärmeverluste
Sonnenenergie - Das Fachmagazin für erneuerbare Energien, 2/1992

[74] Jeschar, R.; Alt, R.; Specht, E.:
Grundlagen der Wärmeübertragung
Viola-Jeschar-Verlag, Goslar,1990

[75] Broer, G.:
Physik macht warm
Solarboulevard, 1/2007

[76] Herrmann, F.:
Was ist Wärmestrahlung
PRAXIS-Magazin, 5/2005

[77] Knothe, K.; Wessels, H.:
Finite Elemente
Springer Verlag, Berlin, 1. Auflage, 1991

[78] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.:
Finite Elemente Analyse für Ingenieure. Eine leicht verständliche Einführung
Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2003

[79] Fa. Megasun – Solar Water Heaters, Attiki (Griechenland)
Mündliche Mitteilung, 12.07.2007

[80] Fischer, S.; Müller-Steinhagen H.:
Einführung eines 2-Knotenmodells zur besseren Beschreibung der thermischen Leistungsfähigkeit von Sonnenkollektoren
OTTI - 16. Symposium Thermische Solarenergie, 17.-19.05.2006

[81] Fischer, S.; Lüpfert, E.; Müller-Steinhagen, H.:
Efficiency testing of parabolic trough collectors using the quasi-dynamic test procedure according to the European Standard EN 12975.
Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies, 13. Conference, Sevilla (Spain), 20.-23.06.2006