

PSE GmbH

Fresnel Prozesswärmekollektor zur Solaren Kälteerzeugung

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ 23951 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Bericht erstellt von

Dr. Andreas Häberle
Christian Zahler
Frank Luginsland
Michael Berger

Freiburg, März 2007

Bezug des Berichts und weitergehende Informationen:

PSE GmbH
Emmy-Noether Str. 2
D-79110 Freiburg

Tel. + 49(0)761 – 479 14-0
Fax + 49(0)761 – 479 14-44

E-Mail: info@pse.de
www.pse.de

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	23951	Referat	24/2	Fördersumme	125.000,00 €
Antragstitel	Fresnel-Prozesswärmekollektor zur solaren Kälteerzeugung				
Stichworte	Regenerativ, Solarthermie, Solare Kühlung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
15 Monate	22.07.2005	22.10.2006			
Abschlussbericht					
Bewilligungsempfänger	PSE GmbH - Forschung Entwicklung Marketing Emmy-Noether-Str. 2 79110 Freiburg			Tel	(07 61) 4 79 14-0
				Fax	-44
				Projektleitung	Dr. Andreas Häberle
			Bearbeiter		
Kooperationspartner	Robur Spa, Via Parigi 4/6, I-24040 Verdellino/ Zingonia (Bg) Fraunhofer ISE, Heidenhofstr. 2, D-79110 Freiburg				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ziel dieses Vorhabens war die Entwicklung eines Fresnel-Prozesswärmekollektors zum Antrieb einer 100% solar betriebenen Klimatisierungsanlage, welche aus drei Komponenten besteht: Prozesswärmekollektor, Ammoniak-Wasser Kältemaschine, Kältespeicher. Dieses System ist geeignet zur Klimatisierung von größeren Gebäuden, wie. z.B. Hotels oder Einkaufszentren in Gebieten mit hohem Direktstrahlungsanteil wie Südeuropa oder Nordafrika.

Die bisherigen Arbeiten zu Fresnel-Kollektoren zielten klar auf die solarthermische Stromerzeugung im großen Maßstab. Die Kollektorgeometrie wurde mit einer Receiverhöhe von 10 m und einer Apertur von etwa 30 m so ausgelegt, dass erst Projekte ab einer thermischen Leistung von 10 bis 20 MW sinnvoll sind. Bei kleineren Kollektorfeldern dominieren Randeffekte. Aufbauend auf Ergebnissen und Erfahrungen aus vorhergehenden Projekten ist es deshalb Ziel dieses Projektes einen kleineren Fresnel-Kollektor zu konstruieren, welcher Prozesswärme im Temperaturbereich von etwa 200 °C bereitstellen kann und der für Kollektorfelder mit einer thermischen Leistung ab etwa 25 kW eingesetzt werden kann. Dies entspricht etwa der Antriebsleistung der kleinsten marktverfügbaren Absorptionskältemaschinen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Laufe des Projektes wurden zunächst die Hauptkomponenten wie Primärspiegel und Sekundärkonzentrator entwickelt und ein Kollektor mit 88 m² Aperturfläche errichtet. Dabei konnte auf bestehendes technisches Know-how (z.B. im Bereich der Regelung) aufgebaut werden. Allerdings waren durch das Down-Scaling des Kollektors auch grundlegende Neuentwicklungen notwendig (Receiver mit Sekundärkonzentrator, Primärspiegel mit reduzierter Brennweite). Nach dem erfolgreichen Abschluss von Funktionsprüfungen wurde dieser Kollektor im Rahmen eines Unterauftrags an das Fraunhofer ISE vermessen und charakterisiert.

Parallel zu den Detailmessungen des Fraunhofer ISE an einem Kollektormodul wurde ein Gesamtsystem zur solaren Kälteerzeugung installiert und evaluiert.

Ergebnisse und Diskussion

Der Aufbau und Inbetriebnahme des ersten Prototyps wurde plangemäß Ende 2005 realisiert. Im Sommer 2006 wurden umfangreiche Messungen an dem Kollektor durchgeführt und in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE ausgewertet. Die Messungen bestätigen die theoretischen Erwartungen an die Leistungsfähigkeit des Kollektors. Gleichzeitig wurde bei der Auswertung der Messungen deutlich, dass sich die gängigen Normen zur Vermessung thermischer Solarkollektoren nicht auf den Fresnelkollektor übertragen lassen, da der Wirkungsgrad insbesondere dieses Kollektortyps stark von der Einstrahlrichtung der Solarstrahlung abhängt. Diese Winkelabhängigkeit konnte bei der Auswertung der Messungen nicht aufgelöst werden. Stattdessen wurden sehr detaillierte Strahlverfolgungsrechnungen durchgeführt und in die Auswertung der Messungen integriert.

Der Aufbau und die Inbetriebnahme des zweiten Prototyps, der dann schon zum Betrieb einer Kältemaschine eingesetzt wurde verzögerten sich, da auf einen anderen Standort ausgewichen werden musste. Die Anlage wurde im August 2006 fertig gestellt und wird seither betrieben und vermessen. Die Anlage liefert ihre Kälte direkt in ein bestehendes Kältenetz. Auf die Installation eines Kältespeichers wurde deshalb verzichtet. Auch mit dieser Anlage ist die Betriebserfahrung positiv. Das Zusammenspiel zwischen Kältemaschine und Kollektor erweist sich als absolut problemlos. Die Anlage soll noch den ganzen Sommer 2007 über betrieben und vermessen werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Vorhaben wurde in internationalen Gremien wie der IEA Task 33/4 »Solar Heat for Industrial Processes« (www.iea.ship.org) und der Europäischen Solarthermie Platform (www.esttp.org) vorgestellt und diskutiert.

Außerdem wurden Veröffentlichungen bei mehreren nationalen und internationalen Konferenzen eingereicht (SolarPACES, OTTI, Congresso Nazionale ATI) und einige Fachzeitschriften schrieben über das Projekt.

Fazit

Mit dem PSE Fresnel Prozesswärmekollektor steht eine Technologie zur Verfügung mit der thermische Solarenergie mit Temperaturen bis 200 °C und im Leistungsbereich ab ca. 25 kW bereitgestellt werden kann. In einer ersten Anwendung betreibt ein Prototyp-Kollektor eine NH₃/H₂O-Absorptionskältemaschine. Neben zweistufigen H₂O/LiBr-Absorptionskältemaschinen ist dies eine attraktive Anlagenkombination zur solaren Kälteerzeugung, die das Potential des Prozesswärmekollektors ausnutzt.

Die bisherige Betriebserfahrung ist durchweg positiv und die Leistungsmessungen bestätigen die theoretischen Erwartungen.

Die Herstellungskosten des Kollektors bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung wie die von herkömmlichen Kollektoren zur Warmwasserbereitung. Es ist geplant in weiteren Demonstrationsprojekten Erfahrung mit dem Kollektor zu sammeln und ihn ab 2008 kommerziell anzubieten.

Inhalt

1	Verzeichnis von Bildern und Tabellen	7
2	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	9
3	Zusammenfassung	10
4	Einleitung	11
5	Darstellung der Arbeitsschritte und Ergebnisse	13
5.1	AP 1 - Optische Dimensionierung und Layout des Kollektors	13
5.2	AP 2 - Konstruktion der Primärspiegel und des Sekundärkonzentrators für Vakuumröhrenabsorber	15
5.2.1	Primärspiegel	15
5.2.2	Receiver	17
5.3	AP 3 - Regelung und Steuerung des Fresnel-Kollektors	19
5.3.1	Antriebe	19
5.3.2	Winkelsensoren	22
5.3.3	Solarsensoren	23
5.3.4	Mess- und Steuerungstechnik	25
5.3.5	Software	26
5.4	AP 4 - Aufbau und Funktionstests an einem Modul des Fresnel-Kollektors	30
5.4.1	Kollektoraufbau	30
5.4.2	Hydraulische Installation	34
5.4.3	Funktionstests	38
5.5	AP 5 - Detailplanung, Systemsimulationen, Regelung und Steuerung des Gesamtsystems	43
5.5.1	Systemsimulationen	43
5.5.2	Optischer Wirkungsgrad	44
5.5.3	Bruttowärmeertrag	50
5.6	AP 6 - Vorfabrikation und Installation des Gesamtsystems	53
5.6.1	Stahlstruktur	53
5.6.2	Receiver	55
5.6.3	Primärspiegel	55
5.6.4	Primärspiegelantriebe	57
5.6.5	Gesamtsystem	57
6	Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung	61

7	Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung	62
7.1	Das Potential für solare Prozesswärme	62
7.2	Kostenstruktur	64
7.3	Zusammenfassung	65
8	Verbreitung der Vorhabensergebnisse	66
9	Fazit	67
10	Literaturverzeichnis	68
11	Anhänge	68
11.1	A1 - Messbericht des Fraunhofer ISE:	68

1 Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1: Prinzip des Fresnelkollektors	12
Abbildung 2: Kleinste modulare Einheit des Kollektors	14
Abbildung 3: Primärspiegelkonstruktion	16
Abbildung 4: Vorderansicht des Receivers ohne Vakuumabsorberrohr	17
Abbildung 5: Receivergehäuse	17
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Vakuumabsorberrohres	18
Abbildung 7: Aufhängung des Absorberrohres	18
Abbildung 8: Haselhofer Antrieb, Prototyp in Freiburg	20
Abbildung 9: Antriebseinheit, Prototyp in Bergamo	21
Abbildung 10: Winkelsensoren	23
Abbildung 11: Solarsensoren	24
Abbildung 12: Signal Solarsensoren	24
Abbildung 13: PC104 Embedded PC und analoge Erweiterungskarte	25
Abbildung 14: Schematische Darstellung der Steuerungssoftware	28
Abbildung 15: Handsteuerungs-modus der grafischen Benutzeroberfläche	29
Abbildung 16: Automatikmodus der grafischen Benutzeroberfläche	29
Abbildung 17: Errichtung des Stahlgestells	30
Abbildung 18: Vorbereitung zum Verschweißen der zwei Absorberrohre.	31
Abbildung 19: Montage der Primärspiegel	31
Abbildung 20: Antrieb einer Primärspiegelreihe	32
Abbildung 21: Anschlussflansch mit Temperaturfühler und Entlüftungsventil	32
Abbildung 22: vorgefertigte Spiegel in der PSE Werkstatt	33
Abbildung 23: Inbetriebnahme und erster Funktionstest im Dezember 2005	33
Abbildung 24: Inbetriebnahme und erster Funktionstest im Dezember 2005	34
Abbildung 25: hydraulisches Verschaltungsschema	36
Abbildung 26: 3D-Zeichnung der Pumpengruppe mit Rückkühler	37
Abbildung 27: Foto: Ausdehnungsgefäß, Pumpe, Luftkühler, etc	37
Abbildung 28: Der Kollektor im Testbetrieb im Sommer 2006	39
Abbildung 29: Messdaten vom 19.07.2006.	40
Abbildung 30: Messdaten vom 22.09.2006.	41
Abbildung 31: Messdaten vom 07.11.2006.	41
Abbildung 32: Wirkungsgradkennlinie	42
Abbildung 33: 2-D Screenshots aus dem Raytracingprogramm OptiCAD	45
Abbildung 34: IAM des Prozesswärmekollektors in Freiburg.	46
Abbildung 35: IAM-Tagesläufe für den 18. und 19. Juli	47
Abbildung 36: IAM-Tagesläufe für den 22. und 23. September	47
Abbildung 37: IAM-Tagesläufe für den 6. und 7. November	48
Abbildung 38: Einfluss der Kollektorlänge auf den IAM.	49
Abbildung 39: Optischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Primärspiegelqualität	50
Abbildung 40: Spezifischer Bruttowärmeertrag an verschiedenen Standorten	51
Abbildung 41: Der Einfluss der Kollektorlänge	51
Abbildung 42: Komplettes thermohydraulisches System in TRNSYS	52

Abbildung 43: Zeichnung der Stahlstruktur mit Receiver	54
Abbildung 44: Stahlstruktur mit Querstreben für Montageplattformen	54
Abbildung 45: Montage der Absorberröhren und der Receiver	55
Abbildung 46: Form zur Fertigung der Primärspiegel	56
Abbildung 47: Installation der Primärspiegel	56
Abbildung 48: Primärspiegelantrieb mittels Getriebemotor und Keilriemen	57
Abbildung 49: Das Montageteam nach vollbrachter Arbeit	58
Abbildung 50: Brennlinie auf abgedecktem Absorber	58
Abbildung 51: Inbetriebnahme	59
Abbildung 52: Mit Kältemaschine	59
Abbildung 53: Messung mit Kältemaschine, 19.09.06	60
Abbildung 54: Endenergiebedarf in Deutschland 2003	63
Abbildung 55: Temperaturverteilung der industriellen Prozesswärme	63
Abbildung 56: Kostenstruktur eines Projekts in Südeuropa	64
Abbildung 57: Materialkosten des Kollektors	65
Tabelle 1: Dimensionierung des Kollektors	14
Tabelle 2: Vergleich der beiden Klappenstellantriebe	20
Tabelle 3: Technische Daten des Gleichstromgetriebemotors	21
Tabelle 4: Vergleich der beiden Winkelsensoren	22
Tabelle 5: Installierte hydraulische Komponenten	35
Tabelle 6: Messtage mit quasistationären Messzuständen	39

2 Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Zeichen / Abk.	Begriff	phys. Einheit
DNI	Direktnormalstrahlung	W/m ²
BWE	spezifischer Bruttowärmeertrag pro Jahr und m ² Kollektorfläche	kWh/(m ² ·a)
CSR	Zirkumsolaranteil, Anteil der Zirkumsolarstrahlung an der Direktstrahlung	-
θ	projizierter Sonnenstandswinkel Transversalwinkel	°
φ	projizierter Sonnenstandswinkel Longitudinalwinkel	°
$\eta(\theta, \varphi)$	optischer Wirkungsgrad	-
η_0	optischer Wirkungsgrad für senkrechte Einstrahlung, $\eta(0,0)$	-
a_1	Linearer Wärmeverlustkoeffizient	W/m ² K
a_2	Quadratischer Wärmeverlustkoeffizient	W/m ² K ²
σ_{tot}	totaler Spiegelfehler	mrad
IAM	Einstrahlwinkelkorrekturfaktor	-
IAM _⊥	transversaler IAM	-
IAM	longitudinaler IAM	-
$I_{\text{Sun}}(r)$	Winkelverteilung des direkten Sonnenlichts, Sunshape	-

3 Zusammenfassung

Aufbauend auf bestehendem Know-how zu linearen Fresnel Kollektoren die für die solarthermische Stromerzeugung entwickelt werden, wurde ein Fresnel Prozesswärmekollektor entwickelt, der im Leistungsbereich ab ca. 25 kW_{th} Prozesswärme mit bis zu 200 °C erzeugt. Der Kollektor ist sehr gut für die Montage auf Flachdächern geeignet, da er niedrige Windlasten hat und die verfügbare Grundfläche sehr effektiv ausnutzt.

Das Hauptpotential des Kollektors wird in der Bereitstellung industrieller Prozesswärme z.B. in der Lebensmittel- oder Textilindustrie gesehen oder zur solaren Kühlung durch die Kopplung mit Absorptionskältemaschinen.

Im Rahmen des Projekts wurden zunächst Schlüsselkomponenten entwickelt, bevor ein Prototypkollektor in Freiburg installiert und in Betrieb genommen wurde. An dem Kollektor wurden Betriebserfahrung gesammelt und gemeinsam mit dem Fraunhofer ISE detaillierte Leistungsmessungen vorgenommen. Die Messungen stimmen sehr gut mit den theoretischen Erwartungen überein.

Ein zweiter Prototyp wurde auf dem Dach des Firmensitzes der Firma Robur installiert und betreibt dort eine NH₃/H₂O Kältemaschine, die ihre Kälte in das Kältenetz der Firma einspeist. Die Betriebserfahrung mit dieser Anlage ist sehr positiv, das Zusammenspiel von Kältemaschine und Kollektor funktioniert auch im Teillastbereich problemlos.

Beide Prototyp Kollektoren werden noch das ganze Jahr 2007 über betrieben und messtechnisch evaluiert werden. Dabei wird auch der notwendige Betriebs- und Wartungsaufwand quantifiziert werden.

Als nächste Schritte sind Maßnahmen zur Materialeinsparung, Automatisierung und Qualitätssicherung in der Produktion geplant. Weitere notwendige Arbeiten sind die Integration dieser Technologie in bestehende Normen und Richtlinien der Installationstechnik. Auch in der messtechnischen Qualifizierung des Kollektors ist noch grundlegende wissenschaftliche Arbeit zu leisten. Es hat sich herausgestellt, dass die bestehenden Normen unzureichend sind, diesen Kollektortyp zu erfassen.

Kooperationspartner in diesem Entwicklungsprojekt waren die Firma Robur S.p.A., Via Parigi 4/6, I-24040 Verdellino/ Zingonia (Bg) und das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, D-79110 Freiburg

Das Vorhaben wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem AZ 23951 gefördert.

4 Einleitung

Der Energiebedarf für Kühlung im Gebäudebereich steigt weltweit stetig an. Erste Zahlen aus Mitgliedsländern der International Energy Agency IEA lassen erwarten, dass der Energiebedarf für Gebäudekühlung etwa doppelt so schnell wächst wie der Gesamtenergiebedarf von Gebäuden. Diesem erhöhten Kühlbedarf wird augenblicklich mit dem Einsatz von elektrisch betriebenen Klimaanlage begegnet, was allerdings regelmäßig zu einer Überlastung, teilweise sogar zu einem temporären Totalausfall der Stromnetze, wie in Italien im Sommer 2003, führt. Solare Kühlungsanlagen sind in der Lage diese Situation entschärfen, da zu den Zeiten des maximalen Kühlbedarfs auch das Angebot an Solarenergie maximal ist. So können hohe solare Deckungsraten erreicht werden.

Unter den thermisch angetriebenen Kältemaschinen haben zwei Technologien die größte Entwicklungsreife:

- Absorptionskältemaschinen mit dem Stoffpaar Ammoniak / Wasser ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) weisen, falls sie mit Prozesswärme bei ca. 180°C angetrieben werden, eine hohe Temperaturspreizung von bis zu 55 K auf. Mit diesen Anlagen kann Eis erzeugt werden und die Abwärme kann auch bei hohen Umgebungstemperaturen kostengünstig über einen Trockenkühlturm abgeführt werden.
- Kältemaschinen mit dem Stoffpaar Wasser / Lithiumbromid ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$) erreichen lediglich einen Temperaturhub von ca. 25 K und Kühlmitteltemperaturen über dem Gefrierpunkt. Die Abwärme muss in der Regel mittels eines kostenaufwendigeren Nasskühlturms abgeführt werden. Stehen ausreichend hohe Antriebstemperaturen zur Verfügung, können allerdings zweistufige Anlagen eingesetzt werden, die einen COP bis zu 1,2 ermöglichen.

Der Markt für Solarkollektoren zum Antrieb dieser thermischen Kältemaschinen beschränkt sich auf Kollektoren zur Warmwasserbereitung mit einer maximalen Betriebstemperatur von etwa 120°C (wenige Ausnahmen bis 150°C). Eine »Handvoll« Firmen entwickeln kleine Parabolrinnenkollektoren mit denen auch höhere Betriebstemperaturen angestrebt werden.

Neben der Parabolrinne gibt es in der Familie der linienfokussierenden Kollektoren auch den sogenannten Fresnel-Kollektor, bei welchem mehrere einachsige nachgeführte Primärspiegelstreifen das Sonnenlicht auf ein Absorberrohr reflektieren (siehe Abbildung 1).

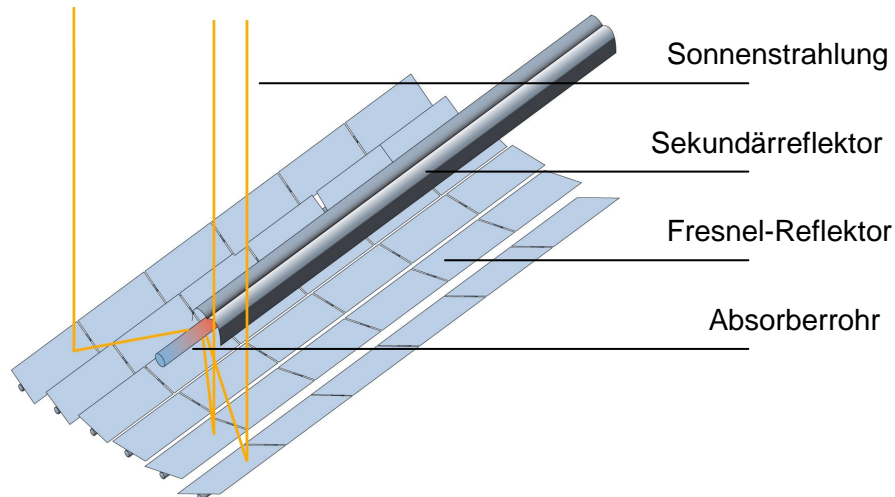


Abbildung 1:
Prinzip des
Fresnelkollektors

Die Vorteile dieses Kollektortyps sind im Vergleich zur Parabolrinne:

- Stationärer Receiver
- Geringe Windlasten
- Keine plastisch geformten Spiegel (Flachglas)
- Mögliche Nutzung der verschatteten Fläche unter dem Primärspiegelfeld (z.B. als Parkplatz oder als landwirtschaftliche Fläche)

Die bisherigen Entwicklungen zu Fresnel-Kollektoren zielten klar auf die solarthermische Stromerzeugung im großen Maßstab. Die Kollektorgeometrie wurde mit einer Receiverhöhe von 10 m und einer Apertur von etwa 30 m so ausgelegt, dass erst Projekte ab einer thermischen Leistung von 10 bis 20 MW sinnvoll sind. Bei kleineren Kollektorfeldern dominieren Randeffekte.

Aufbauend auf Ergebnissen und Erfahrungen aus vorhergehenden Projekten ist es deshalb Ziel dieses Projektes einen kleineren Fresnel-Kollektor zu konstruieren, welcher Prozesswärme im Temperaturbereich von etwa 200°C bereitstellen kann und der für Kollektorfelder mit einer thermischen Leistung ab etwa 25 kW eingesetzt werden kann. Dies entspricht etwa der Antriebsleistung der kleinsten marktverfügbaren Absorptionskältemaschinen.

Durch die Kleinskalierung wird es möglich, die Dachfläche von Industriehallen für die Aufstellung des Kollektors zu nutzen. Da der Kollektor nur sehr niedrige Windlasten hat, ist es möglich ihn ohne Durchdringung der Dachhaut aufzustellen.

Im Laufe des Projektes wurden zunächst die Hauptkomponenten wie Primärspiegel und Sekundärkonzentrator entwickelt und ein Kollektor mit 88 m² Aperturfläche in Freiburg errichtet. Dabei konnte auf bestehendes technisches Know-how (z.B. im Bereich der Regelung) aufgebaut werden. Allerdings waren durch das Down-Scaling des Kollektors auch grundlegende Neuentwicklungen notwendig (Receiver mit Sekundärkonzentrator, Primärspiegel mit reduzierter Brennweite).

Nach dem erfolgreichen Abschluss von Funktionsprüfungen wurde dieser Kollektor im Rahmen eines Unterauftrags an das Fraunhofer ISE vermessen und charakterisiert.

Parallel zu den Detailmessungen des Fraunhofer ISE an einem Kollektormodul in Freiburg, wurde ein Gesamtsystem zur solaren Kälteerzeugung installiert und evaluiert.

5 Darstellung der Arbeitsschritte und Ergebnisse

5.1 AP 1 - Optische Dimensionierung und Layout des Kollektors

Ausgehend von wenigen geometrischen Randbedingungen wurde die Dimensionierung des Kollektors durch Raytracingsimulationen optimiert.

Eine feststehende Größe war die Abmessung des Absorberrohrs (SCHOTT PTR[®] 70) mit 4 m Länge und 70 mm Durchmesser. Die zweite, relativ willkürlich festgelegte Größe war die Breite der Spiegelreihen mit 0,5 m. Dieses Maß hat sich als gut handhabbar erwiesen. Eine Kostenoptimierung für sehr große Kollektorfelder würde den Verschnitt der Floatglasproduktion minimieren. Bei den von uns angestrebten Kollektorgrößen hat das allerdings noch keinen Einfluss auf den Spiegelpreis.

Ausgehend von diesen Randbedingungen wurde die Geometrie optimiert. Grundgedanke war eine hohe Modularität zu schaffen. Das Ergebnis war ein Kollektormodul mit 4 m Länge (durch das Absorberrohr) und 7,5 m Breite. 11 Spiegelreihen mit je 0,5 m Breite sind darin mit jeweils 20 cm Abstand zueinander montiert. Damit wird eine Aperturbreite von 5,5 m bzw. eine Aperturfläche von 22 m² pro Modul erreicht.

Tabelle 1: Dimensionierung des Kollektors

Länge	Modular in Einheiten von 4 m
Breite des Spiegelfeldes	7,5 m
Aperturweite	5,5 m
Abstand zwischen Primärspiegeln	0,2 m
Höhe des Receivers	4m über Spiegelfeld
Anzahl der Primärspiegel:	11
Breite der Primärspiegel:	0,5 m

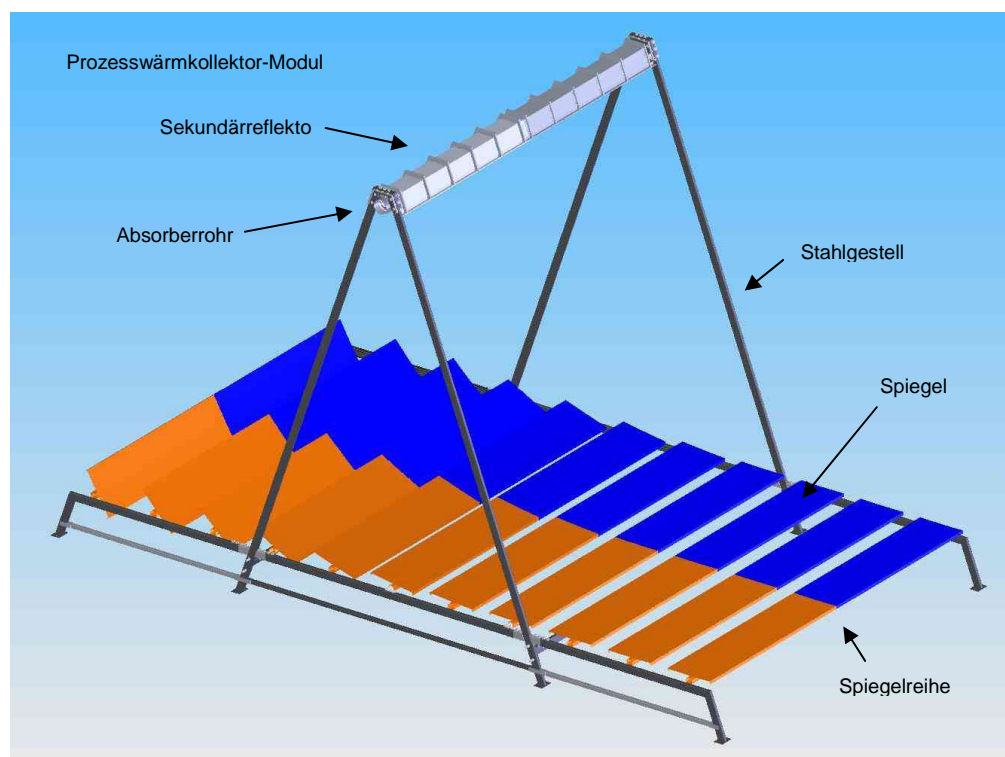


Abbildung 2:
Kleinste modulare Einheit des Kollektors

Das Absorberrohr liegt vertikal 4 m über dem Spiegelfeld und wird von A-Säulen getragen. Um eine Wärmeausdehnung nicht zu behindern, sind in die A-Säulen Gleitelemente eingesetzt. Das komplette Absorberrohr kann mit einer Höhenverstellung in den Fest- und Loslagern nivelliert werden. Die A-Säulen sind mit gelochten Stahlprofilen verbunden, an welche die Sekundärreflektoren mit Aluminiumklemmleisten befestigt werden.

Der Sekundärreflektor erstreckt sich über die gesamte Rohrlänge der Absorberrohre. Er besteht aus jeweils einen Meter langen Aluminiumblechen ("Solar Surface 992", Alcan Singen GmbH), welche innenseitig verspiegelt und in CPC-Form gekrümmt sind. Die Aperturbreite des Sekundärreflektors beträgt 30 cm. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich in Kap. 5.2.

Die einzelnen Spiegelreihen sind alle 4 m in Teflongleitlagern gelagert. Die Primärspiegel sind über mehrere 4 m Module hinweg starr verbunden und werden durch einen individuellen Motor nachgeführt. Alle Motoren werden von einem Embedded-Linux-Controller astronomisch gesteuert. Details zur Steuerung und zum Antrieb der Spiegel sind in Kap. 5.3 beschrieben.

5.2 AP 2 - Konstruktion der Primärspiegel und des Sekundärkonzentrators für Vakuumröhrenabsorber

5.2.1 Primärspiegel

Die Hauptanforderung an einen Primärspiegel ist die gerade, homogene und der Brennweite entsprechende Reflektion und Fokussierung des Sonnenlichts, unabhängig von Außentemperaturen, Temperaturschwankungen und Degradation. Daher ist es von vornherein wichtig, Materialien zu wählen, die möglichst ähnliche Stoffeigenschaften besitzen.

Aufgabe der Primärspiegelkonstruktion ist es, eine verspiegelte Fläche im gewünschten Radius zu halten, und dies mit dem geringsten Aufwand an Material, Fertigungsaufwand, Gewicht und Kosten

Unsere Anforderungen an Primärreflektoren sind:

- Gute optische Qualität auch bei variierenden Umgebungstemperaturen
- Niedrige spezifische Kosten
- Langlebigkeit
- Fertigungsmöglichkeit auch in Kleinserien
- Schutz Dritter bei Beschädigung der Struktur (z.B. bei Herunterfallen von Glasteilen)

Im Betrieb eines Fresnelkollektors können große Temperaturunterschiede entstehen. Wetter- oder betriebsbedingte Stillstände, wie z.B. Hagelsturm oder Wartungsarbeiten, bei denen die Spiegelrückseite und damit auch die Tragstruktur der Sonne ausgesetzt ist und die Umgebungstemperatur aber relativ niedrig ist, führen zu starken Temperaturgradienten, die unterschiedliche Ausdehnungen in der Struktur zur Folge haben. Diesem ist

durch geeignete Werkstoffwahl bzw. dem Vorsehen von Dehnfugen entgegenzuwirken.

Die Primärspiegelkonstruktion stellt mit rd. 40 Prozent den größten Anteil an den spezifischen Materialkosten eines Fresnelkollektors dar. Zur Senkung der Kosten ist es daher notwendig, die Konstruktion zu vereinfachen, indem viele gleiche, kostengünstig herstellbare Komponenten verwendet werden. Wenn möglich sollte auch auf Produktions- und Fügeverfahren zurückgegriffen werden, die sich in anderen Industriezweigen bereits etabliert haben und so auch die Langlebigkeit gewährleisten können, denn ein Prozesswärmekollektor soll viele Jahre unterbrechungsfrei Energie liefern. Jede Unterbrechung, z.B. durch Austausch beschädigter Spiegel hervorgerufen, schmälert den Energieertrag bzw. erhöht die Energiekosten.

Eine mögliche Bauart der Primärspiegel ist die mechanische Formung des Glasspiegels mittels vorgeformter Stahlprofile, sogenannter Querträger oder Spanten. Diese werden quer zur Längsachse des Spiegels in regelmäßigen Abständen auf der Rückseite des Spiegels aufgebracht. Zur Vermeidung des Durchhangs zwischen den Querträgern werden stabilisierend wirkende Stahlprofile in Längsrichtung aufgebracht. Zwischen den Längs- und Querträgern besteht i.d.R. eine mechanisch feste Verbindung, die den Glasspiegel versteift. Durch diese Maßnahmen wird die Formeinhaltung des Reflektors gewährleistet.

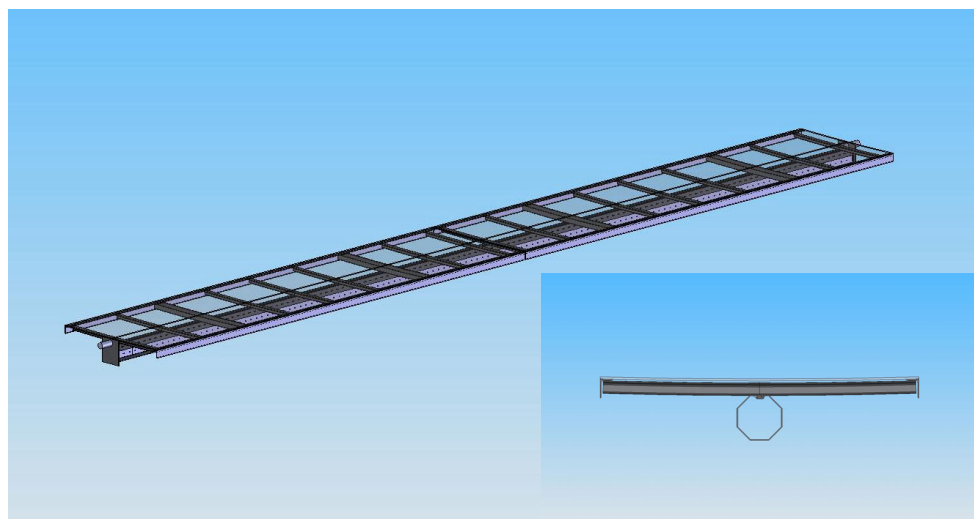


Abbildung 3:
Primärspiegelkon-
struktion

5.2.2 Receiver

Der Receiver besteht aus den folgenden Komponenten:

- Selbsttragendes Gehäuse aus Blech
- Sekundärreflektor aus Aluminium
- Vakuumabsorberrohr mit Halterung

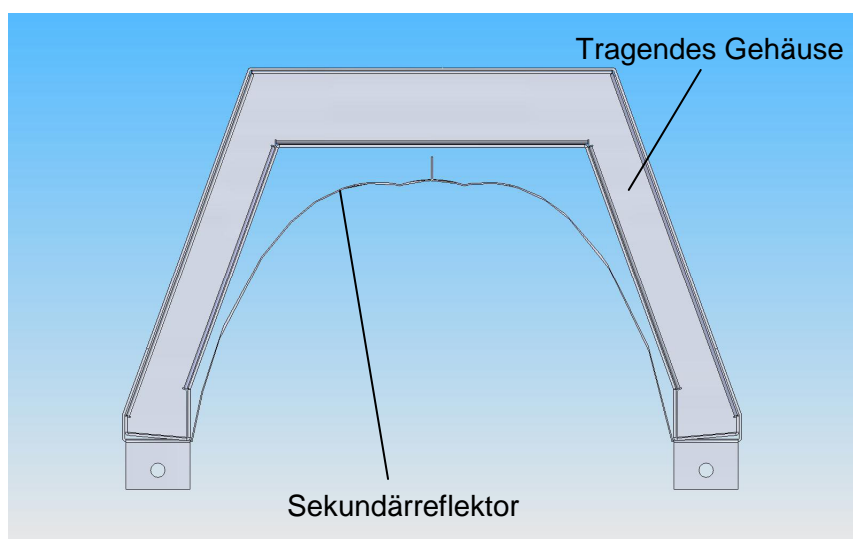


Abbildung 4:
Vorderansicht des
Receivers ohne
Vakuumab-
sorberrohr

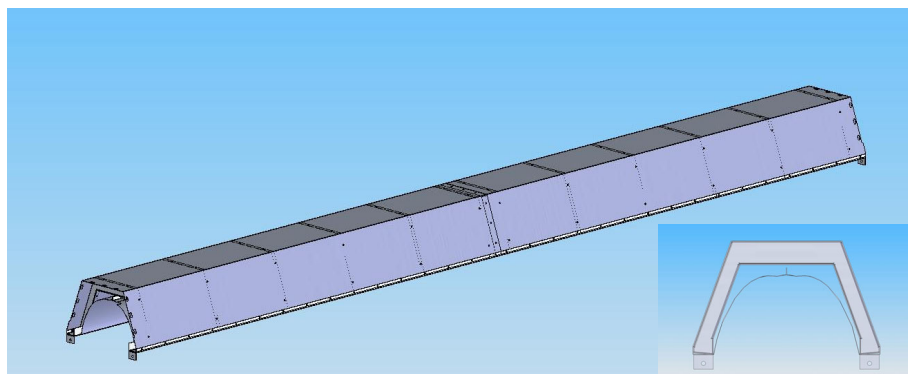
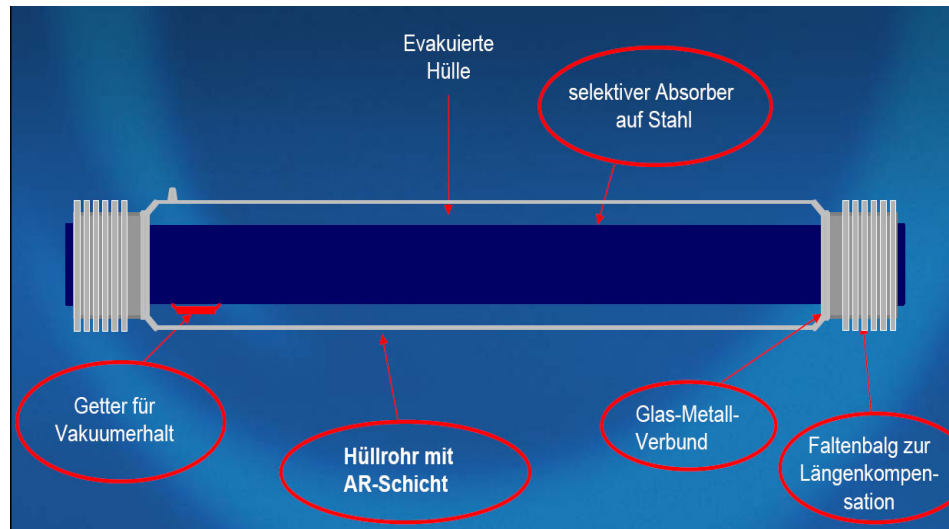


Abbildung 5:
Receivergehäuse

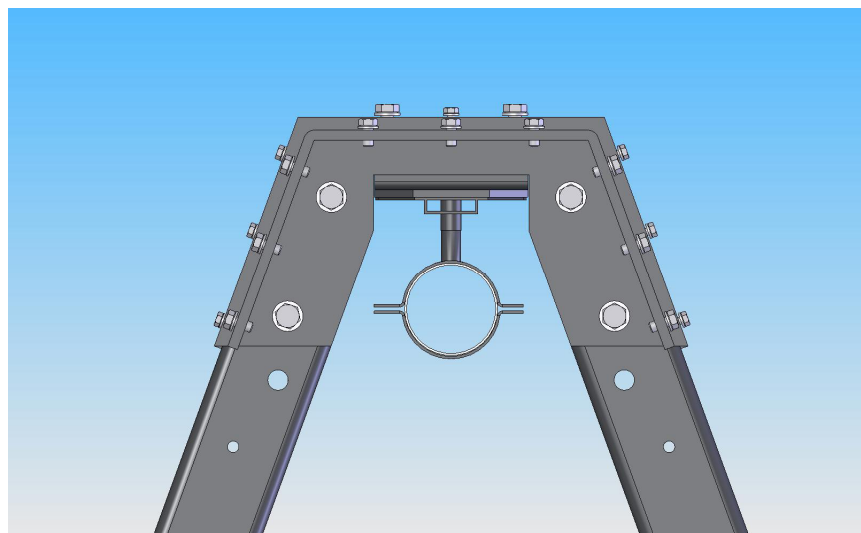
Sowohl der Sekundärreflektor als auch das selbsttragende Blechgehäuse wurde von Unterauftragnehmern nach unseren Angaben gefertigt.

Abbildung 6:
Schematische Darstellung des Vakuumabsorberrohrs



Die Vakuumabsorberrohre vom TYP PTR70 sind eine neue Entwicklung der Firma Schott für Parabolrinnenkollektoren in solarthermischen Kraftwerken. Das Absorberrohr mit 70 mm Durchmesser ist aus Edelstahl und für einen maximalen Druck von 30 bar zugelassen.

Abbildung 7:
Aufhängung des Absorberrohres



Die Halterung der Absorberrohre wurde so konstruiert, dass diese einerseits eine Höheneinstellung der Absorberrohre ermöglichen und andererseits die

Längenänderung der Absorberrohre durch die Temperatúrausdehnung aufnehmen.

5.3 AP 3 - Regelung und Steuerung des Fresnel-Kollektors

Bei der Entwicklung wurden zuerst die Randbedingungen für die Regelung definiert:

- a) Jede Spiegelreihe wird einzeln angetrieben
- b) Nachführgenauigkeit $\pm 0.1^\circ$
- c) Drehgeschwindigkeit min. $180^\circ/5\text{min}$
- d) Drehmoment 20 Nm

5.3.1 Antriebe

Es wurden verschiedenen Antriebsvarianten untersucht und hinsichtlich der oben genannten Randbedingungen evaluiert.

1. Prototyp Freiburg

Als wirtschaftlich interessante Lösung hat sich ein Klappenstellmotor herausgestellt. Um Produkte verschiedener Hersteller zu testen, wurde ein Teil des Kollektors mit Antriebe der Fa. Haselhofer und der andere Teil mit Antrieben der Fa. Aris ausgerüstet.

Tabelle 2: Vergleich der beiden Klappenstellantriebe

	Fa. Aris	Fa. Haselhofer
Nenn Drehmoment	20 Nm	20 Nm
Geschwindigkeit	90° / 60 sek.	60 ° / 60 sek.
Leistungsaufnahme	ca. 6 Watt	Ca. 6 Watt
Spannung	230 V	230 V
Preis	ca. 240 €	ca. 350 €

Die Antriebe wurden mittels Spannstifte mit der Spiegelachse verbunden, hierbei gab es aufgrund einer dünneren Getriebewelle bei den Aris Motoren Probleme. Daraufhin wurde der gesamte Kollektor auf Antriebe der Fa. Haselhofer umgerüstet.



Abbildung 8:
Haselhofer Antrieb,
Prototyp in Freiburg

2. Prototyp Bergamo

Beim zweiten Prototyp in Bergamo wurde eine neue Antriebsvariante gewählt. Zum Einsatz kam ein Gleichstromgetriebemotor mit zusätzlichem angeflanschem Getriebe ($i=6,75$). Die Anbindung erfolgt über einen Keilriemen mit der einer Untersetzung von 4:1. Daraus ergeben sich folgende Technische Daten für das Gesamtsystem

Tabelle 3: Technische Daten des Gleichstromgetriebemotors

	Fa. Seefried
Nenn Drehmoment (Getriebemotor)	5 Nm
Nenn Drehmoment (Spiegelachse)	ca. 100 Nm
Geschwindigkeit (Spiegelachse)	230° / 60 sek.
Leistungsaufnahme Spannung	ca. 24 Watt 24 VDC
Preis	ca. 250 €



Abbildung 9:
Antriebseinheit,
Prototyp in
Bergamo

3. Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass beide Antriebskonzepte zufriedenstellend funktionieren. Das Konzept für den zweiten Prototypen in Bergamo hat den Vorteil, dass durch die Kraftübertragung mit Keilriemen, eine rutschfähige Verbindungen geschaffen worden ist, welche die Gefahr einer Beschädigung (wie sie bei den Aris Motoren beim ersten Prototyp aufgetreten ist) ausschließt. Als Nachteil des zweiten Konzepts kann man die höhere Leistungsaufnahme und die höhere Drehzahl nennen.

5.3.2 Winkelsensoren

Aufgrund der unterschiedlichen Antriebskonzepte mussten auch unterschiedliche Winkelsensoren verwendet werden.

Tabelle 4: Vergleich der beiden Winkelsensoren

	1ter Prototyp (Freiburg)	2ter Prototyp (Bergamo)
Typ	Potentiometer	Hohlwellenpotentiometer
Hersteller	Novotechnik	Contelec
Wiederholgenauigkeit	0.01 °	< 0.1 °
Mechan. Anbindung	Über Zahnrad	Hohlwelle
Preis	ca. 40 €	ca. 110 €

Bei beiden Konzepten kamen Potentiometer (unterschiedlicher Bauform) zum Einsatz. Es wurde jeweils der Winkel an der Spiegelachse gemessen. Die Stellung der Potentiometer wird als Spannungsteiler mit einer analogen PC104 Erweiterungskarte gemessen.

Abbildung 10:
Winkelsensoren



Kalibrierung:

Die Sensoren für den ersten Prototyp in Freiburg wurden auf einem Teststand einzeln kalibriert. Als Referenzsensor wurde hierfür ein 14bit Drehgeber mit SSI Schnittstelle benutzt.

Die Sensoren für den zweiten Prototyp in Bergamo wurden im eingebauten Zustand kalibriert. Hierfür wurden Neigungssensoren (welche vorher auf dem oben genannten Teststand kalibriert wurden) auf der Spiegelfläche montiert und somit eine Kennlinie für jedes Potentiometer aufgenommen.

Fazit:

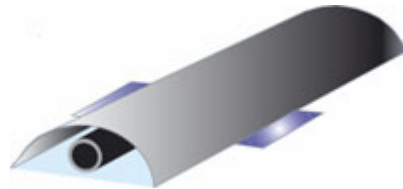
Beide Konzepte führten zu einer zufriedenstellenden Winkelbestimmung. Die Hauptprobleme traten bei der Messung des analogen Signals auf. Die zum Teil langen Leitungen zwischen Messtechnik und Sensor, führte zu einer Störung des Mess-Signals. Diese Störung kann durch den Einsatz eines digital/analog Wandlers direkt am Sensor reduziert werden. Die dazu notwendig Elektronik muss allerdings noch entwickelt werden.

Des Weiteren zeigte sich, dass eine Kalibrierung des Gesamtsystems (im eingebauten Zustand) einige Vorteile bietet. Der Messfehler, der durch die Anbindung von Winkelsensor an die Spiegelachse entsteht, kann somit eliminiert werden was wiederum zu einer höheren Messgenauigkeit führt.

5.3.3 Solarsensoren

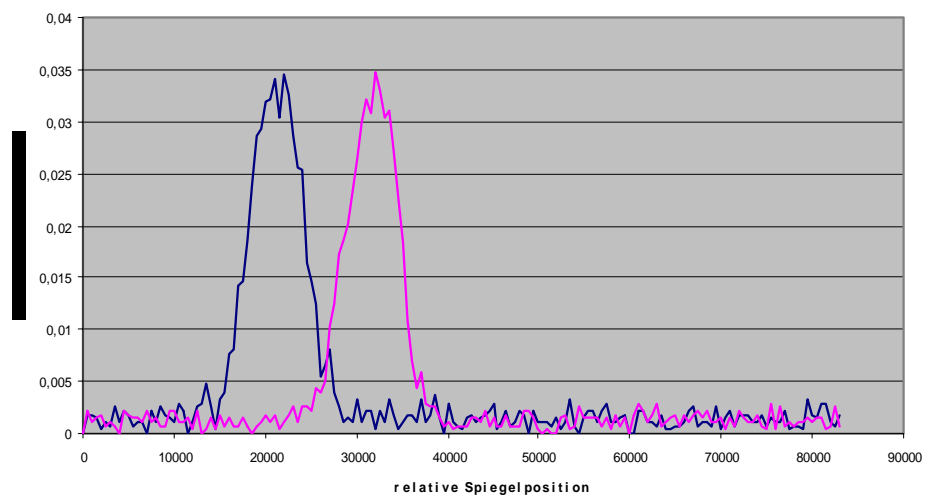
Um die Winkelstellung eines Spiegels automatisch zu bestimmen, wurden Solarsensoren auf beiden Seiten des Sekundärreflektors montiert. Zur automatischen Kalibrierung, wird nun eine Spiegelreihe so gedreht, dass sich der reflektierte Lichtstrahl erst über den einen und dann über den anderen Sensor bewegt.

Abbildung 11:
Solarsensoren



Über einen Widerstand wird der Kurzschlussstrom als Spannungssignal gemessen. Bei der Kalibrierung erhält man somit von jedem Sensorpaar ein Signal wie in Abbildung 12:

Abbildung 12:
Signal
Solarsensoren



Durch eine mathematische Schwerpunktsbestimmung wird nun jeweils die Mitte der beiden Peaks bestimmt. Da der Abstand zwischen Absorberrohr und Sensoren auf beiden Seiten gleich ist, kann man dadurch die exakte Position des Absorberrohrs berechnen.

Beim ersten Prototyp in Freiburg wurden insgesamt 4 Sensoren montiert. Beim Prototyp in Bergamo wurden insgesamt 6 Sensoren installiert.

Als Problem stellte sich wieder die Störung des analogen Signals bei langen Messleitungen heraus. Auch hier wäre eine Digitalisierung des Signals direkt am Sensor wünschenswert.

5.3.4 Mess- und Steuerungstechnik

Die Hardware besteht aus einem PC104 Embedded PC mit analogen und digitalen Erweiterungskarten. An die digitalen Ausgänge ist eine Relaisplatine angeschlossen über welche die Motoren geschaltet werden. Beim Prototyp in Bergamo sind noch zusätzliche Schütze zwischen der Relaiskarte und den Motoren geschaltet, da die Stromaufnahme dort deutlich höher ist.

Die Winkelsensoren und Solarsensoren werden direkt über Kontaktklemmen an die analoge Erweiterungskarte (16bit Auflösung) angeschlossen. Um die Störungen des analogen Mess-Signals möglichst gering zu halten, werden die Messwerte über die Software gefiltert.

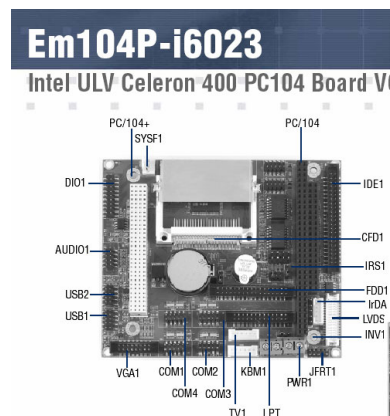
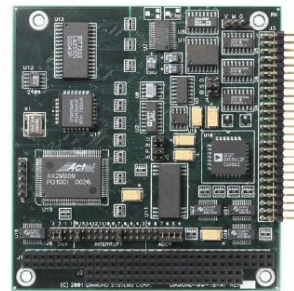


Abbildung 13:
PC104 Embedded
PC und analoge
Erweiterungskarte

DIAMOND-MM-16-AT

Autocalibrating
16-bit Analog I/O PC104 Module
User Manual V1.26



Temperaturregelung:

Um die Austrittstemperatur des Kollektors regeln zu können, ist direkt am Austritt des Kollektors ein Temperaturfühler installiert. Je nach Sollwert werden dann, über die Software einzelne Spiegel in oder aus dem Fokus gedreht.

Um eine Überhitzung des Kollektors, auch bei einem Ausfall der Regelung zu verhindern, gibt es bei dem Prototyp in Bergamo noch zusätzlich einen Thermostat, der direkt die Schütze im Schaltschrank schaltet und somit die Spiegel aus dem Fokus fährt. Ist dieser Fall eingetreten muss über einen Reset-Schalter der Regler wieder entsperrt werden.

Notstromversorgung:

Da die Anlage bei Stromausfall automatisch in einen sicheren Zustand gefahren werden muss, wurde beim Prototyp in Bergamo eine Notstromversorgung eingebaut. Sobald es zu einem Stromausfall kommt, werden alle Spiegel automatisch aus dem Fokus gefahren und der Embedded PC wird kontrolliert heruntergefahren.

Netzwerkanschluss:

Der Embedded PC kann über Ethernet an ein vorhandenes Netzwerk, oder direkt an das Internet angeschlossen werden. Über ein eigens entwickeltes TCP/IP Protokoll können dann Befehle an dem Embedded geschickt bzw. Messwerte ausgelesen werden. Hierzu steht eine grafische Oberfläche zur Verfügung.

Außerdem kann somit eine Fernüberwachung und Wartung des Systems über das Internet erfolgen.

5.3.5 Software

Die Software besteht aus zwei Teilen. Das Regelungsprogramm ist auf dem PC104 Embedded installiert und die grafische Benutzeroberfläche kann auf einem beliebigen Steuerrechner installiert werden und verbindet sich über Ethernet mit dem Steuerungsprogramm

Steuerungsprogramm

Das Steuerprogramm ist im Wesentlichen in drei Bereiche gegliedert. Die hardwarenahe Steuerung mit der Motorenansteuerung und der Sensoranbindung bildet die unterste Ebene. Diese dient der darauf aufbauenden, komplexeren Logik zur Spiegelansteuerung, -kalibrierung und

-koordination als Basis. In dem dritten Bereich ist die Funktionalität zur Berechnung der Spiegelausrichtung zusammengefasst.

- **Hardwarenahe Ebene**

In der hardwarenahen Ebene erfolgen die direkte Ansteuerung und das Auslesen der Motoren und Sensoren. Mittels der Konfigurationsdatei werden den Motoren digitale Ausgänge zur Ansteuerung und analoge Eingänge zur Positionserfassung zugewiesen. Einfache Aktionen wie drehen und eine Position anfahren werden auf dieser Ebene abgearbeitet.

- **Berechnung des Spiegelstellwinkels**

In die Berechnung des Spiegelstellwinkels fließen neben dem aktuellen Sonnenstand, berechnet auf Basis der aktuellen Uhrzeit und der geographischen Lage, die Ausrichtung der Anlage und die Position des betreffenden Spiegels relativ zum Absorber-Rohr ein.

- **Spiegelsteuerung**

Komplexere Aktionen wie die Kalibrierung der Spiegel oder das Tracking sind hier zusammengefasst und greifen auf die von den zuvor beschriebenen Ebenen zur Verfügung gestellte Funktionalität zurück.

Bei der Regelung auf einen Temperaturwert werden in regelmäßigen Abständen Soll- und Ist-Temperatur verglichen. Ist die Differenz außerhalb eines definierten Toleranzbereiches, wird nach einer festgelegten Folge ein zusätzlicher Spiegel entweder in den Fokus oder aus dem Fokus in eine Warteposition gefahren. Zu Verringerung der Reaktionszeit befindet sich diese Warteposition nahe der Fokus-Position. Wird eine absolute Temperaturobergrenze überschritten, werden sofort alle Spiegel in die Warteposition gefahren.

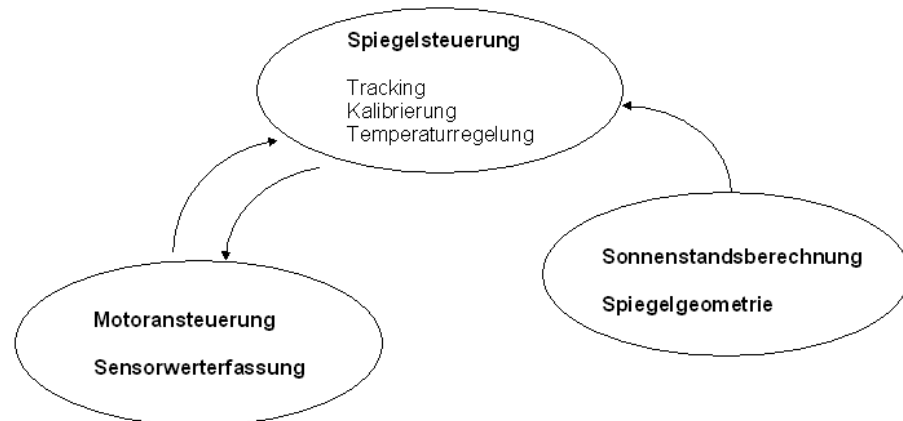


Abbildung 14:
Schematische
Darstellung der
Steuerungssoftware

Grafische Benutzeroberfläche

Die grafische Benutzeroberfläche ermöglicht es dem Anlagenbetreiber alle wichtigen Funktionen im Handmodus auszuführen oder den Kollektor im Automatikmodus auf eine bestimmte Austrittstemperatur zu regeln.

Im Handsteuerungsmodus können für jeden einzelnen Spiegel oder eine Spiegelgruppe, folgende Funktionen ausgeführt werden:

1. Im oder gegen den Uhrzeigersinn drehen.
2. Position anfahren.
3. Kalibrieren (mit den Solarsensoren)
4. Zielpunkt per Hand setzten
5. Tracking
6. Parkposition anfahren

Darstellung der Arbeitsschritte
und Ergebnisse



Abbildung 15:
Handsteuerungs-
modus der
grafischen
Benutzeroberfläche

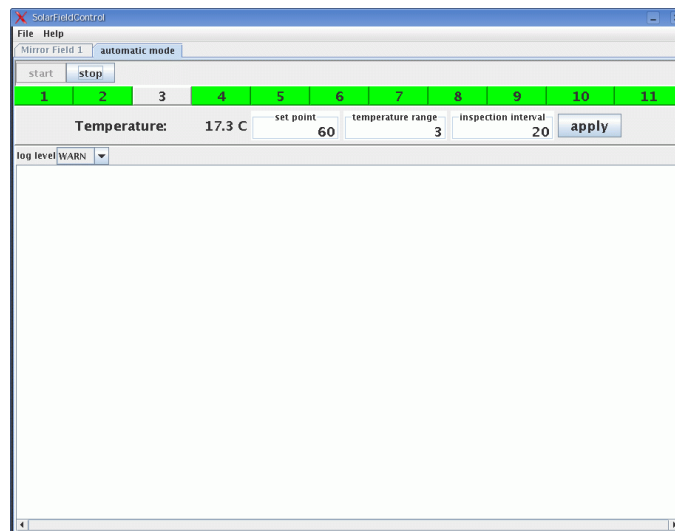


Abbildung 16:
Automatikmodus
der grafischen
Benutzeroberfläche

5.4 AP 4 - Aufbau und Funktionstests an einem Modul des Fresnel-Kollektors

5.4.1 Kollektoraufbau

Noch vor Jahresende 2005 wurde der erste Prototyp in Freiburg gefertigt, montiert und in Betrieb genommen.

Das Spiegelfeld überlappt das Absorberrohr um jeweils vier Meter. Dadurch werden die Reihenendverluste in den Morgenstunden und nachmittags verringert und die Zeit, in der das Absorberrohr über die volle Länge beleuchtet wird erhöht, so dass über einen größeren Zeitraum Messungen am voll beleuchteten Absorberrohr möglich werden. Die maximale Leistung des Kollektors beläuft sich auf etwa 18 kW bei 180 °C.

Jede Spiegelreihe besteht aus vier Rohrsegmenten à 16 m, die je zwei Glasspiegel aufnehmen. So ergibt sich eine Spiegelfläche von 88 m². Die 16 m langen Spiegelreihen werden an fünf Stellen mit Teflungleitlagern gelagert, der elektrische Antrieb befindet sich an einem Ende der Wellen. Das Absorberrohr liegt vertikal 4000 mm über dem Spiegelfeld und wird von drei A-Säulen aufgenommen. Das Festlager befindet sich in der mittleren A-Säule. Um eine Wärmeausdehnung nicht zu behindern, sind in beide anderen A-Säulen Gleitelemente eingesetzt. Die beiden Absorberrohre wurden vor Ort stumpf verschweißt.

Die folgenden Fotos in Abbildung 17 bis Abbildung 24 dokumentieren den Aufbau des Kollektors auf dem Dach der PSE Werkstatt in Freiburg.



Abbildung 17:
Errichtung des
Stahlgestells

Abbildung 18:
Vorbereitung zum
Verschweißen der
zwei Absorberrohre.



Abbildung 19:
Montage der
Primärspiegel



Abbildung 20:
Antrieb einer
Primärspiegelreihe



Abbildung 21:
Anschlussflansch
mit Temperatur-
fühler und
Entlüftungsventil





Abbildung 22: vorgefertigte Spiegel in der PSE Werkstatt



Abbildung 23: Inbetriebnahme und erster Funktionstest im Dezember 2005



Abbildung 24:
Inbetriebnahme und
erster Funktionstest
im Dezember 2005

5.4.2 Hydraulische Installation

Für die erste Inbetriebnahme Ende 2005 wurde der Kollektor mit einem provisorischen hydraulischen Kreislauf mit maximalem Betriebsdruck von 3bar ausgerüstet. Als Frostschutz wurde Wasser mit 40% Glykol verwendet.

Im Frühjahr 2006 wurde der Kollektor mit einem hydraulischen Kreislauf ausgestattet, der bei einem Betriebsdruck von bis zu 16 bar Betriebstemperaturen von rd. 200 °C ermöglicht. Nach Fertigstellung der hydraulischen Installation wurde der Kreislauf mit reinem Wasser als Wärmeträgermedium befüllt.

Der hydraulische Kreislauf wurde von der Fa. Imtech, Freiburg installiert.

Die Abfuhr der Wärme wird durch einen elektrisch betriebenen Luftrückkühler realisiert.

Tabelle 5: Installierte hydraulische Komponenten

Komponente	Fabr.	Typ.
BV Umluftkühlgerät	Weger	
Umwälzpumpe	Speck	HAT/CY 4281.MK
Speisepumpe	KSB	Movitec VF2/15
Durchflussmesser	Krohne	Optiflux 4300W + IFC300
Regelventil	Hora	MC163
Ausdehnungsgefäß	Reflex	G400 / 16bar
Absperrventil	Ari	Faba Long Life
Rückschlagventil	Ari	55.039
Hochdruck Entleerventil	Pruss	11152/122
Sicherheitsventil	Leser	429
Thermometer	Wika	SD 400 S
Druckmessumformer	Wika	F-20
Manometer	Wika	233.50.100

Darstellung der Arbeitsschritte
und Ergebnisse

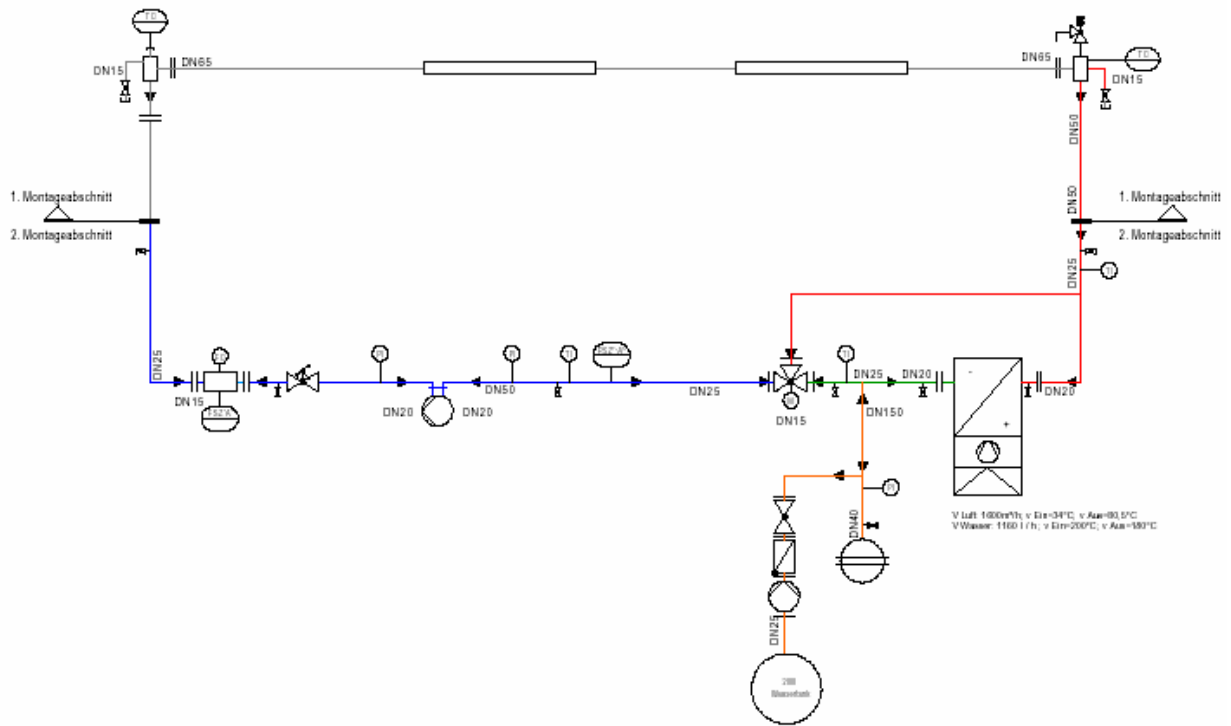


Abbildung 25: hydraulisches Verschaltungsschema

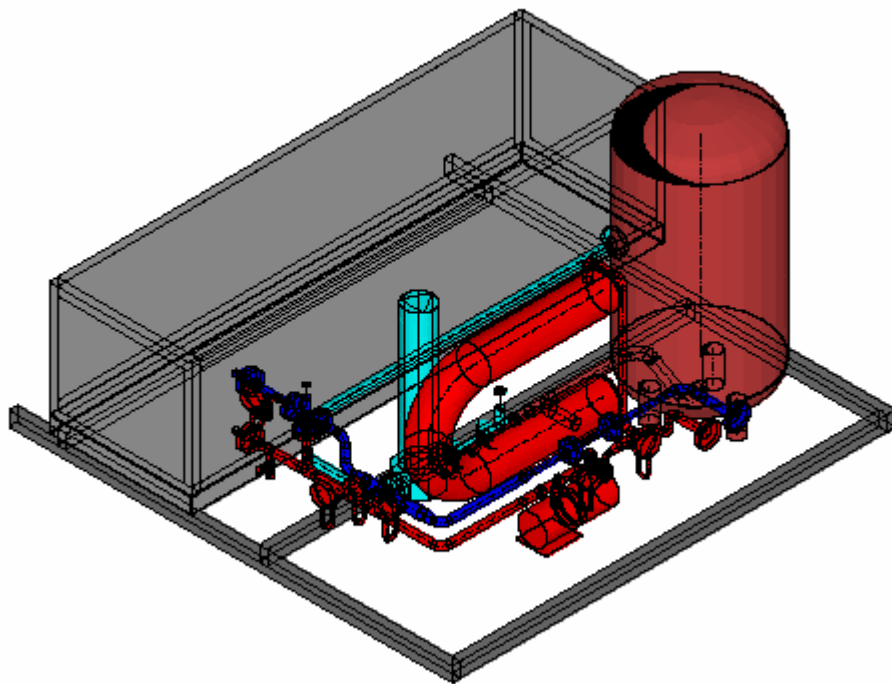


Abbildung 26: 3D-Zeichnung der Pumpengruppe mit Rückkühler



Abbildung 27:
Foto:
Ausdehnungsgefäß,
Pumpe, Luftkühler,
etc

5.4.3 Funktionstests

Für die Durchführung der Funktionstests wurde im Frühjahr 2006 folgende Messtechnik installiert:

- Pt100-Widerstandsthermometer , DIN Klasse A, im Wasserkreislauf am Kollektoreingang (Kalibrierung am 4.5.2006 durch Fraunhofer ISE)
- Pt100-Widerstandsthermometer , DIN Klasse A, im Wasserkreislauf am Kollektorausgang (Kalibrierung am 4.5.2006 durch Fraunhofer ISE)
- Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät zur Messung des Volumenstroms (Kalibrierung am 5.4.2006 durch Fa. Krohne Altometer)
- Pyranometer zur Messung der Globalhorizontalstrahlung (Kalibrierung am 24.2.2006 durch Fa. Kipp & Zonen)
- Pyrheliometer zur Messung der Direktnormalstrahlung (Kalibrierung am 30.1.2006 durch Eppley Laboratory Inc.)
- Datenlogger HP mit 20-Kanal-Multiplexer Karte, Laptop mit LAN-Anbindung zur Datenspeicherung und zum Versenden der Messdaten über Internet
- Pt100-Widerstandsthermometer, DIN Klasse A, mit Strahlungsschutz und Ventilator zur Messung der Umgebungstemperatur (keine Kalibrierung)
- Druckmessgerät zur Messung des Wasserdrucks (keine Kalibrierung)



Abbildung 28: Der Kollektor im Testbetrieb im Sommer 2006

Im Laufe des Sommers und Herbstes 2006 sind am Prototyp thermische Messungen zur Bestimmung der Kollektorleistung durchgeführt worden. An einigen Tagen mit stabilen Wetterbedingungen konnten quasistationäre Zustände bei unterschiedlichen Temperaturen erreicht werden, so dass am Fraunhofer ISE eine Kollektorkennlinie ausgewertet werden konnte. In Tabelle 6 sind die Messtage aufgeführt. In Abbildung 29 - Abbildung 31 werden exemplarisch Messdaten für je einen Tag im Juli, September und November dargestellt.

Tabelle 6: Messtage mit quasistationären Messzuständen

Datum	quasistationäre Messpunkte	Datum	quasistationäre Messpunkte
8.6.2006	-	13.7.2006	-
9.6.2006	-	17.7.2006	-
13.6.2006	-	18.7.2006	3
18.6.2006	-	19.7.2006	13
3.7.2006	-	27.7.2006	-
4.7.2006	-	28.7.2006	-
5.7.2006	-	22.9.2006	4
6.7.2006	-	6.11.2006	4
10.7.2006	-	7.11.2006	5

Datum	quasistationäre Messpunkte	Datum	quasistationäre Messpunkte
11.7.2006	-	16.11.2006	11
12.7.2006	-		

Die dunkelblauen Linien in Abbildung 29 bis Abbildung 31 markieren quasistationäre Messzustände. Abbildung 29 war ein klarer Sommertag.

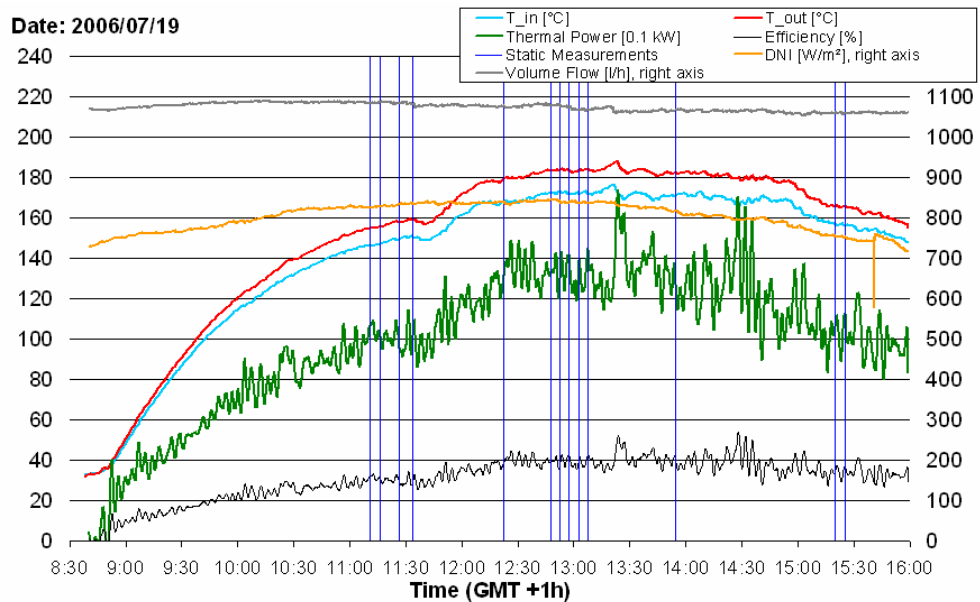


Abbildung 29:
Messdaten vom
19.07.2006.

Abbildung 30 sind Messdaten eines sonnigen Herbsttags. Nachmittags um kurz vor 14:00 Uhr erkennt man das Einsetzen leichter Bewölkung.

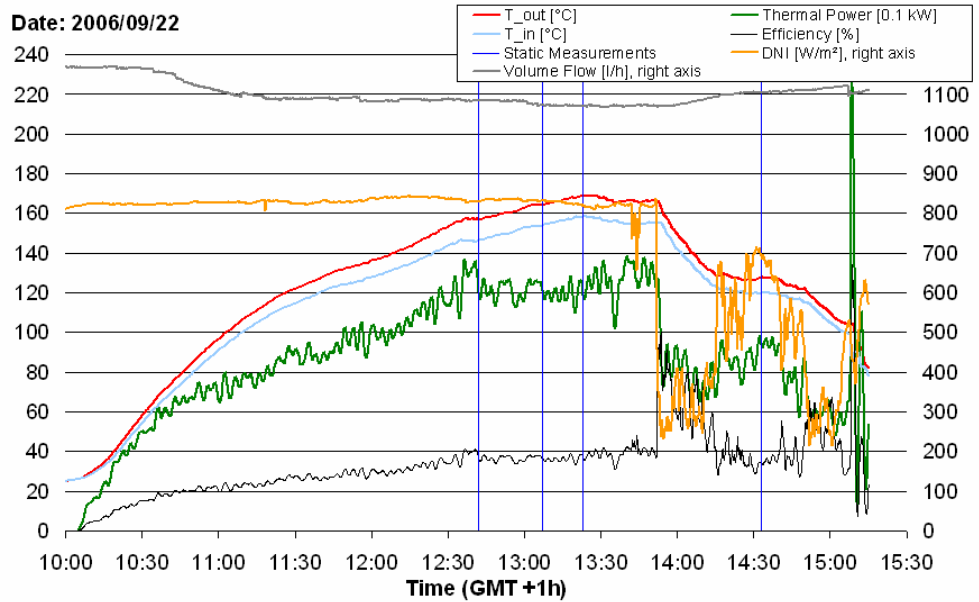


Abbildung 30:
Messdaten vom
22.09.2006.

In Abbildung 31 wurde mit Hilfe des Luftrückkühlers die Temperatur niedrig gehalten, um für die Kollektorkennlinie auch Messungen auf niedrigerem Temperaturniveau zu erhalten.

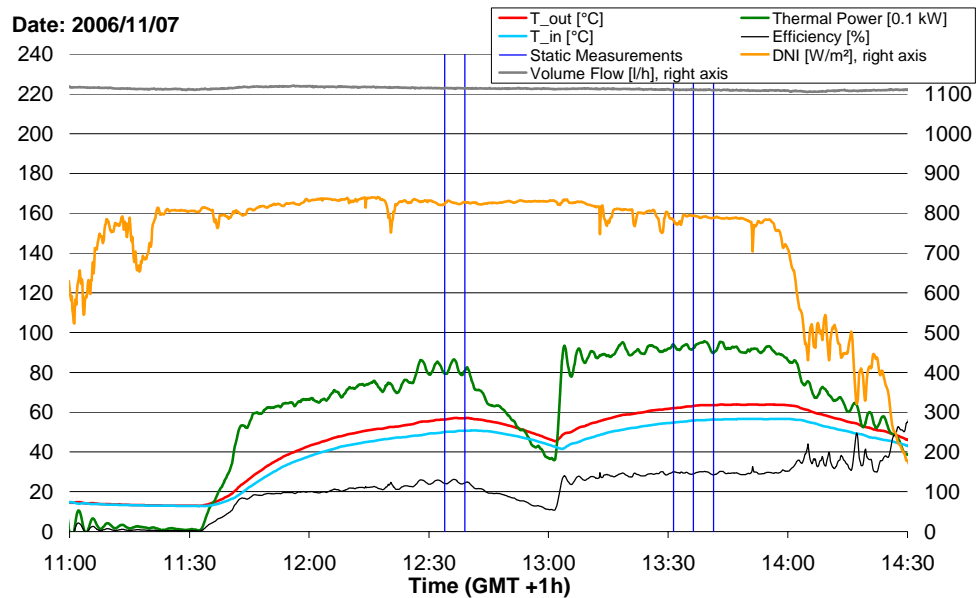


Abbildung 31:
Messdaten vom
07.11.2006.

Die Identifikation der quasistationären Messpunkte am Fraunhofer ISE wird in Anhang A1 ausführlich beschrieben. In Abbildung 32 ist die daraus resultierende Kollektorkennlinie zu sehen. Es ergeben sich ein gemessener optischer Wirkungsgrad von $\eta_0=0,58$ und ein linearer Wärmeverlustkoeffizient von $a_1 = 0,85 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, bezogen auf die Kollektoraperturfläche. Die Bestimmung des temperaturabhängigen Wärmeverlustkoeffizienten a_2 war nicht möglich.

Da eine Messung des IAM bisher nicht möglich war und nach Aussage des Fraunhofer ISE auch nur sehr schwierig durchzuführen sein wird, wurde für die Kollektorkennlinie ein durch Raytracing theoretisch berechneter IAM verwendet.

Hierzu wurden die gemessenen Kollektorleistungen zur ebenfalls gemessenen Direktnormalstrahlung ins Verhältnis gesetzt, um einen gemessenen optischen Wirkungsgrad zu erhalten. Dieser enthält jedoch noch den IAM und ist daher sonnenstandsabhängig bzw. abhängig von Tages- und Jahreszeit ist. Daher wurde der so gemessene optische Wirkungsgrad durch den theoretischen IAM geteilt, wodurch mit η_0 eine konstante Messgröße für alle Messungen in einer Kollektorkennlinie aufgetragen werden kann.

Die Kennlinie ist aufgrund der noch sehr geringen Anzahl quasistationärer Messpunkte mit einer großen statistischen Unsicherheit behaftet.

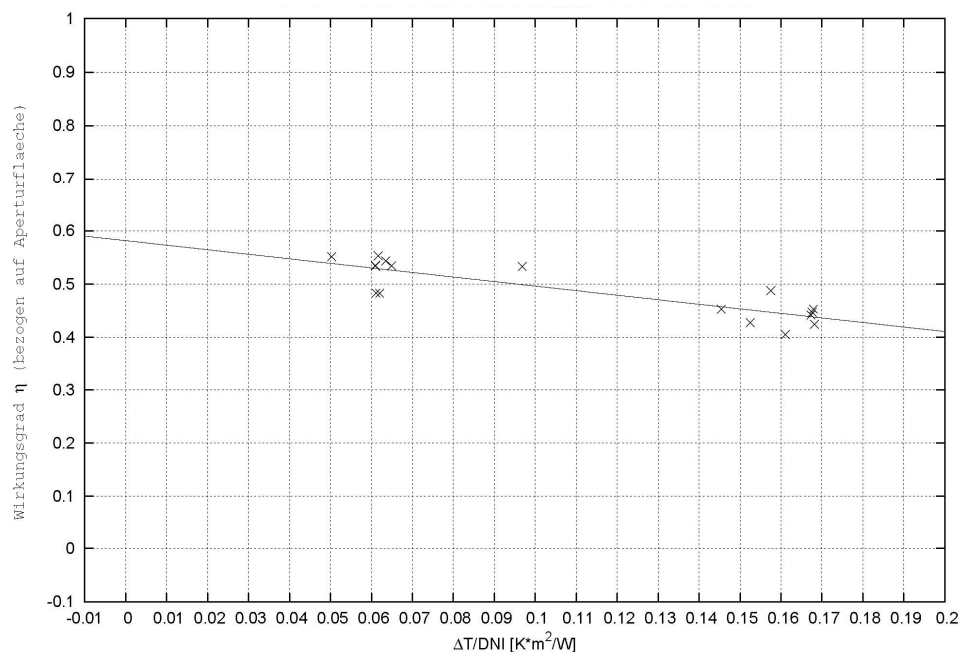


Abbildung 32:
Wirkungsgrad-
kennlinie

5.5 AP 5 - Detailplanung, Systemsimulationen, Regelung und Steuerung des Gesamtsystems

5.5.1 Systemsimulationen

Ziel der Simulationen ist es zum Einen, die Erträge eines linearen Fresnel-Prozesswärmekollektors für beliebige Standorte und Anwendungen berechnen zu können. Weiterhin dienen die Ergebnisse der Simulationen auch als Vergleichsmaßstab für Messungen.

Die Primärspiegel eines Fresnel-Kollektors werden der Sonne nachgeführt um die Solarstrahlung auf einen stationären Absorber zu konzentrieren. In Simulationen kann der Kollektor wie ein horizontaler, stationärer Kollektor mit interner Nachführung betrachtet werden, die durch einen zweiachsigen Einstrahlwinkelkorrekturfaktor $IAM(\theta, \varphi)$ ¹ abgebildet wird.

Die starke Abhängigkeit der Kollektorleistung vom Einstrahlwinkel des direkten Sonnenlichts (projizierte Sonnenstandswinkel θ und φ) erfordert zunächst über Raytracing den IAM winkelabhängig zu bestimmen. Mit Hilfe des so berechneten IAM und dem ebenfalls mit Raytracing berechneten optischen Wirkungsgrad für senkrechten Lichteinfall η_0 kann dann für jeden Sonnenstand (θ, φ) der optische Wirkungsgrad $\eta(\theta, \varphi)$ berechnet werden:

$$\eta(\theta, \varphi) = \eta_0 \cdot IAM(\theta, \varphi)$$

Der Bruttowärmeertrag (BWE) ist die maximal durch den Kollektor erzeugbare Wärme. Zur Berechnung des BWE geht man vom optischen Wirkungsgrad aus und berechnet für einen gegebenen Standort (geographische Koordinaten), mit dazu passenden Wetterdaten (Datum, Uhrzeit, Direktnormalstrahlung, Umgebungstemperatur), unter Abzug von Wärmeverlusten den Wärmeertrag des Kollektors. Lastprofile oder Verluste anderer Komponenten im thermischen Kreislauf werden hierbei nicht berücksichtigt. Dies wurde für verschiedene Standorte und Kollektorgrößen mit TRNSYS durchgeführt.

¹engl. Incident Angle Modifier

5.5.2 Optischer Wirkungsgrad

5.5.2.1 Das Raytracing-Modell

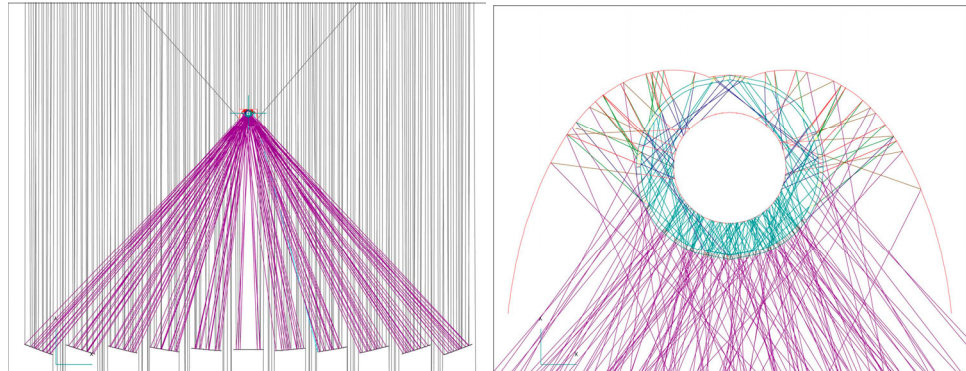
Im Raytracingprogramm OptiCAD wurde ein 3-D Modell des Kollektors erstellt, das die Abmessungen und optischen Eigenschaften des realen Kollektors so realistisch wie möglich wieder geben soll. So wurden folgende optisch relevanten Annahmen getroffen:

- gekrümmte Primärspiegel mit einer Reflektivität von 0,92.
- Sekundärspiegel in CPC-Geometrie mit einer Reflektivität von 0,77.
- Antireflexbeschichtetes Glashüllrohr mit einer Transmission von 0,96 bei senkrechtem Lichteinfall (Winkelabhängigkeit durch Fresnel-Reflexion vorgegeben).
- Absorberrohr mit einer Absorptivität von 0,95 für senkrechten Lichteinfall (Winkelabhängigkeit durch Fresnel-Reflexion vorgegeben).
- Alle optischen Fehler der Primärspiegel, darunter Montagefehler, Oberflächenungenauigkeit, Formfehler, Torsion und Nachführfehler, wurden mit einer gaußschen Winkelverteilung (Standardabweichung σ_{tot}) modelliert.
- Als Sunshape wurde eine Winkelverteilung $I_{\text{Sun}}(r)$ des direkten Sonnenlichts mit einem Zirkumsolaranteil (CSR) von 17 % abgebildet ([Neu02]):

$$I_{\text{Sun}}(r) = \begin{cases} 1 - 0,5138 \left(\frac{r}{4,65} \right)^4 & , r \leq 4,65 \\ 1,56 \cdot 10^{-18} \left(\frac{r}{1000} \right)^{-7,5} & , r > 4,65 \end{cases} \quad \text{mit } r \text{ in mrad}$$

- Die Verschattung durch den Receiver und die Stahlträger wird berücksichtigt.
- Kosinusverluste, Reihenendverluste, Verblockung und Verschattung der Spiegel untereinander wird berücksichtigt.

Abbildung 33: 2-D
Screenshots aus
dem Raytracing-
programm OptiCAD



Zunächst wurde mit diesem Modell für senkrechten Lichteinfall der Wirkungsgrad η_0 berechnet. Dann wurde mit der gängigen, vereinfachenden Annahme der Faktorisierbarkeit des IAM in einen transversalen und einen longitudinalen Anteil ([Rab85]), IAM_{\perp} und IAM_{\parallel} , für die projizierten Sonnenstands-Zenitwinkel θ und φ im Bereich von jeweils 0° bis 90° der optische Wirkungsgrad zu η_0 ins Verhältnis gesetzt:

$$IAM(\theta, \varphi) = IAM_{\perp}(\theta) \cdot IAM_{\parallel}(\varphi)$$

Daraus ergab sich für den Prozesswärmekollektor N149 in Freiburg der in Abbildung 34 dargestellte IAM . Mit Annahmen für Kollektorausrichtung, Datum und Standort lassen sich Tagesläufe für die projizierten Sonnenstandswinkel berechnen und daraus schließlich Tagesläufe für den IAM . In den Abbildung 35 bis Abbildung 37 sind exemplarisch die berechneten Tagesläufe für Tage im Juli, September und November dargestellt.

Die hier dargestellten Diagramme zeigen den IAM für des Freiburger Prototypkollektors jeweils bezogen auf die Direktnormalstrahlung (DN).

In Abbildung 34 ist deutlich zu sehen, wie zum Einen der longitudinale IAM aufgrund der Reihenendverluste ab 70° Zenitwinkel auf Null geht. Zum Anderen sieht man am transversalen IAM in den »Höckern« bei niedrigem Zenitwinkel den Einfluss des Receiverschattens.

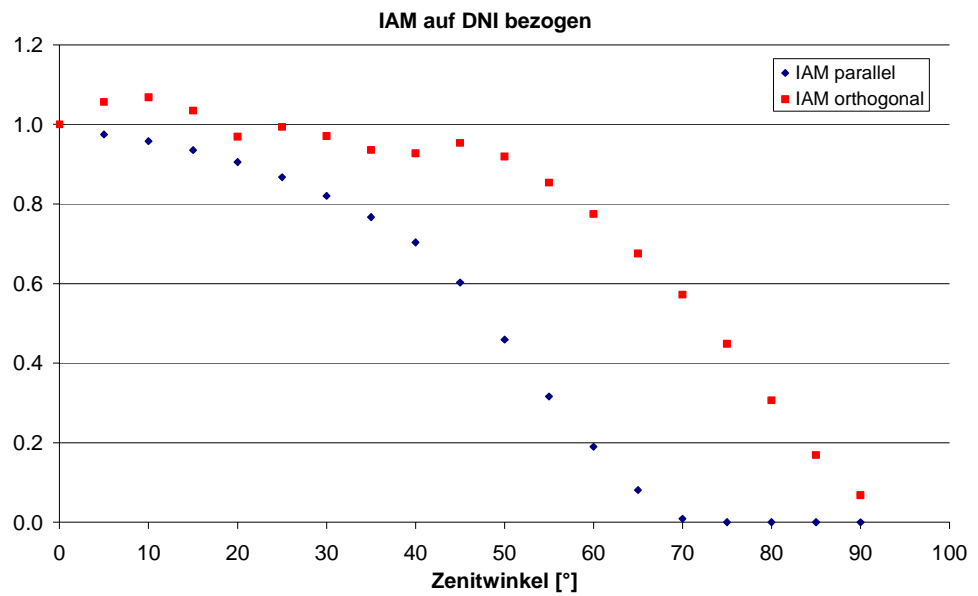


Abbildung 34:
IAM des
Prozesswärme-
kollektors in
Freiburg.

Im Tagesverlauf des IAM in Abbildung 35 für den Prozesswärmekollektor in Freiburg ist deutlich zu sehen, wie der Schatten des Receivers um etwa 10:00 Uhr und 12:00 Uhr eine Spiegelreihe verschattet. Zum anderen sieht man um etwa 13:30 Uhr den kurzen Moment, in dem die Stahlstruktur des Kollektors keinen Spiegel verschattet, da sich die Sonne genau in der Ebene der A-Säulen befindet.

Abbildung 35:
IAM-Tagesläufe für
den 18. und 19. Juli

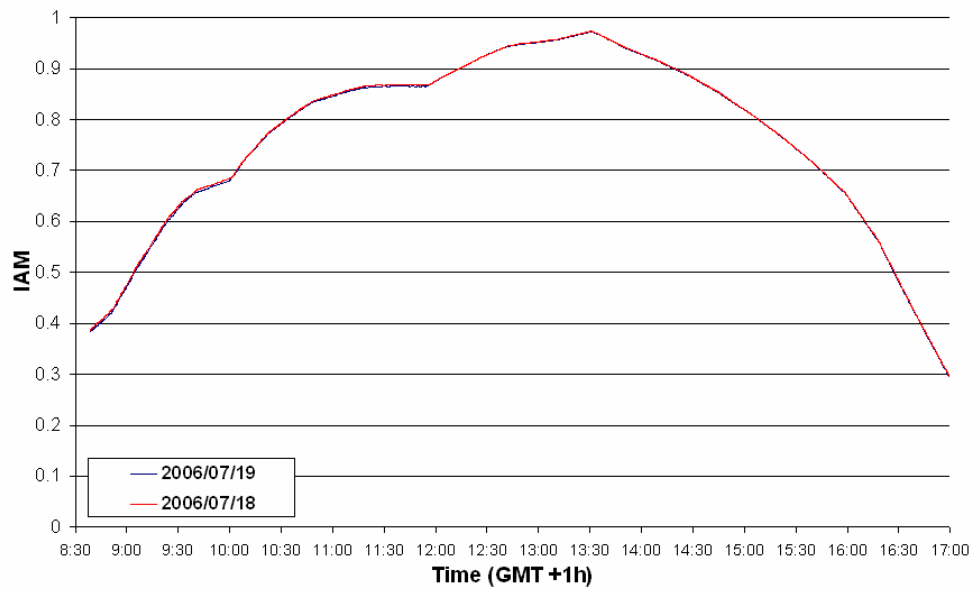
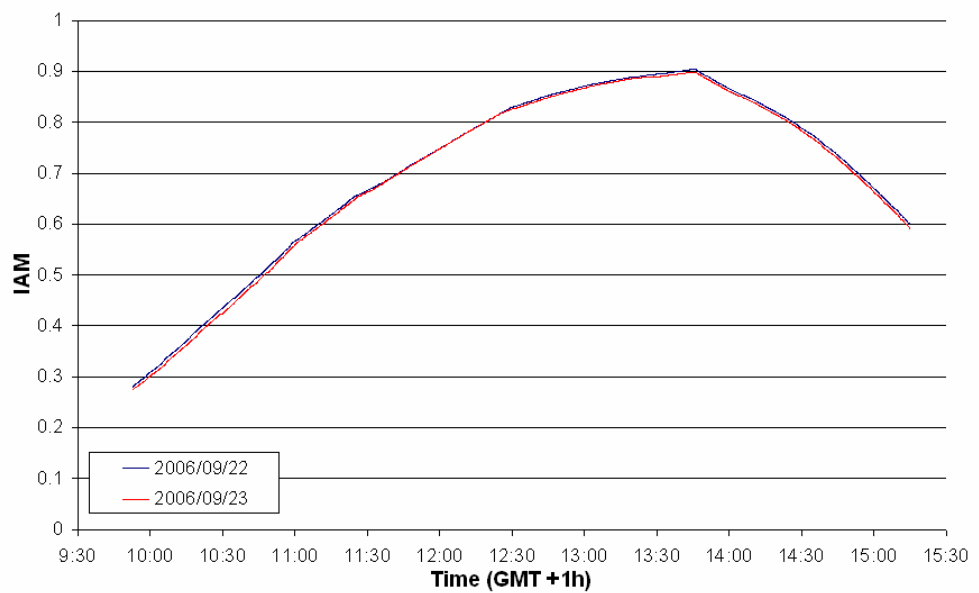


Abbildung 36: IAM-
Tagesläufe für den
22. und 23.
September



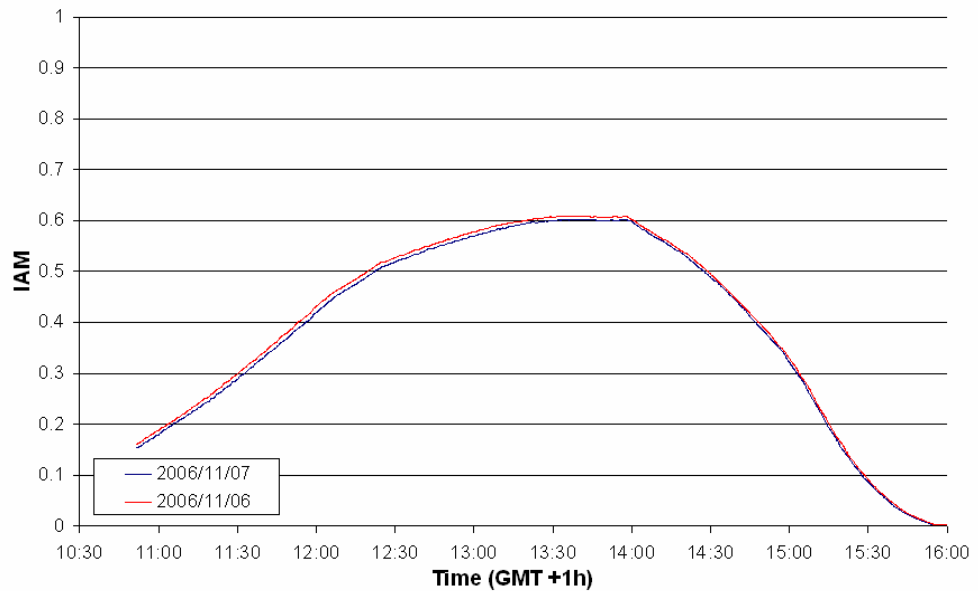


Abbildung 37: IAM-Tagesläufe für den 6. und 7. November

5.5.2.2 Reihenendverluste in Abhängigkeit der Kollektorlänge

Mit dem oben beschriebenen Raytracing-Modell wurden die longitudinalen *IAM* für verschiedene Kollektorlängen berechnet. Daran lassen sich die Reihenendverluste in Abhängigkeit der Kollektorlänge ablesen (siehe Abbildung 38). In schwarz ist der Idealfall eines unendlich langen Kollektors dargestellt. Je kürzer der Kollektor ist, desto stärker fällt der longitudinale *IAM* im Vergleich zur schwarzen Kurve für steigende Zenitwinkel ab.

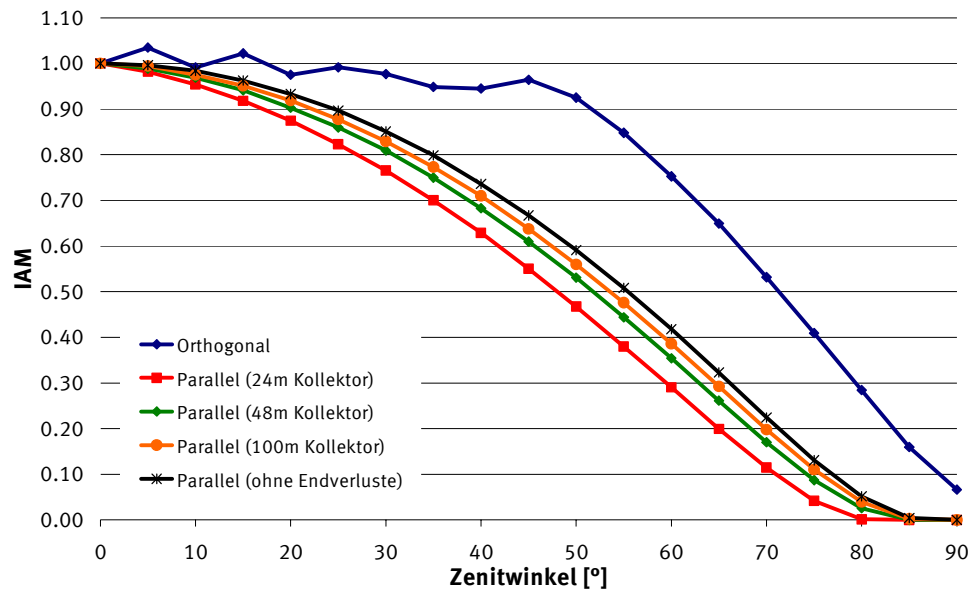
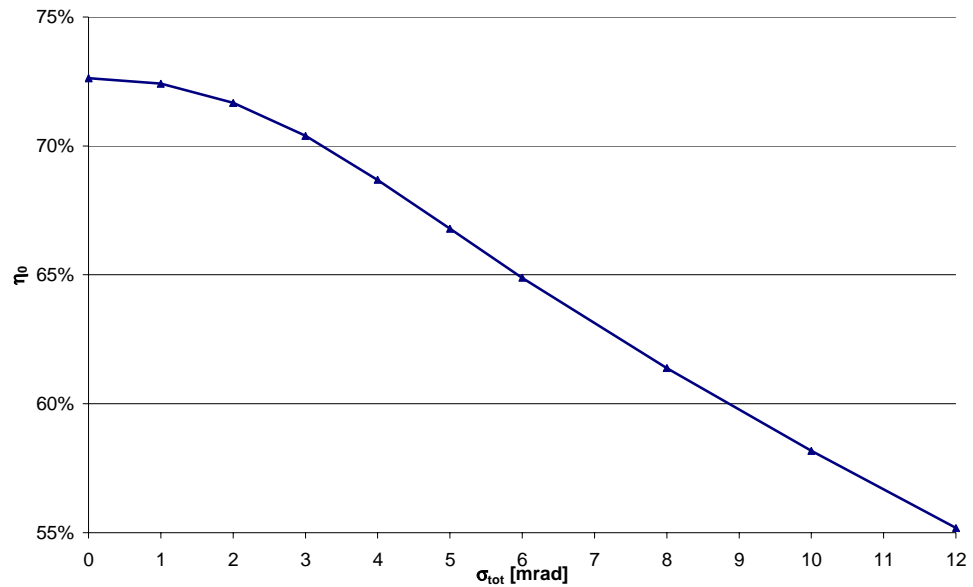


Abbildung 38:
Einfluss der
Kollektorlänge auf
den IAM.

Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss des Spiegelfehlers σ_{tot} auf den optischen Wirkungsgrad η_0 . Dieser Einfluss ist in Abbildung 39 dargestellt und verdeutlicht, wie stark die Qualität der Primärspiegel in den Ertrag des Kollektors eingeht. Die Primärspiegelqualität wird durch den absoluten Spiegelfehler σ_{tot} in mrad angegeben.

Abbildung 39:
Optischer
Wirkungsgrad in
Abhängigkeit der
Primärspiegel-
qualität

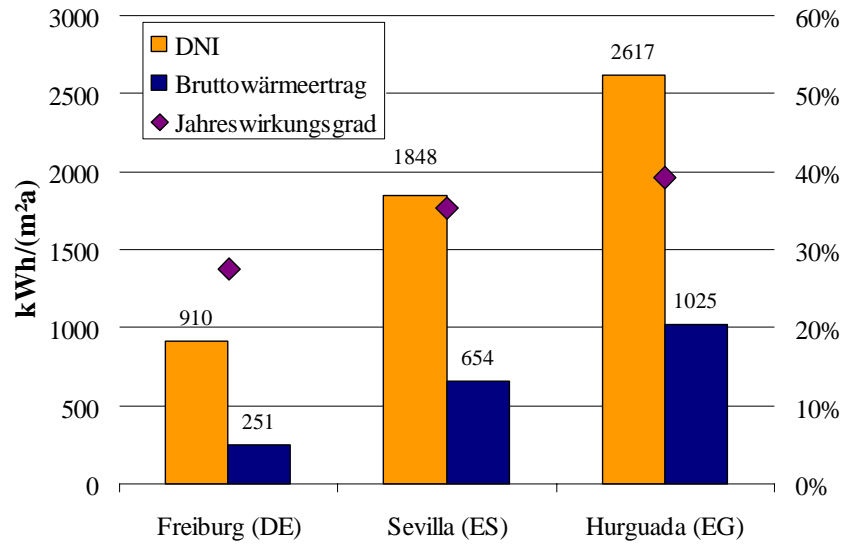


5.5.3 Bruttowärmeertrag

Der Bruttowärmeertrag des Kollektors wurde mit TRNSYS und Meteonorm-Wetterdaten berechnet, wobei keinerlei dynamische Effekte oder Anfahrverluste berücksichtigt wurden.

Abbildung 40 zeigt den spezifischen Bruttowärmeertrag an unterschiedlichen Standorten für einen 100 m langen Kollektor (Aperturfläche 550 m²) bei einer Betriebstemperatur von 200 °C an unterschiedlichen Standorten. In dieser Abbildung ist der Jahreswirkungsgrad als Verhältnis des Bruttowärmeertrags pro Aperturfläche zur jährlichen Summe der Direktnormalstrahlung (DNI) angegeben.

Abbildung 40: Spezifischer Bruttowärmeertrag an verschiedenen Standorten



In Abbildung 41 wird der jährliche Bruttowärmeertrag bei 200 °C Betriebstemperatur für einen Kollektor unterschiedlicher Länge am Standort Sevilla dargestellt. Wie erwartet werden Reihenendverluste für kurze Kollektoren signifikant. Jedoch bleiben die Endverluste bereits ab einer Kollektorlänge von 30 m unter 10 % und für Kollektoren von mehr als 60 m Länge unter 5 %.

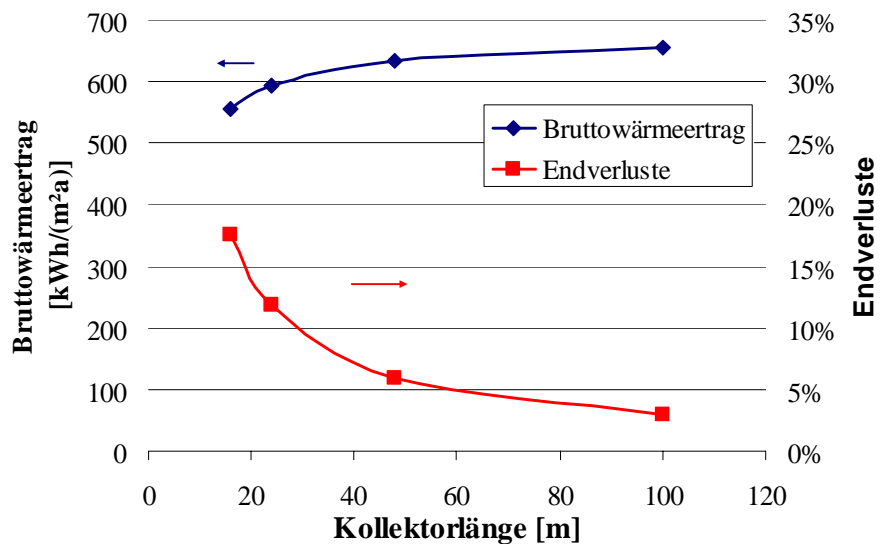


Abbildung 41: Der Einfluss der Kollektorlänge

Im Rahmen dieses Projektes wurde am Fraunhofer ISE ein Kennlinienmodell einer Wasser-Ammoniak-Kältemaschine der Firma Robur für TRNSYS entwickelt. Mit diesem sog. TRNSYS-Type ist es möglich, ein komplettes System zur solaren Kühlung mit Kollektor und Kältemaschine abzubilden.

Dies wurde in TRNSYS umgesetzt (siehe Abbildung 42). Das System besteht aus vier Wasserkreisläufen: Kollektorkreislauf, Warmwasser- und Kaltwasserkreislauf sowie Lastkreislauf.

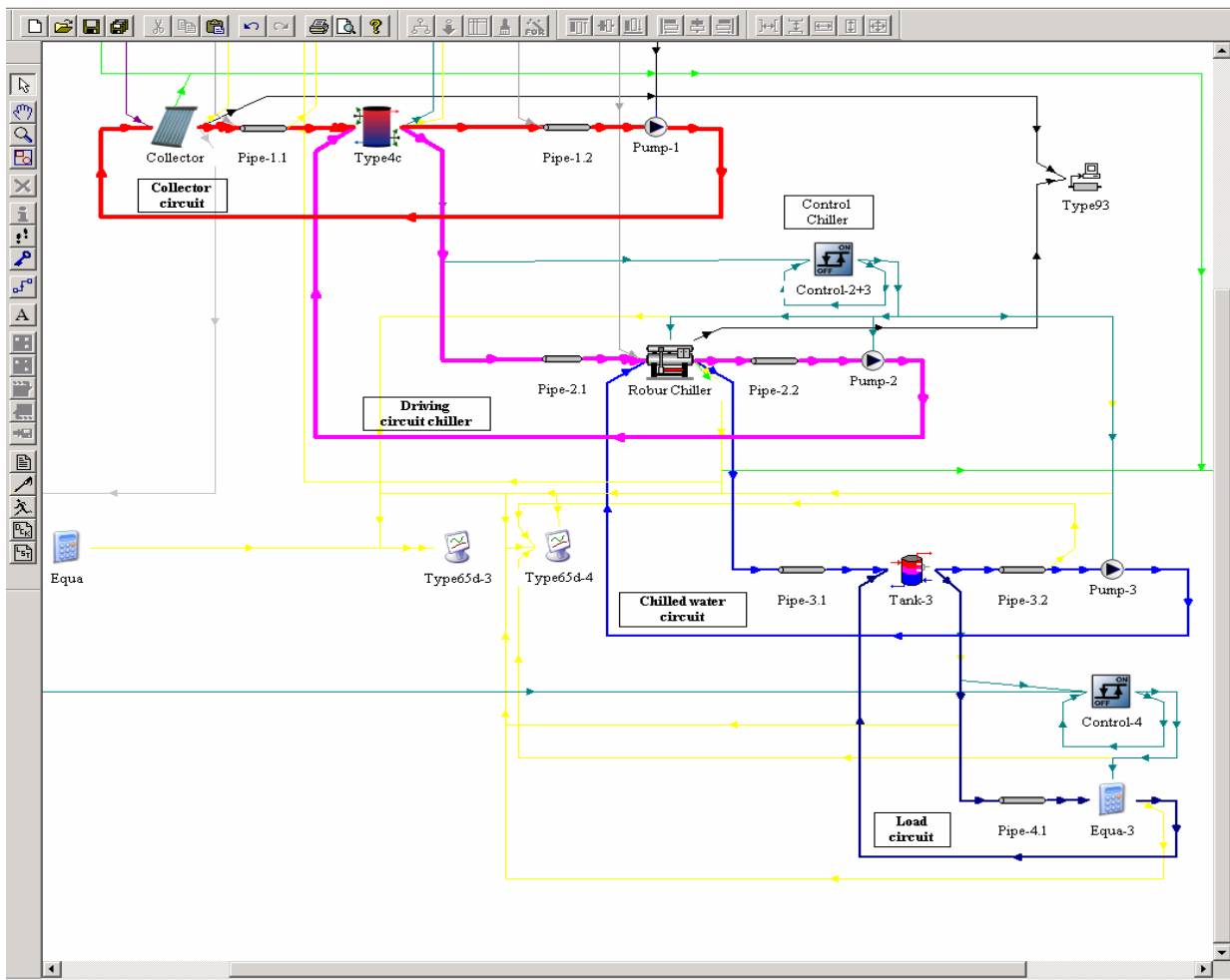


Abbildung 42: Komplettes thermohydraulisches System in TRNSYS

5.6 AP 6 - Vorfabrikation und Installation des Gesamtsystems

Analog zur Fabrikation und Installation des Fresnelkollektormoduls in Freiburg, wurden auch für das Gesamtsystem in Bergamo die meisten Komponenten vorgefertigt - lediglich die Primärspiegel wurden vor Ort gefertigt.

Im Sommer 2006 wurde in Bergamo auf dem Dach der Firma Robur S.p.A. ein Demonstrationskollektor mit 132 m² Primärspiegelfläche aufgebaut, der mit Ausnahme der Länge der Primärspiegel und des Absorberrohres von jeweils 24 m dieselben Abmessungen wie der Prototyp in Freiburg besitzt. Mit der in diesem Kollektor gewonnenen Wärme wird seit September 2006 eine Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine der Firma Robur S.p.A. mit 17 kW_{th} Kälteleistung betrieben.

Die erwartete Maximalleistung des Kollektors beträgt etwa 50 kW_{th} (zur Mittagszeit im Sommer) bei 180 °C. Der Kollektor ist etwa Nord-Süd ausgerichtet.

5.6.1 Stahlstruktur

Die Stahlstruktur besteht aus 7 identischen Querträgern, auf welchen die Primärspiegel gelagert werden, und ebenso vielen A-förmigen Receiverhalterungen.

Sämtliche Teile der Stahlstruktur wurden von einer Stahlbaufirma in der Nähe von Freiburg vorgefertigt und anschließend pulverbeschichtet.

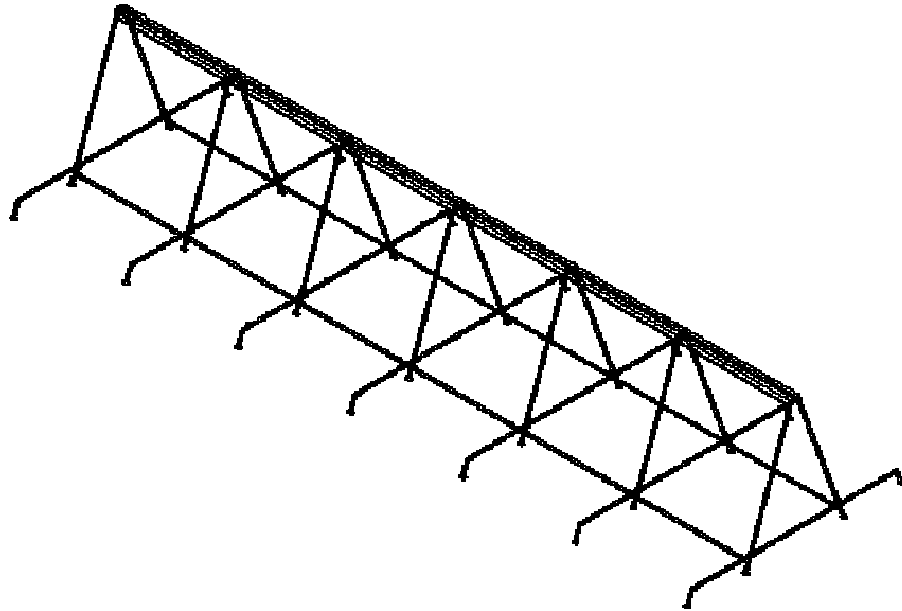


Abbildung 43:
Zeichnung der
Stahlstruktur mit
Receiver



Abbildung 44:
Stahlstruktur mit
Querstreben für
Montageplattformen

5.6.2 Receiver

Nachdem die Absorberrohre montiert und verschweißt waren, wurden die Receivergehäuse mit den Sekundärspiegeln montiert.



Abbildung 45:
Montage der
Absorberrohre und
der Receiver

5.6.3 Primärspiegel

Die Primärspiegel wurden vor Ort gefertigt, d.h. die Flachglasspiegel wurden in Formen mechanisch elastisch verformt. Diese Form wurde mittels gebogenen Metallstreben, welche auf die Spiegelrückseite aufgeklebt wurden, fixiert (siehe Kap. 5.2). Je zwei solcher Spiegel wurden dann gemeinsam auf einem Achtkantrohr mit 4m Länge befestigt.



Abbildung 46:
Form zur Fertigung
der Primärspiegel



Abbildung 47:
Installation der
Primärspiegel

5.6.4 Primärspiegelantriebe

Wie in Kap. 5.3 schon beschrieben, wurde der Antrieb der Spiegelreihen beim zweiten Prototyp durch Keilriemen realisiert.

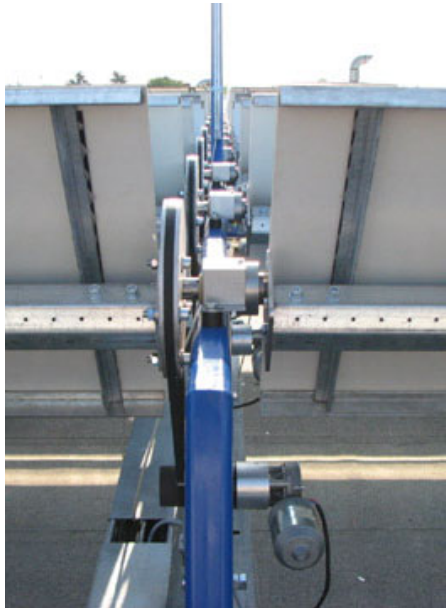


Abbildung 48:
Primärspiegel-
antrieb mittels
Getriebemotor und
Keilriemen

5.6.5 Gesamtsystem

Die Installation des Kollektors in Bergamo wurde im August 2006 abgeschlossen (siehe Abbildung 49). Vor der Inbetriebnahme wurde mit abgedecktem Absorber die Qualität der Brennlinie untersucht (siehe Abbildung 50). Abbildung 51 zeigt den Kollektor im Betrieb mit beleuchtetem Absorberrohr. Der Kollektor ist nahezu Nord-Süd ausgerichtet, so dass das erste Stück Absorber nicht beleuchtet wird.



Abbildung 49: Das Montageteam nach vollbrachter Arbeit



Abbildung 50: Brennlilie auf abgedecktem Absorber



Abbildung 51: Inbetriebnahme

Abbildung 52 zeigt die beiden an den Kollektor angeschlossenen Kältemaschinen der Fa. Robur S.p.A. Die hydraulische Verschaltung und Ausstattung mit Messtechnik wurde von Robur geplant und umgesetzt.



Abbildung 52: Mit Kältemaschine

Die erzeugte Kälte wird in das Kältenetz der Firma eingespeist. Dadurch entfällt die Notwendigkeit der Kältespeicherung. Eine der Anlagen hat zu Demonstrationszwecken ein Eisregister (linke Anlage in Abbildung 52)

Erste Messungen wie in Abbildung 53 stehen seit Ende September zur Verfügung. In dieser Messung produzierte der Kollektor maximal etwa $30 \text{ kW}_{\text{th}}$ bei maximal etwa $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Da zu diesem Zeitpunkt die hydraulische Verrohrung noch nicht isoliert war, ging ein Großteil der erzeugten Wärme an die Umgebung verloren und bei der Kältemaschine kamen nur noch maximal $20 \text{ kW}_{\text{th}}$ an, woraus maximal etwa $15 \text{ kW}_{\text{th}}$ Kälte erzeugt wurde.

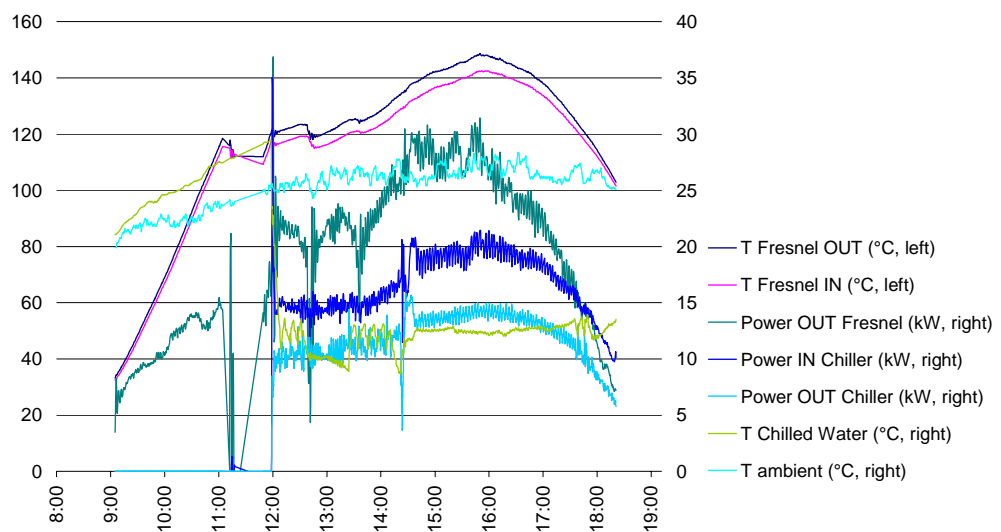


Abbildung 53:
Messung mit
Kältemaschine,
19.09.06

Damit wird das gute Zusammenspiel von Kollektor und Kältemaschine dokumentiert. Selbst bei geringem Solarangebot beginnt die Kältemaschine in Teillast zu arbeiten. Das Temperaturniveau der Kälteerzeugung, das hier durch das Kältenetz fixiert ist, definiert dabei alle Temperaturen des Gesamtsystems, bis hin zur Arbeitstemperatur des Kollektors.

Um die volle Kapazität der Kältemaschine zu erreichen, reichte dann Ende 2006 das Strahlungsangebot der niedrig stehenden Sonne in Bergamo nicht mehr aus. Hier macht sich die Nord-Süd Ausrichtung des Kollektors stark bemerkbar, da im Winter ein großer Teil des Receivers nicht beleuchtet ist.

Die Messungen werden aber im gesamten Sommer 2007 fortgesetzt.

6 Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung

Die ursprüngliche Zielsetzung des Projekts und unsere Erwartungen an das Projekt wurden im Wesentlichen voll und ganz erfüllt:

- ein erster Prototyp des Kollektors wurde in Freiburg aufgebaut, einen Sommer lang betrieben und detailliert vermessen. Die Messergebnisse und die Betriebserfahrung mit dem Kollektor sind sehr zufriedenstellend.
- ein zweiter Prototyp des Kollektors wurde in einem Gesamtsystem integriert und liefert seit Herbst 2006 die thermische Antriebsenergie einer solaren Klimatisierungsanlage. Auch hier ist die bisherige Betriebserfahrung sehr zufriedenstellend.

Gleichwohl blieben natürlich Überraschungen und Abweichungen vom ursprünglichen Projektplan nicht aus:

- Der Personalaufwand wurde bei der Projektkalkulation unterschätzt.
- Mehrkosten fielen auch bei der hydraulischen Installation in Freiburg an, die an eine Fachfirma vergeben wurde. Hier wurde zu knapp kalkuliert.
- Ursprünglich war geplant, das Gesamtsystem ebenfalls in Freiburg auf dem Dach des Solar Info Centers aufzubauen. Von diesem Standort musste abgewichen werden, da sich der Zugang zum Dach als unverhältnismäßig aufwendig herausstellte.

Mit dem Standort auf dem Dach der Firma Robur konnte aber ein hervorragender Standort für diese Anlage gefunden werden.

- Am Standort der Firma Robur machte die Integration eines Speichers keinen Sinn, da die erzeugte Kälte direkt in ein bestehendes Kältenetz gespeist werden konnte. Deshalb wurde auf die Installation eines Speichers verzichtet, der im ursprünglichen Projektplan vorgesehen war.
- Viel »Hin und Her« gab es bei der Frage des Wärmeträgers. Prinzipiell standen Druckwasser und Thermoöl zur Diskussion. Thermoöl ist anlagentechnisch weniger aufwendig, weil es auch bei hohen Temperaturen mit niedrigem Anlagendruck eingesetzt werden kann. Auf der anderen Seite muss bei Thermoöl viel Aufwand getrieben werden, um zu verhindern, dass es im Falle eines Lecks ins Grundwasser gerät. Robur konnte schließlich einen Wärmetauscher in ihre Kältemaschine integrieren, der ausreichend hohen Betriebsdruck zulässt, um Wasser als Wärmeträger zu verwenden.

- Die zweite Anlage konnte noch nicht mit voller Leistung betrieben werden, da sie erst im Herbst betriebsbereit war und aufgrund des niedrigen Sonnenstands nicht mehr genug Strahlungsleistung zur Verfügung stand.

7 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

7.1 Das Potential für solare Prozesswärme

Die solare Warmwasserbereitung ist von ihrer ökologischen, technologischen und ökonomischen Bewertung her gut erfasst. In diesem Bereich etabliert sich mittlerweile eine dynamische Industrie mit hohen Wachstumsraten.

Aus Abbildung 54 wird deutlich, dass in Deutschland der Endenergiebedarf für industrielle Prozesswärme den für Warmwasser sogar deutlich übersteigt. In Abbildung 55 ist die Temperaturverteilung der eingesetzten industriellen Prozesswärme am Beispiel Österreich dargestellt. Ein großer Anteil fällt in den Bereich 100 °C bis 200 °C, das ist die optimale Betriebstemperatur des Fresnel Prozesswärmekollektors. Bisher gibt es nur sehr wenige Solarkollektoren, die diesen Temperaturbereich abdecken, insofern bewerten wir das Potential unserer Kollektorentwicklung als sehr hoch.

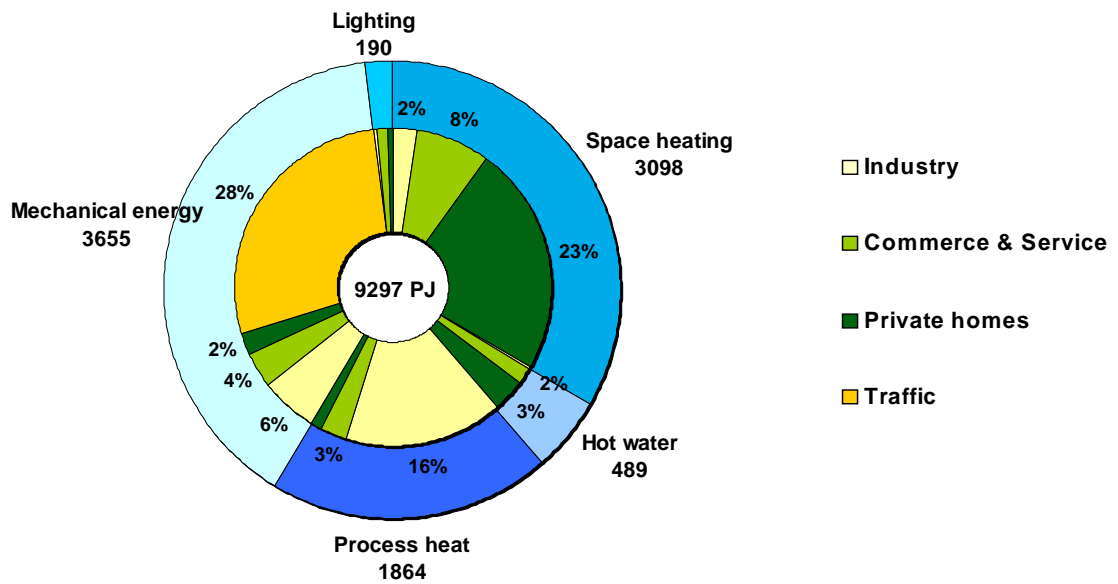


Abbildung 54: Endenergiebedarf in Deutschland 2003 (Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen)

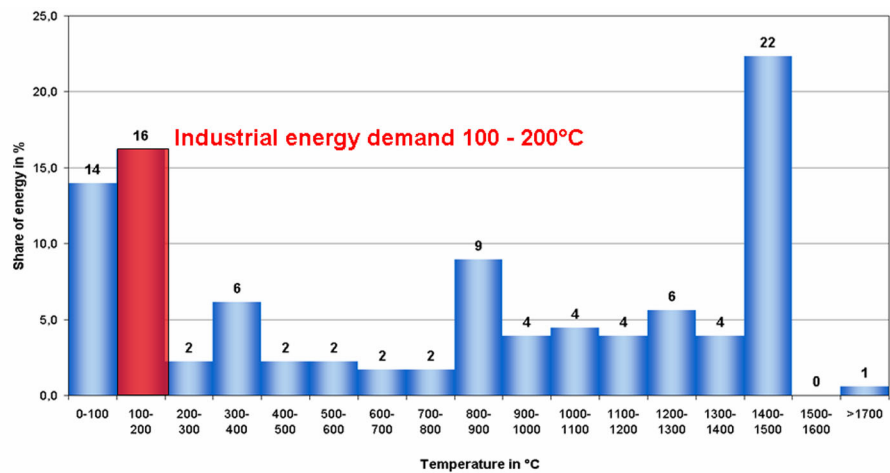


Abbildung 55: Temperaturverteilung der industriellen Prozesswärme

Quelle: Neubarth, Kaltschmitt, 2000

7.2 Kostenstruktur

Auf Basis der Herstellkosten der beiden Prototyp-Kollektoren wurden die Herstellkosten des Kollektors aufgeschlüsselt. Beispielhaft wurden damit verschiedene Projekte in Südeuropa kalkuliert. Auf die Aperturfläche bezogen können wir den Kollektor für 500 bis 700 € anbieten (inklusive Installation), d.h. zu Preisen, die mit denen von Vakuumröhrenkollektoren vergleichbar sind. Man kommt damit allerdings nicht ohne Fördergelder zu Amortisationszeiten, die für die Industrie interessant sind. Erst mit einer Förderquote von etwa 35% bis 50% kann, je nach Vergleichstechnologie, die Amortisationszeit in den Bereich weniger Jahre kommen.

In Abbildung 56 ist die Kostenstruktur eines Prozesswärmeprojekts in Südeuropa dargestellt. Der mit Abstand größte Anteil der Kosten wird durch den reinen Materialaufwand verursacht. Deshalb wurden in Abbildung 57 noch die Materialkosten analysiert.

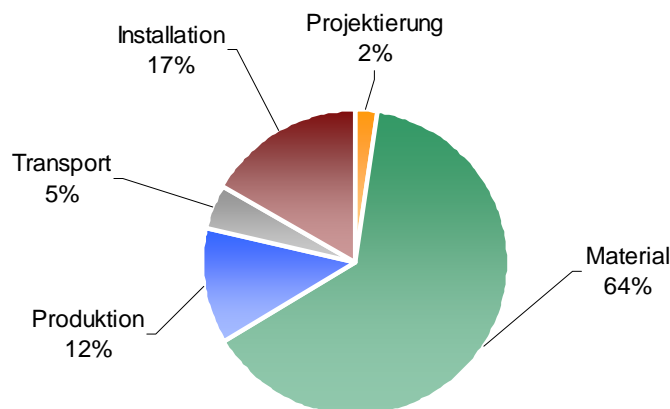


Abbildung 56:
Kostenstruktur
eines Projekts in
Südeuropa

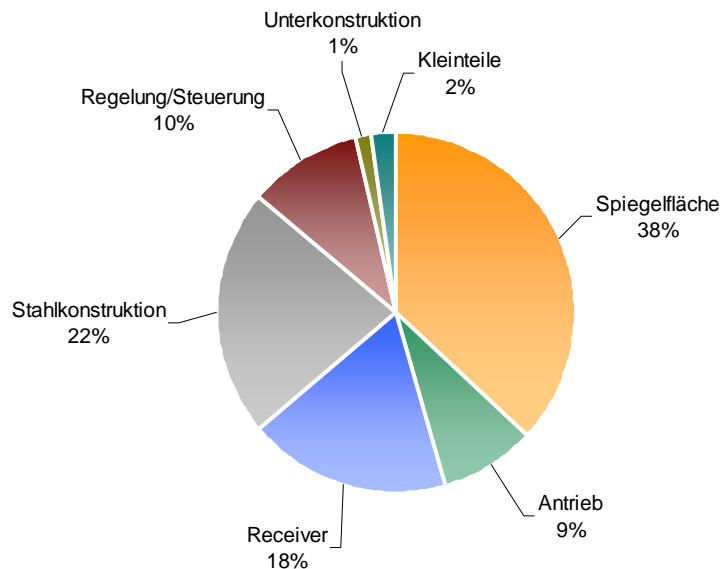


Abbildung 57:
Materialkosten des
Kollektors

Aus Abbildung 57 erkennt man, dass bei den Materialkosten die größten Kostentreiber die Primärspiegel, die Stahlkonstruktion und der Receiver sind.

7.3 Zusammenfassung

Die Nutzung von Solarenergie zur Bereitstellung industrieller Prozesswärme im Temperaturbereich 100 °C bis 200 °C hat ein vergleichbares CO₂-Vermeidungspotential wie die solare Warmwasserbereitung.

Mit dem Fresnel Prozesswärmekollektor steht ein Solarkollektor zur Verfügung, der zuverlässig Prozesswärme in diesem Temperaturbereich zur Verfügung stellt. Er ist hervorragend für die Montage auf Flachdächern geeignet, da er niedrige Windlasten verursacht und ohne Verletzung der Dachhaut montiert werden kann. Gleichzeitig kostet er nicht mehr als übliche Warmwasserkollektoren.

Die Chancen, mit dieser Technologie ein großes ökonomisches und ökologisches Potential zu erschließen schätzen wir als sehr gut ein. Gleichwohl sind noch erhebliche Kostensenkungen notwendig, um ein Produkt anbieten zu können, das Amortisationszeiten erlaubt, die für industrielle Anlagenbetreiber ohne Subventionen interessant sind.

8 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

1. Die Vorhabensergebnisse wurden regelmäßig in internationalen Fachgremien diskutiert.
 - Task 33/4 »Solar Heat for Industrial Processes« der IEA (www.iea-ship.org).
 - European solar thermal technology platform ESTTP (www.esttp.org).
2. Veröffentlichungen auf nationalen und internationalen Kongressen:
 - Häberle et al., *Linear konzentrierender Fresnel-Kollektor für Prozesswärmeanwendungen*, 16. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 17.-19. Mai 2006
 - Häberle et al., *Linear concentrating Fresnel collector for process heat applications*, Solar Paces, 13th International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies, Seville, Spain, June 20-23, 2006
 - Henning et al., *Solar cooling and refrigeration with high temperature lifts –thermodynamic background and technical solution*, 61° Congresso Nazionale ATI, Perugia, September 14, 2006.
 - Rommel et al., *Solar collectors for heating and cooling with operating temperatures up to 250°C*, 61° Congresso Nazionale ATI, Perugia, September 14, 2006.
3. PSE gab am 07.11.2006 anlässlich der Inbetriebnahme der zweiten Anlage eine Presseerklärung heraus: *Solare Prozesswärme für südliche Länder. PSE GmbH installiert Fresnel-Kollektor bei Kooperationspartner in Italien.*
4. Einige Fachzeitschriften schrieben über das Projekt:
 - Sonne Wind & Wärme: Prozesswärme: Waschen, kochen, trocknen, Ausgabe 1/2007, S. 46-53
 - Die Kälte & Klimatechnik:, Solare Klimatisierung, Ausgabe 12/2006
 - Erneuerbare Energien: PSE installiert Fresnel-Kollektor in Italien, Ausgabe 12/2006
 - Solarthemen 244: Fresnel-Kollektor für Kältemaschine, Ausgabe 244/23.Nov.2006

- Sonne Wind & Wärme: Rekorde und Visionen, Ausgabe 7/2006
- Energie pflanzen: Freiburger Firma installiert neuartigen Fresnel-Kollektor in Italien, Ausgabe 6/2006
- Frankfurter Allgemeine Zeitung: Solare Kälteerzeugung, Linse aus Spiegelstreifen, 17.01.2006, Nr. 14 S. T6

9 Fazit

Aufbauend auf bestehendem Know-how zu linearen Fresnel Kollektoren, wurde ein Fresnel Prozesswärmekollektor entwickelt, der im Leistungsbereich ab ca. 25 kW_{th} Prozesswärme mit bis zu 200 °C erzeugt. Der Kollektor ist sehr gut für die Montage auf Flachdächern geeignet, da er niedrige Windlasten hat und die verfügbare Grundfläche sehr effektiv ausnutzt.

Es wurden Schlüsselkomponenten entwickelt und zwei Prototypkollektoren gebaut. An einem der Prototypen wurden detaillierte Messungen durchgeführt, der zweite Prototyp dient schon zum Betrieb eines Systems zur Solaren Kälteerzeugung. Die Messergebnisse stimmen sehr gut mit den theoretischen Erwartungen überein und auch die Betriebserfahrung des Gesamtsystems ist durchweg positiv.

Wir sind stolz auf das erreichte Ergebnis. Gleichwohl ist noch eine ganze Reihe von Entwicklungsarbeiten zu leisten.

Im Bereich der Steuer- und Regeltechnik hat sich z.B. herausgestellt, dass generell die analogen Messsignalen digitalisiert werden sollten und auf CAN BUS umgestellt werden sollte.

Zur Quantifizierung des Betriebs- und Wartungsaufwands ist es notwendig, die Prototypanlagen noch weiter zu betreiben und weiter zu vermessen.

Bevor wir uns in der Lage sehen kommerzielle Projekte anzubieten muss durch weitere Demonstrationsprojekte Erfahrung gesammelt werden. Andernfalls kann keine Aussage über Garantieleistungen getroffen werden.

Unsicherheit besteht noch im Bereich der rechtlichen Rahmenbedingungen bei Druckwasserinstallationen. Die bestehenden Normen und Richtlinien lassen sich für diese Technologie nicht ein zu eins übertragen.

Auch in der messtechnischen Qualifizierung des Kollektors ist noch grundlegende wissenschaftliche Arbeit zu leisten. Es hat sich herausgestellt, dass die bestehenden Normen (z.B. EN12975) unzureichend sind, diesen Kollektortyp zu erfassen. Ein Problem ist, dass der Kollektor nicht auf einen Teststand gestellt werden kann, sondern per Prinzip nur in situ vermessen werden kann. Damit lassen sich Normbedingungen (z.B. senkrechte Einstrahlung) nicht realisieren.

Weitere wichtige Schritte um zu einem am Markt erfolgreichen Produkt zu kommen sind Maßnahmen zur Materialeinsparung und Automatisierung, d.h. zur Kostensenkung und Qualitätssicherung in der Produktion. Hierzu gibt es viele Ansätze, die systematisch zu evaluieren sind.

Das Hauptziel dieses Vorhabens war die technische Machbarkeit unter Beweis zu stellen. Dieses Ziel ist voll und ganz erreicht und wie oben gesagt: wir sind stolz auf das Ergebnis.

10 Literaturverzeichnis

- [Bai06] BAITSCH, M.: *Optimierung und Konstruktion eines linienfokussierenden Fresnel-Solarkollektors*. Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2006.
- [Neu02] NEUMANN, A. et al.: *Representative Terrestrial Solar Brightness Profiles*. Transactions of the ASME, Vol. 124, 2002.
- [Rab85] RABL, A.: *Active Solar Collectors and Their Applications*. Oxford University Press, 1985.

11 Anhänge

11.1 A1 - Messbericht des Fraunhofer ISE:

Bericht TAG-MR-2007-02-E1, *Wirkungsgradkennlinienbestimmung für den PSE-Fresnel-Kollektor "Stübweg Freiburg"*



Bericht TAG-MR-2007-02-E1

Wirkungsgradkennlinienbestimmung für den PSE-Fresnel-Kollektor "Stübeweg Freiburg"

erstellt für:

PSE GmbH
Dr. Andreas Häberle
Emmy-Noether Str. 2
79110 Freiburg

erstellt von:

Fraunhofer-Institut
für Solare Energiesysteme ISE
Matthias Rommel
Thorsten Siems
Heidenhofstr. 2
79110 Freiburg

unter Mitarbeit von Michael Berger, PSE

27. Februar 2007

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Ausgewählte Messtage	5
3	Einstrahlwinkelkorrekturfaktoren für die ausgewählten Messtage	13
4	Quasistationäre Leistungsbestimmung aus den Messzeitreihen der ausgewählten Messtage	16
5	Wirkungsgradkennlinie (WKL) des Fresnelkollektors	18
5.1	Wirkungsgradkennlinie mit allen Wirkungsgradpunkten	19
5.2	Wirkungsgradkennlinie mit nach Aufzeichnungen sinnvollerweise bereinigten Wirkungsgradpunkten	21
5.3	Wirkungsgradkennlinie mit weiter reduzierten Messpunkten	24
5.4	Vergleich der Wirkungsgradkennlinien	26
6	Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen	27
6.1	Kollektorzeitkonstante bestimmen	27
6.2	IAM durch Messung verifizieren	27
7	Anhang Liste der gemessenen Wirkungsgradkennlinienpunkte	28

Wirkungsgradkennlinienbestimmung für den PSE-Fresnel-Kollektor "Stübeweg Freiburg"

1 Einleitung

Die PSE GmbH entwickelt einen Fresnel Prozesswärmekollektor. Der erste Prototyp dieses Kollektors wurde in Freiburg auf dem Dach eines Technikumgebäudes im Stübeweg installiert und im Dezember 2006 erstmalig in Betrieb genommen. Abbildung 1 zeigt den Fresnel-Kollektor. Er besteht aus elf Spiegelstreifen zu je 16 Metern Länge und 50 cm Breite. Das Absorberrohr mit dem Sekundär-Reflektor ist in 4 Metern Höhe installiert.



Abb. 1: PSE-Fresnel-Kollektor

Im Verlauf des Jahres 2006 wurden von PSE verschiedene Messungen und Untersuchungen zur Entwicklung des Kollektors durchgeführt.

Die Aufgabe der hier vorliegenden Untersuchung war es, aus den vorhandenen Messzeitreihen die Wirkungsgradkennlinie des Kollektors zu bestimmen. In Anlehnung an die Wirkungsgradbestimmung von Flach- und Vakuumröhrenkollektoren nach EN12975 wurden dabei Zeiträume ausgesucht, in denen (zumindest in möglichst guter Annäherung) quasistationäre Messbedingungen vorlagen.

Folgendes Vorgehen wurde gewählt:

- 1** Sichtung des Datenmaterials und Auswahl von geeigneten Messtagen, bei denen aufgrund der ausgedruckten Messzeitreihen der Rohdaten (im wesentlichen Einstrahlung DNI, Kollektoreintritts- und Austrittstemperatur) quasistationäre Messbedingungen vermutet wurden.
- 2** Bestimmung des Tagesverlaufs der Einstrahlwinkelkorrekturfaktoren (IAM) für diese ausgewählten Messtage. Die IAM-Werte wurden nicht gemessen, sondern von PSE durch Simulationen der optischen und geometrischen Eigenschaften des Kollektors bestimmt.
- 3** Bestimmung der thermischen Leistung des Kollektors für die Tagesabschnitte, in denen quasistationäre Bedingungen vorlagen. Daraus wurden "Wirkungsgradpunkte ohne Berücksichtigung des IAM" ermittelt.
- 4** Diese "Wirkungsgradpunkte ohne Berücksichtigung des IAM" wurden dann mit den Ergebnissen aus Schritt 3 mit den theoretisch berechneten IAM-Werten korrigiert und somit eine Wirkungsgradkennlinie bestimmt.

2 Ausgewählte Messtage

Die folgenden Messtage wurden aus den vorhandenen Messzeitreihen für die Bestimmung der Wirkungsgradkennlinie ausgewählt:

- 18.7.06
- 19.7.06
- 22.9.06
- 6.11.06
- 7.11.06
- 16.11.06

Die Diagramme wurden von Michael Berger, PSE GmbH, angefertigt. Der Zeitschritt zwischen zwei in der Datei abgelegten Messdaten beträgt 10 sec.

T_{in} und T_{out} bezeichnen die gemessenen Ein- und Auslauftemperaturen des Kollektors.

Thermal Power bezeichnet die thermische Leistung des Kollektors, die zu jedem Zeitpunkt aus gemessener Ein- und Auslauftemperatur und Fluidmassendurchsatz gerechnet wird.

Efficiency bezeichnet den Wirkungsgrad, berechnet aus dem Quotienten von Thermal Power und DNI (Direct Normal Irradiation, Direktstrahlung auf eine Messebene senkrecht zur Einstrahlrichtung).

Theoretical Power bezeichnet die Leistung, die aufgrund der momentanen Einstrahlung, Sonnenstand und Kollektoreinlauftemperatur durch das Kollektorsimulationsprogramm der PSE-GmbH theoretisch berechnet wird.

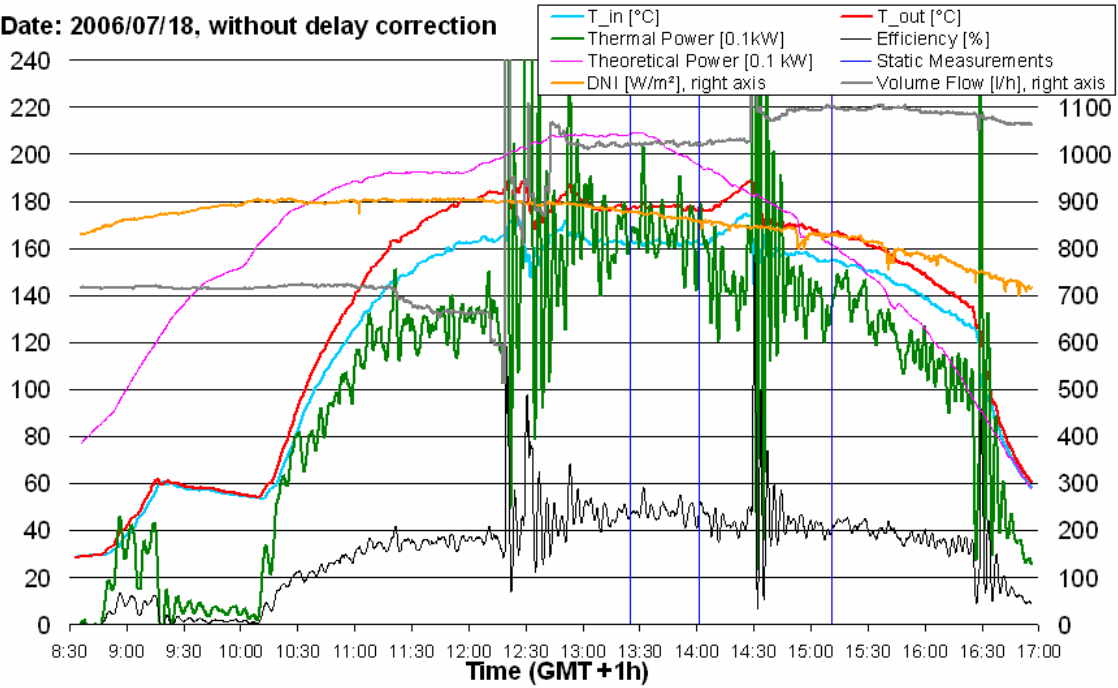
Static Measurements bezeichnet durch die senkrechten Linien diejenigen Zeitpunkte, zu denen eine quasistationäre thermische Leistungsauswertung vorgenommen wurde.

Laufzeitkorrektur

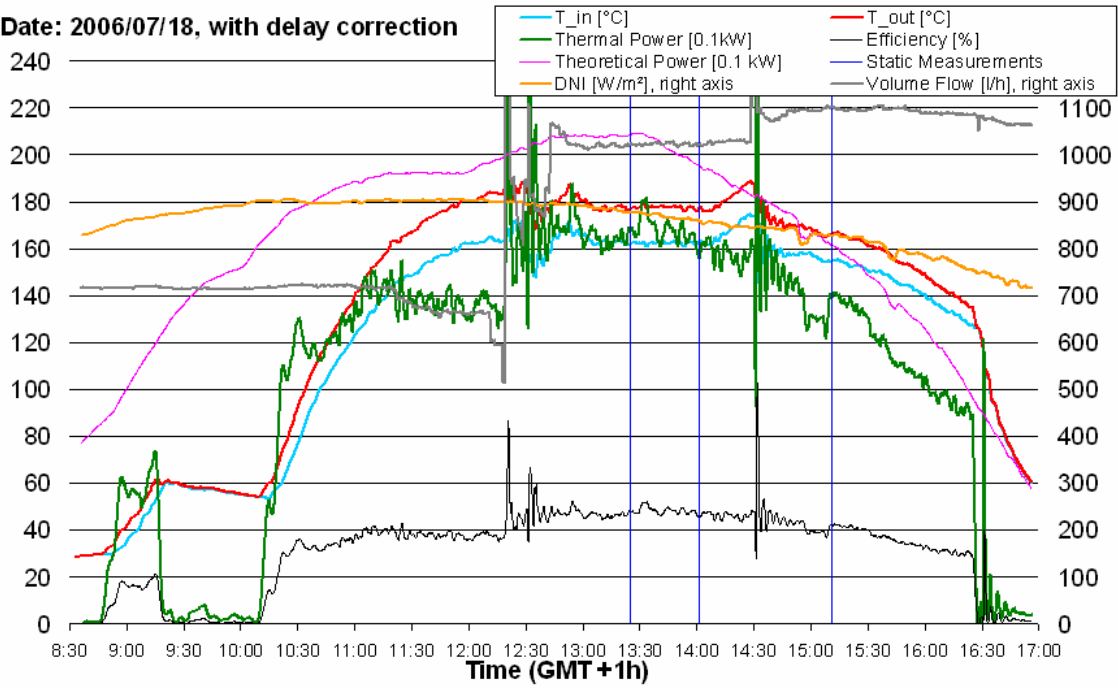
Für jeden Messtag sind im folgenden zwei Diagramme gezeigt: Im oberen Diagramm ("without delay correction") wurden die gemessenen und die daraus berechneten Leistungswerte so wie gemessen über der Zeitachse

aufgetragen. Im unteren Diagramm wurde für die Berechnung der Thermal Power die Laufzeit des Fluids durch den Kollektorabsorber berücksichtigt. Die theoretische Laufzeit eines Wassertropfens (t_{LZ}) durch das 8.12 m lange Absorberrohr beträgt bei diesem Kollektor beispielsweise für einen Volumenstrom von 1000 l/h 117 Sekunden, also etwa 2 Minuten. Für die Leistungsberechnung zum Zeitpunkt t wurde die Auslauftemperatur zum Zeitpunkt t und die Einlauftemperatur zum Zeitpunkt ($t-t_{LZ}$) verwendet. Für den Volumenstrom und die Einstrahlung DNI wurden dabei die gemittelten Messdaten im Zeitintervall von $t-t_{LZ}$ bis t verwendet. Man erkennt, dass die Thermal Power-Kurve durch dieses Vorgehen deutlich glatter verläuft.

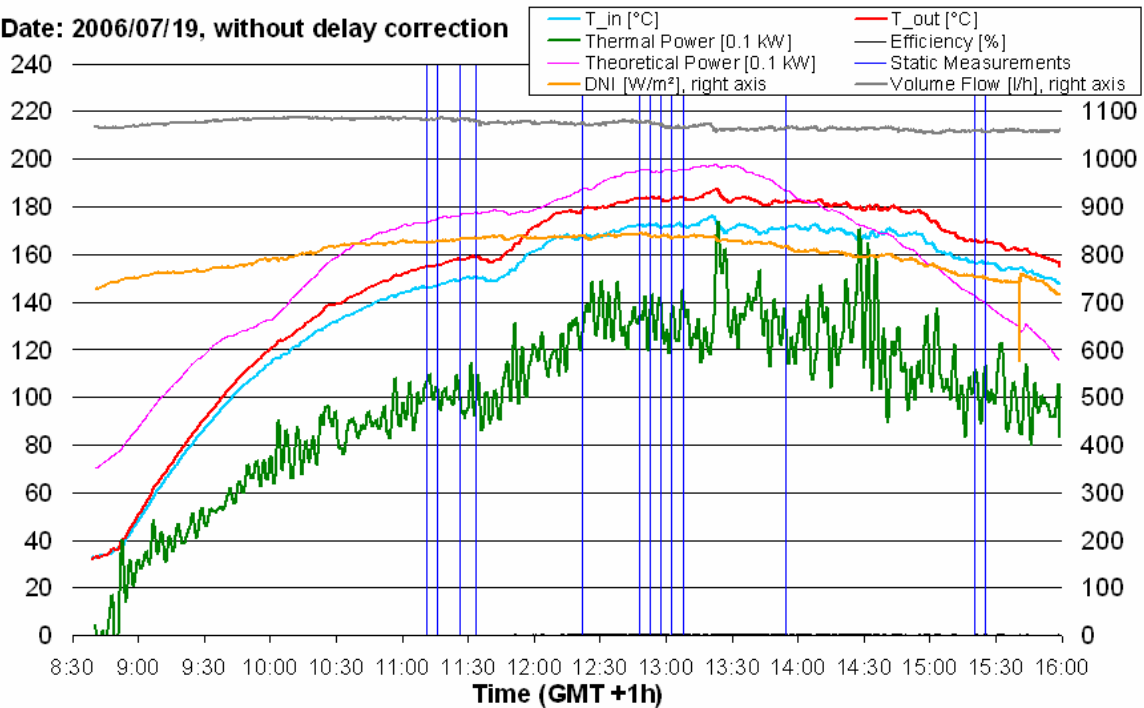
Date: 2006/07/18, without delay correction



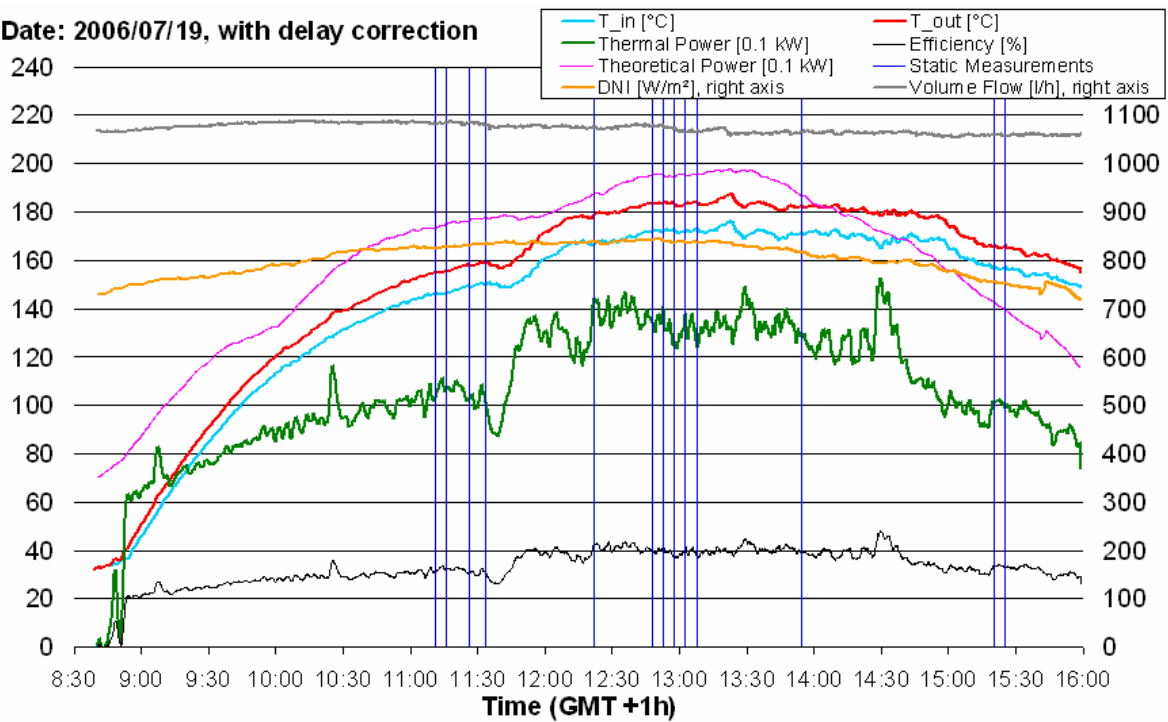
Date: 2006/07/18, with delay correction



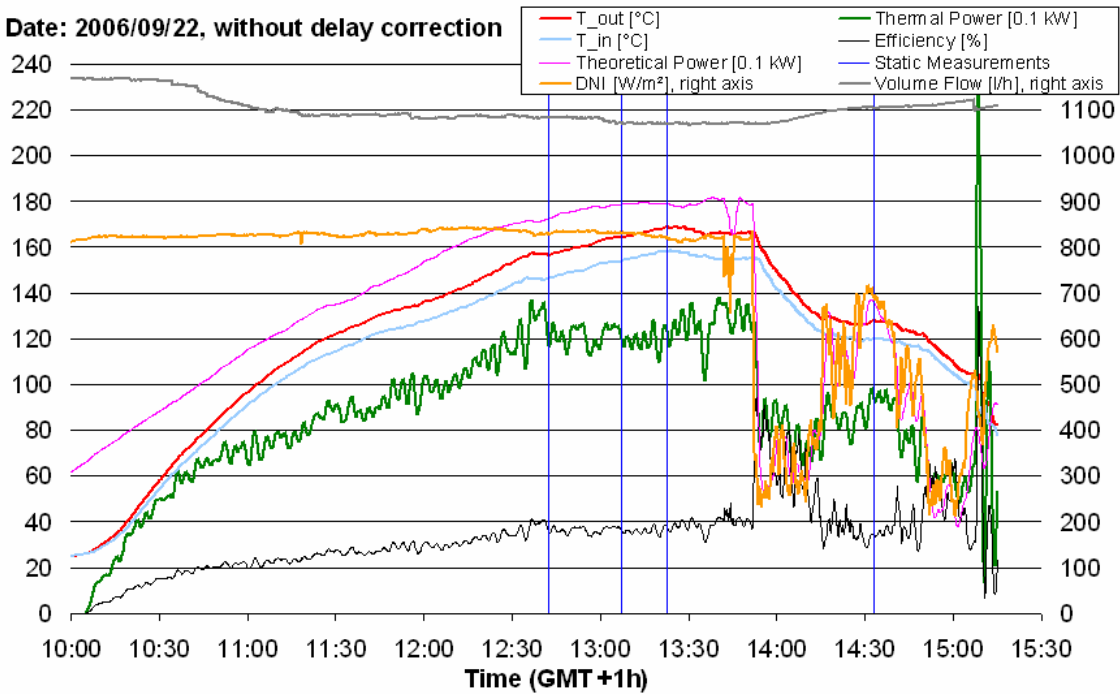
Date: 2006/07/19, without delay correction



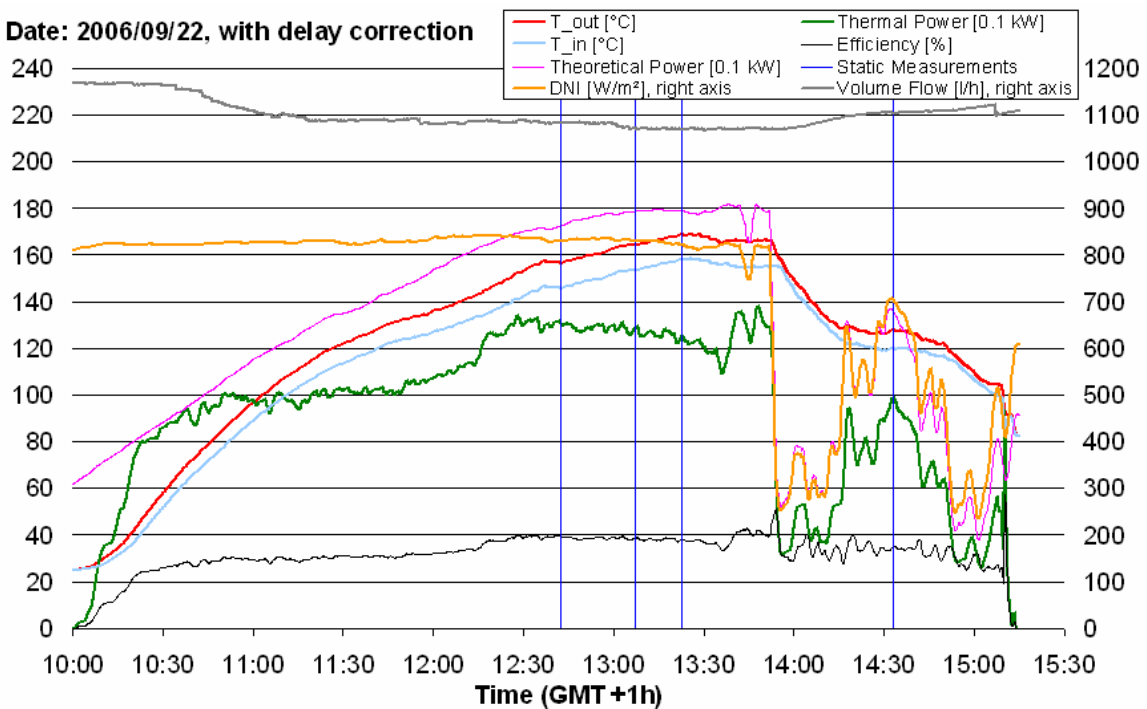
Date: 2006/07/19, with delay correction



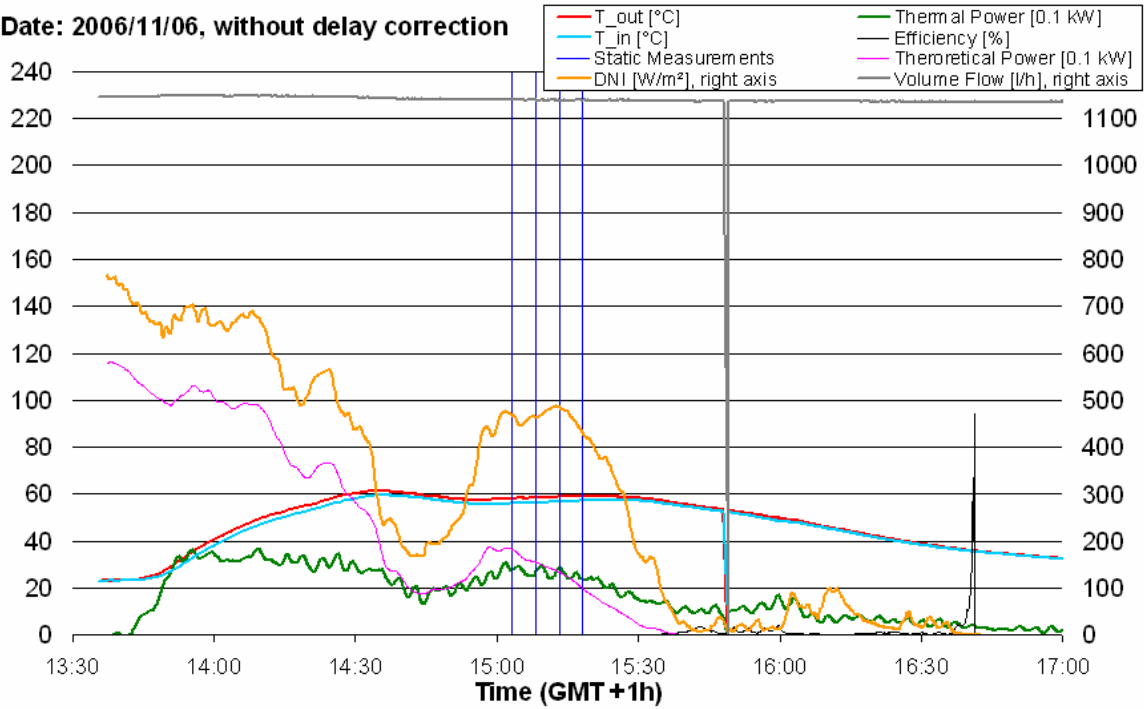
Date: 2006/09/22, without delay correction



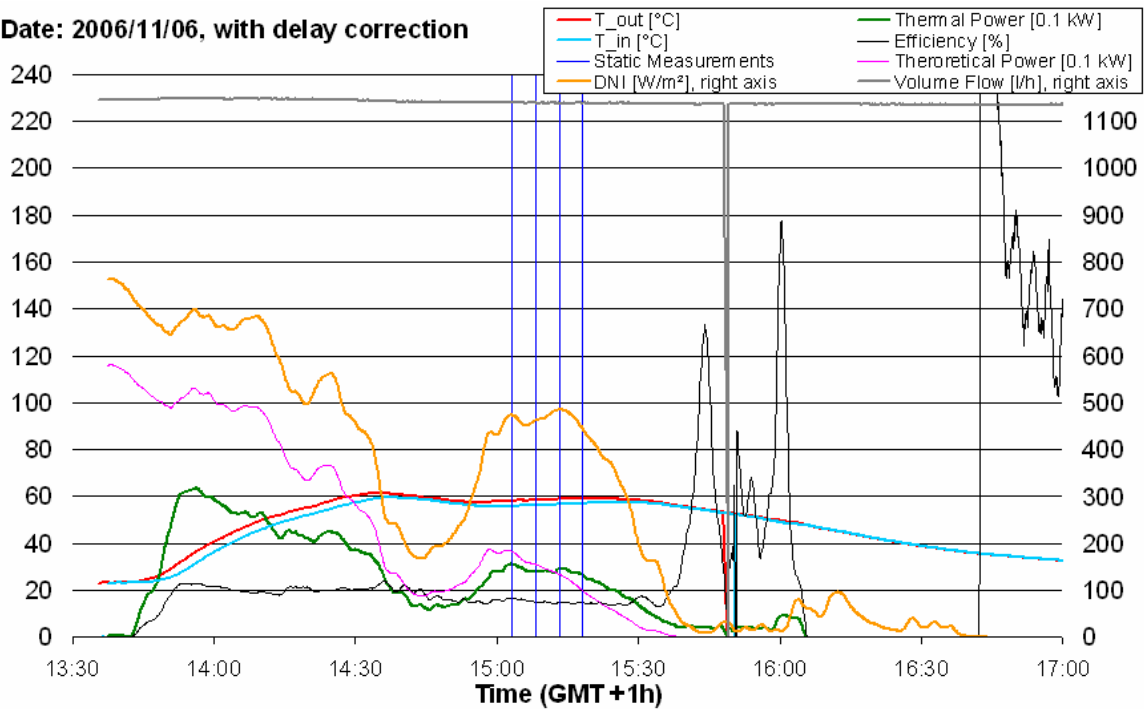
Date: 2006/09/22, with delay correction



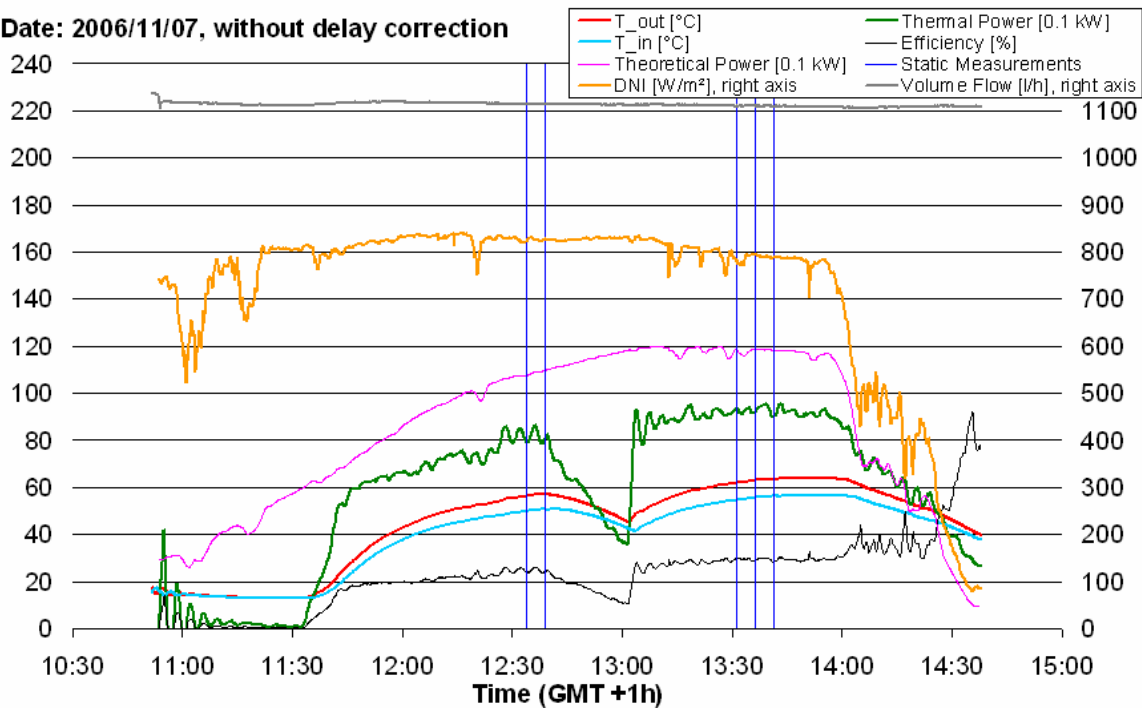
Date: 2006/11/06, without delay correction



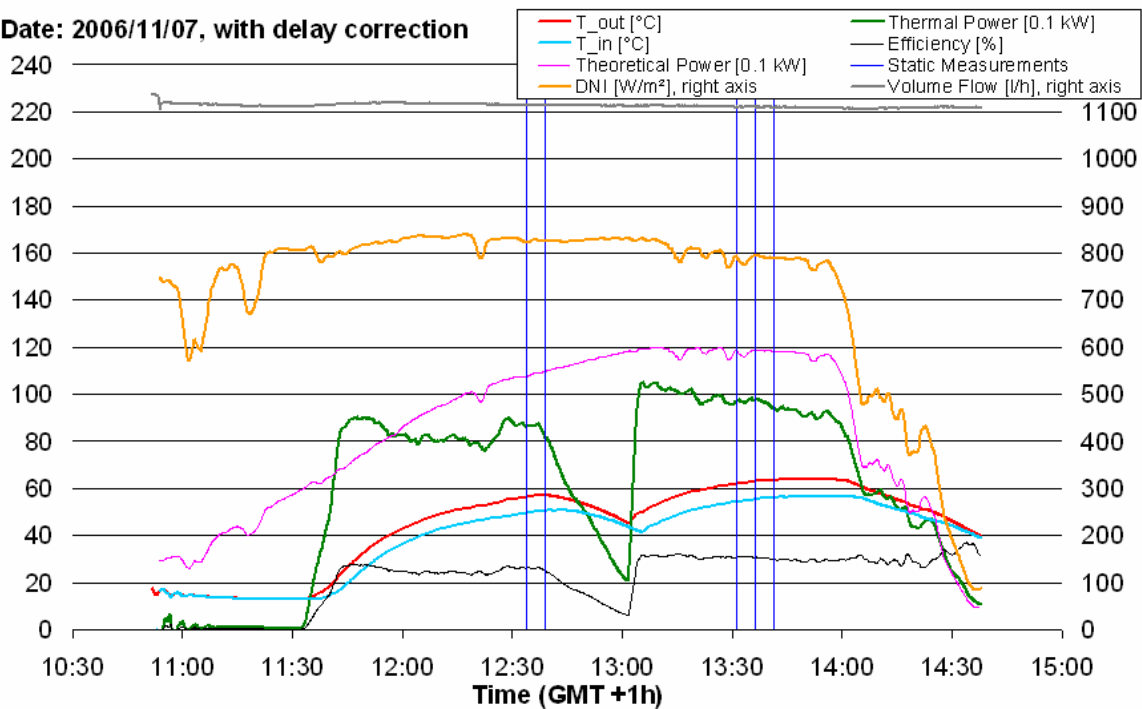
Date: 2006/11/06, with delay correction



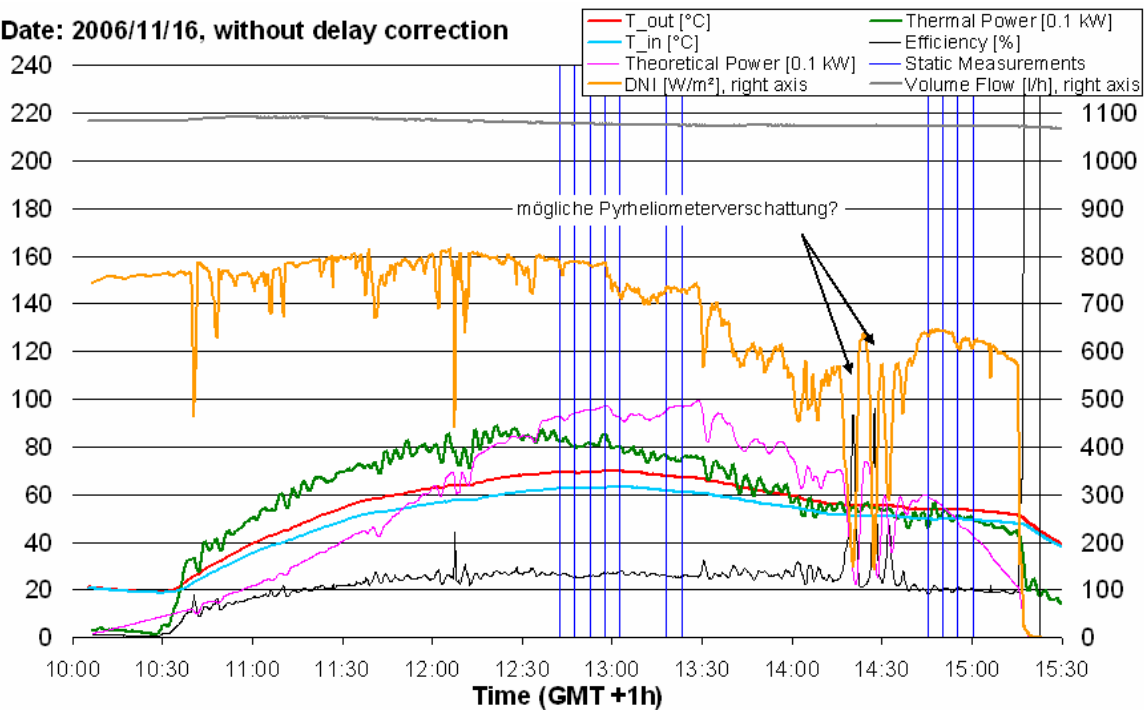
Date: 2006/11/07, without delay correction



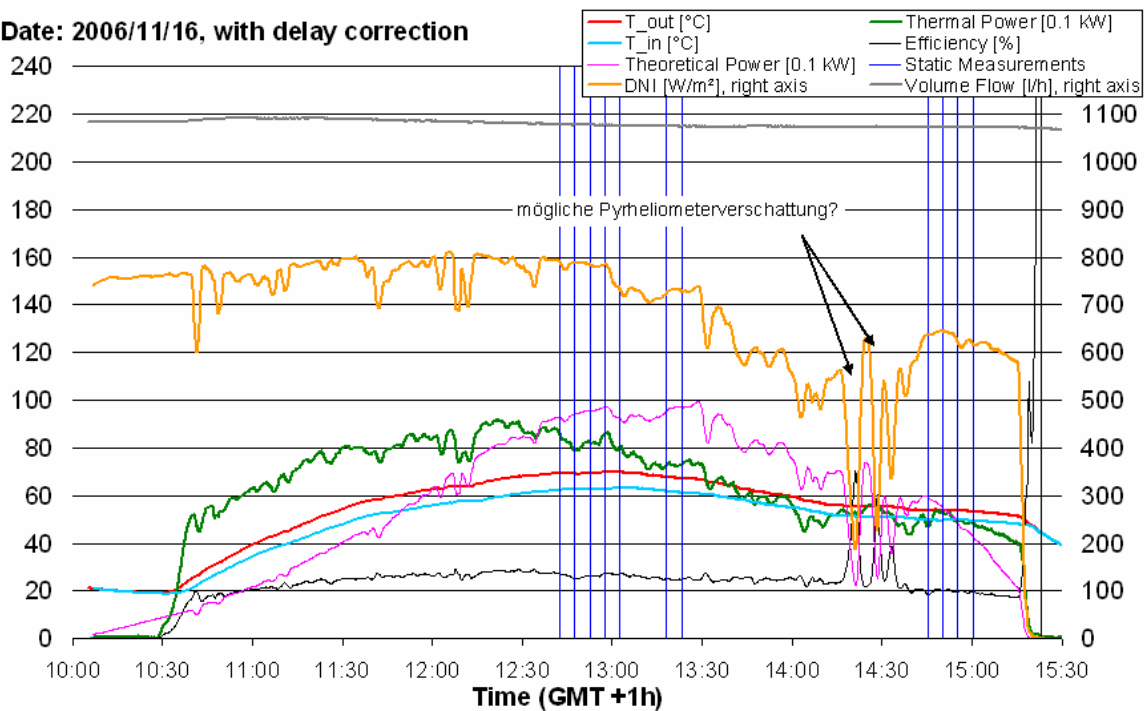
Date: 2006/11/07, with delay correction



Date: 2006/11/16, without delay correction



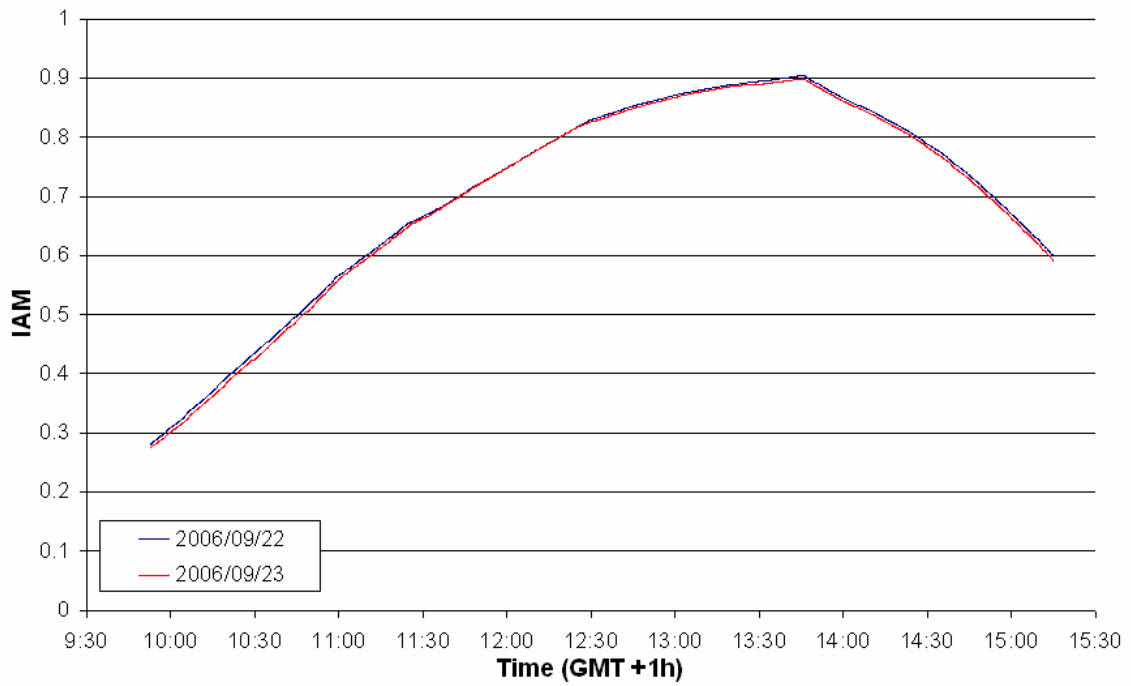
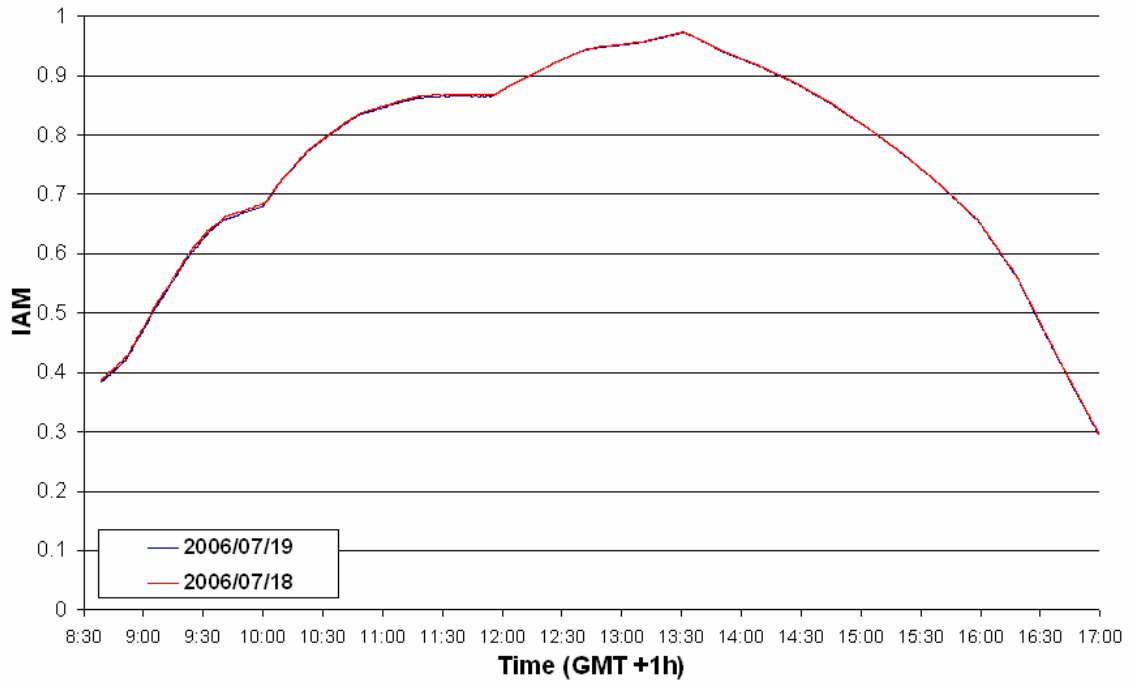
Date: 2006/11/16, with delay correction

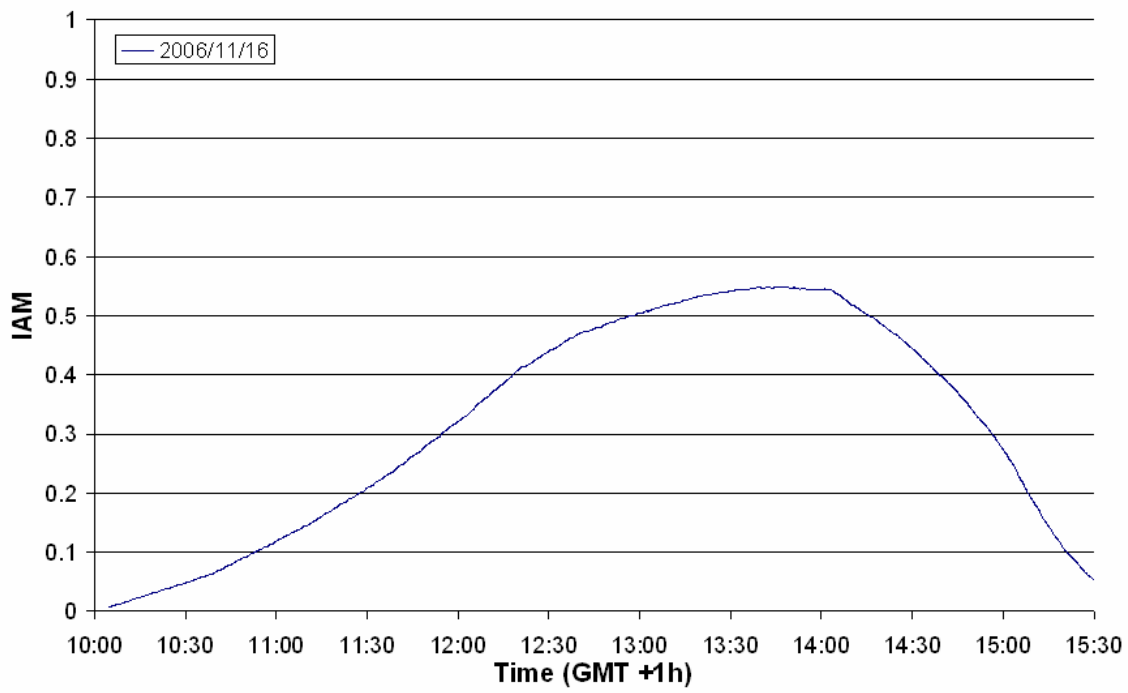
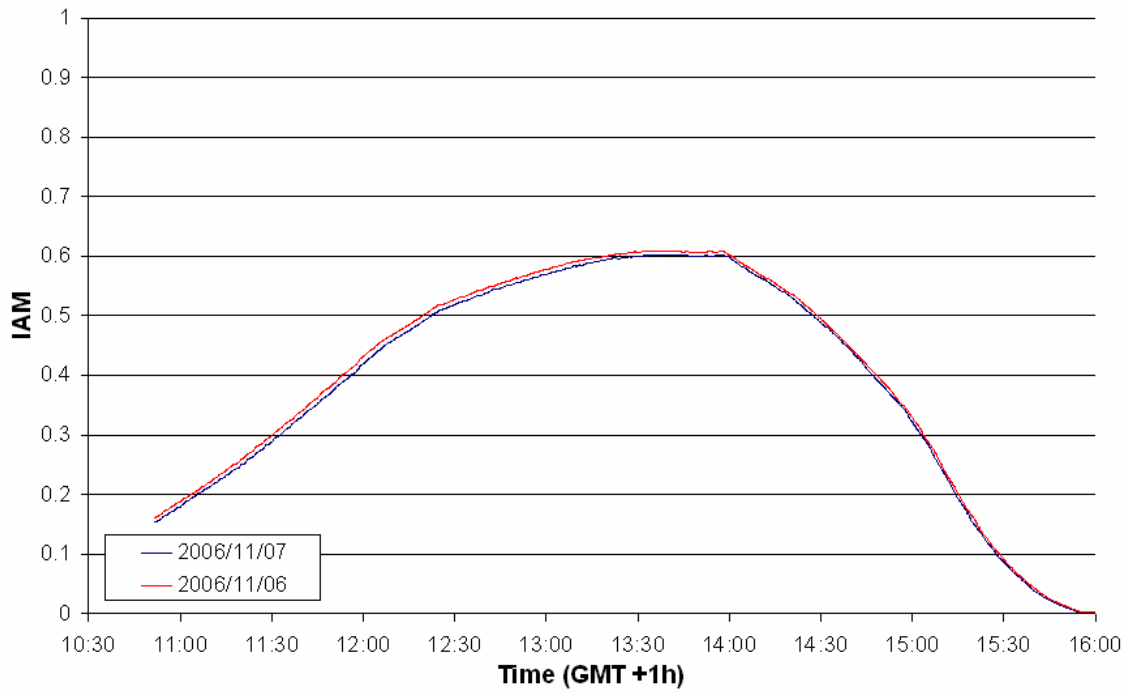


3 Einstrahlwinkelkorrekturfaktoren für die ausgewählten Messtage

Für diesen Kollektor liegen keine gemessenen Einstrahlwinkelkorrekturfaktoren (IAM, Incidence Angle Modifier) vor. Erst als Ergebnis der bisher gesammelten Experimentiererfahrung, der vorliegenden Auswertung und mit den verbesserten Betriebs- und Experimentiermöglichkeiten des Kollektors und des Teststands kann gegebenenfalls im Sommer 2007 der Versuch unternommen werden, den IAM direkt messen zu können, zumindest für ausgewählte Zeiträume. Dies wird Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein. Für die gegebene Situation wurde die Entscheidung getroffen, die Einstrahlwinkelkorrekturfaktoren zu verwenden, die durch die Modellierung des Kollektors von PSE berechnet werden können. Die nachfolgenden Einstrahlwinkelkorrekturfaktoren wurden von Michael Berger, PSE, berechnet.

Der IAM des Fresnel-Kollektors kann nicht durch eine geschlossene mathematische Funktion angegeben werden. (Dies wäre übrigens notwendig, um den Versuch unternemen zu können, eine dynamische Wirkungsgradkennlinienbestimmung durchzuführen). Der Tagesverlauf des IAM eines Fresnel-Kollektors ist (im Gegensatz zu Flach-, Vakuumröhren- oder Parabolrinnenkollektoren) stark abhängig von seiner Ausrichtung, dem Aufstellungsort (Längen- und Breitengrad) und von der Jahreszeit. Der Vergleich der IAM-Kurven von zwei aufeinanderfolgenden Tagen in den folgenden Grafiken kann einen Eindruck davon vermitteln, um wieviel sich die IAM-Kurven für den hier untersuchten Kollektor beim gegebenen Aufstellungsort im Verlauf der Zeit unterscheiden.





4 Quasistationäre Leistungsbestimmung aus den Messzeitreihen der ausgewählten Messtage

Für die quasistationäre Leistungsbestimmung aus den Messzeitreihen der ausgewählten Messtage wurde das Auswertprogramm des Fraunhofer ISE angewendet. In Anlehnung an das Vorgehen gemäß der Norm EN 12975 wurden die Zeitbereiche aufgesucht, in denen quasistationäre Messbedingungen vorlagen. Um ausreichend viele Wirkungsgradpunkte zu bekommen, mussten dazu die in der Norm vorgegebenen Grenzwertbereiche für die zeitliche Konstanz von Messdaten teilweise vergrößert werden.

	Verwendete Vorgaben	Standardvorgaben nach Norm EN 12975
Dauer einer Konditionierungsphase	7 min	15 min
Zeitraum, über den gemittelt wird zur Berechnung eines Messpunktes	5 min	10 min
maximale Schwankung der Umgebungstemperatur	3 K	1 K
maximale Schwankung der Kollektoreinlasstemperatur	1 K	0.1 K
maximale Schwankung der Kollektorauslasstemperatur	0.5 K	keine Vorgabe
minimale direkte Einstrahlung in W/m^2	350	650 W/m^2 für die Globalstrahlung
maximale Schwankung der direkten Einstrahlung in W/m^2	50	50 W/m^2 für die Globalstrahlung
maximale Schwankung des Massenstroms	2 %	1 %

In der nachfolgenden Grafik sind alle so gewonnenen Messpunkte, also die Wirkungsgradpunkte, die noch mit den IAM-Werten multipliziert sind, aufgetragen. Als Bezugsfläche wurde die Aperturfläche der Primärreflektoren verwendet, in dem Aufbau, wie er bei den Messungen vorlag (40 m²).

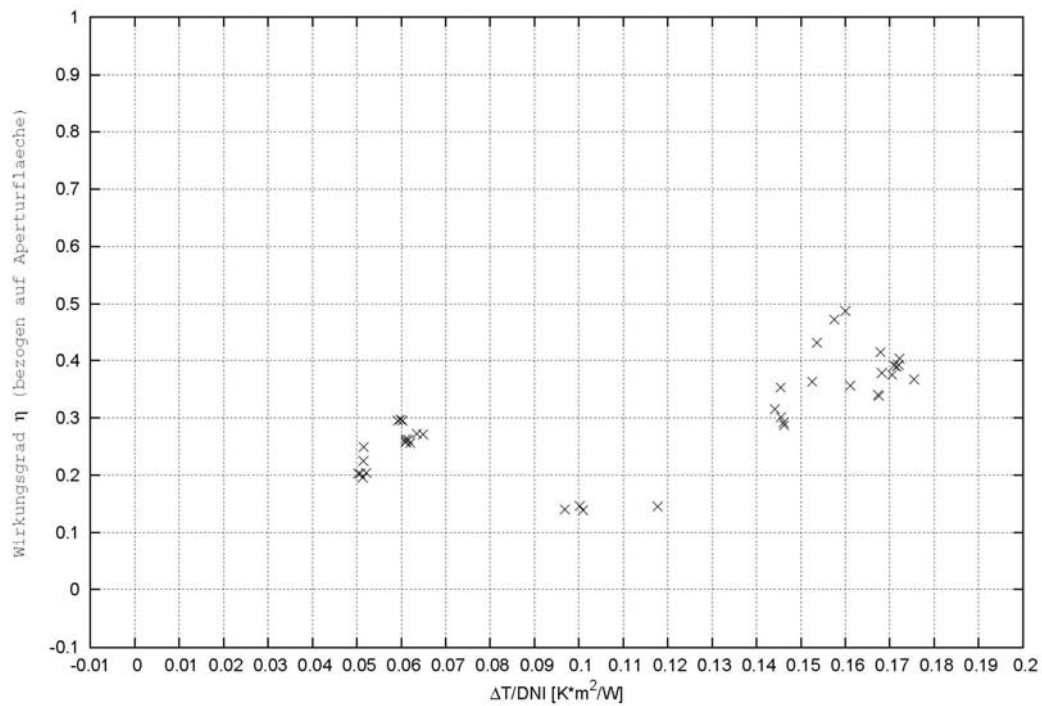


Abbildung 5.1: Wirkungsgradkennlinie mit allen Punkten, ohne Fit-Kurve

5 Wirkungsgradkennlinie (WKL) des Fresnelkollektors

Im letzten Schritt wurden alle gemessenen quasistationären Leistungspunkte mit den Einstrahlwinkelkorrekturfaktoren korrigiert:

Wirkungsgradpunkt= Leistungspunkt/IAM

Damit ergeben sich Wirkungsgradkennlinienpunkte für den Fresnel-Kollektor, die die entsprechende Information zu den Wirkungsgradkennlinien von Flach- und Vakuumröhrenkollektoren nach EN12975 enthalten. Über die Parameter η_0 sowie die Wärmeverlustparameter a_{1a} und a_{2a} kann die Wirkungsgradkennlinie parametrisiert werden. Die thermische Leistung des Kollektors kann über diese Wirkungsgradkennlinie, den IAM (und die thermische Kollektorkapazität C_c) in Simulationsprogrammen wie z. B. TRNSYS berechnet werden.

5.1 Wirkungsgradkennlinie mit allen Wirkungsgradpunkten

Die nachfolgende Grafik zeigt die Wirkungsgradkennlinie, wenn alle Wirkungsgradpunkte aus Abbildung 4.1 verwendet werden:

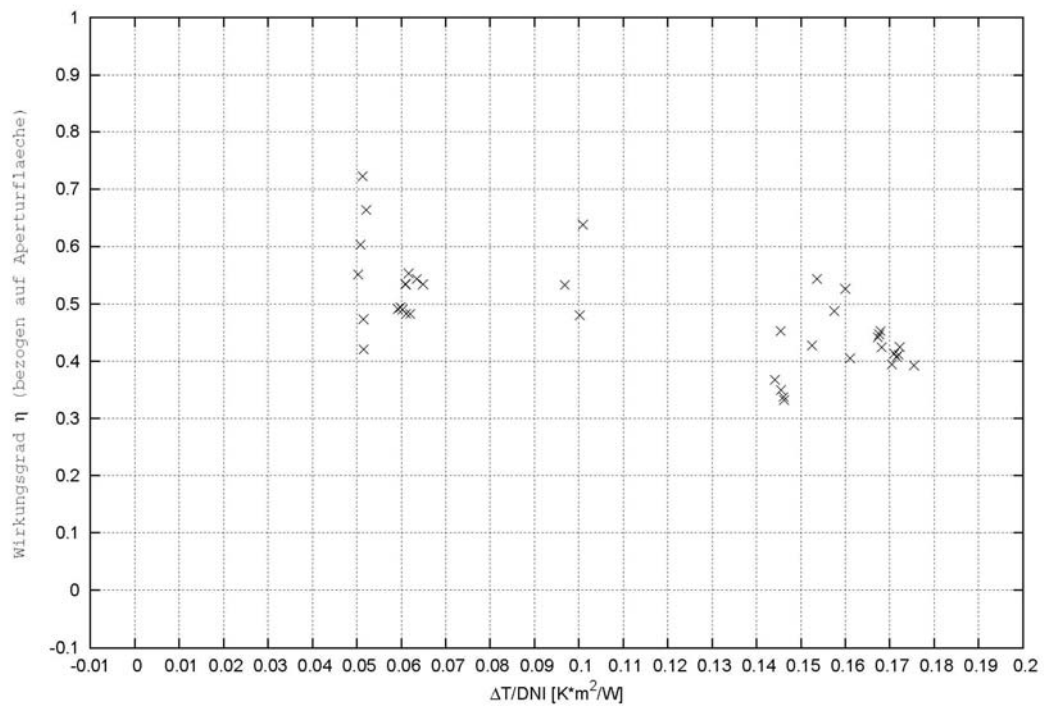


Abbildung 5.1: Sämtliche gemessene Wirkungsgradpunkte, ohne Fit-Kurve

In der folgenden Grafik wurde zusätzlich ein linearer Fit durch die Punkte gelegt:

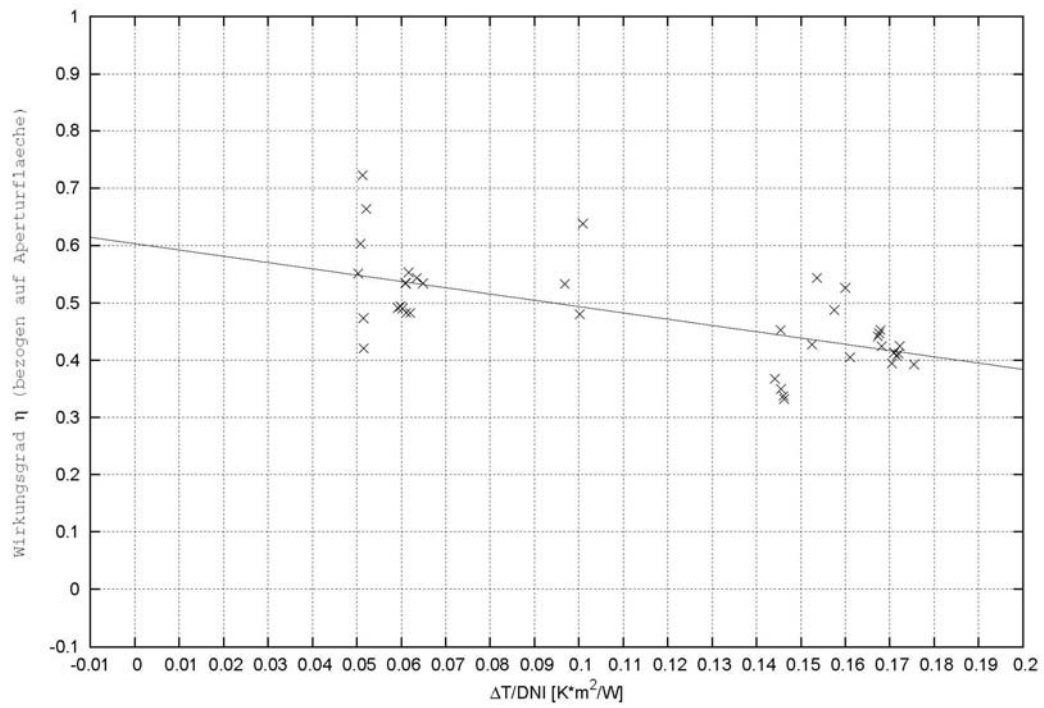


Abbildung 5.2: Wirkungsgradkennlinie mit allen Punkten, mit linearer Fit-Kurve: $\eta_0 = 0.603$, $a_{1a} = 1.0955 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

5.2 Wirkungsgradkennlinie mit nach Aufzeichnungen sinnvollerweise bereinigten Wirkungsgradpunkten

Wie bereits erwähnt, waren die Messdaten im Rahmen von Messungen der Kollektorentwicklung aufgenommen worden. Deshalb wurde in einem weiteren Schritt die Tagesaufzeichnungen der Messtage und die Bedingungen, unter denen die Messungen zustande gekommen waren noch einmal genau analysiert. Sinnvollerweise wurden dann diejenigen Messpunkte eliminiert, bei denen Besonderheiten bei der Messung vorlagen:

22.9.06, Messungen 13:07:10 bis 13:22:50

Um 13:14 wurde eine Spiegelreihe neu kalibriert, die um 0.6° korrigiert werden musste.

22.9.06 Messung um 14:33:00

Neukalibrierung von zwei Spiegelreihen

6.11.06, Messung um 15:18:10

stark sinkende DNI

7.11.06, Messung um 12:39:00

Messung wegen unterbrochener Spiegelsteuerung (Internetverbindung) nicht in Ordnung

16.11.06, Messung um 13:02:28

Deutlich sinkende DNI, dadurch evtl. Überschätzung des Wirkungsgrades.

Mit dem reduzierten Datensatz an Messpunkten ergeben sich folgende Kennlinien:

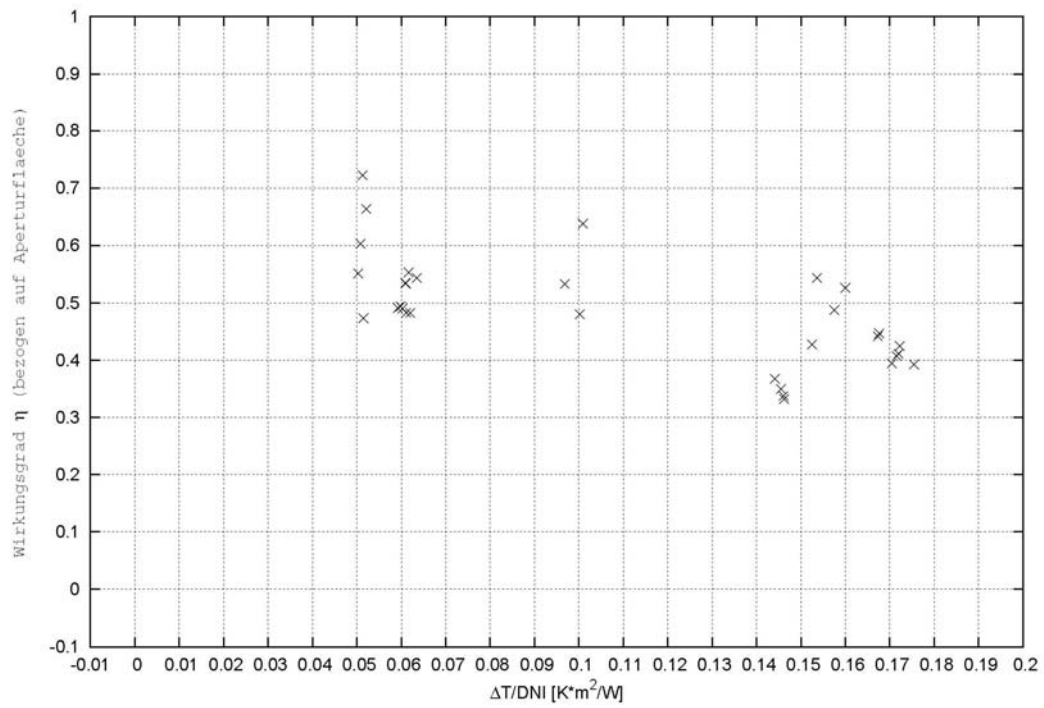


Abbildung 5.3: Sämtliche regulär gemessene Wirkungsgradpunkte, ohne Fit-Kurve

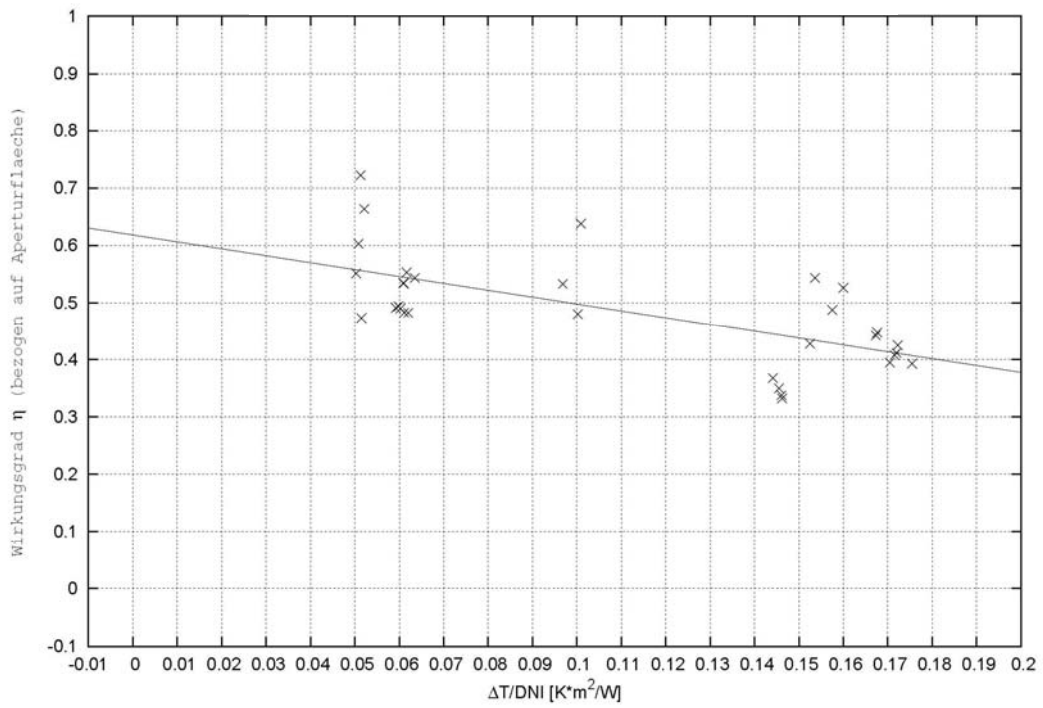


Abbildung 5.4: Wirkungsgradkennlinie mit allen regulär gemessenen Punkten, mit linearer Fit-Kurve: $\eta_0=0.618$, $a_{1a}=1.2043 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^2)$

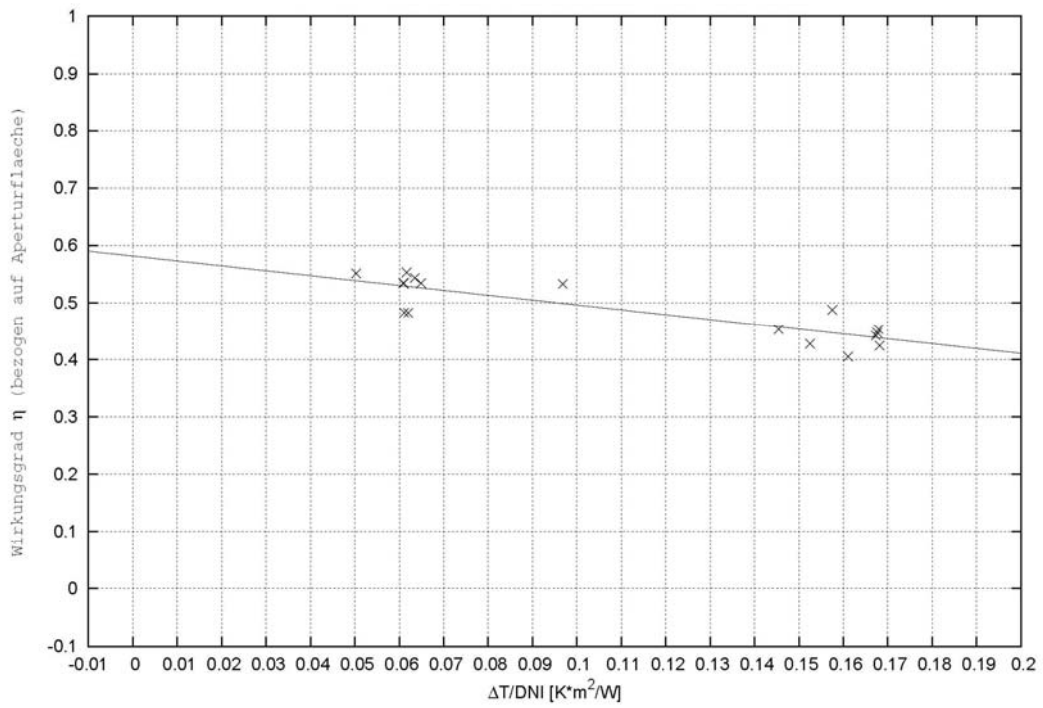


Abbildung 5.6: Wirkungsgradkennlinie "ohne Ausreißer", mit linearer Fit-Kurve: $\eta_0 = 0.5816$, $a_{1a} = 0.8545 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

5.4 Vergleich der Wirkungsgradkennlinien

In der nachfolgenden Grafik sind die linearen Wirkungsgradkennlinien gemeinsam dargestellt. Man sieht, dass die unterschiedlichen Datensätze nur kleine Unterschiede in den resultierenden Kennlinien verursachen.

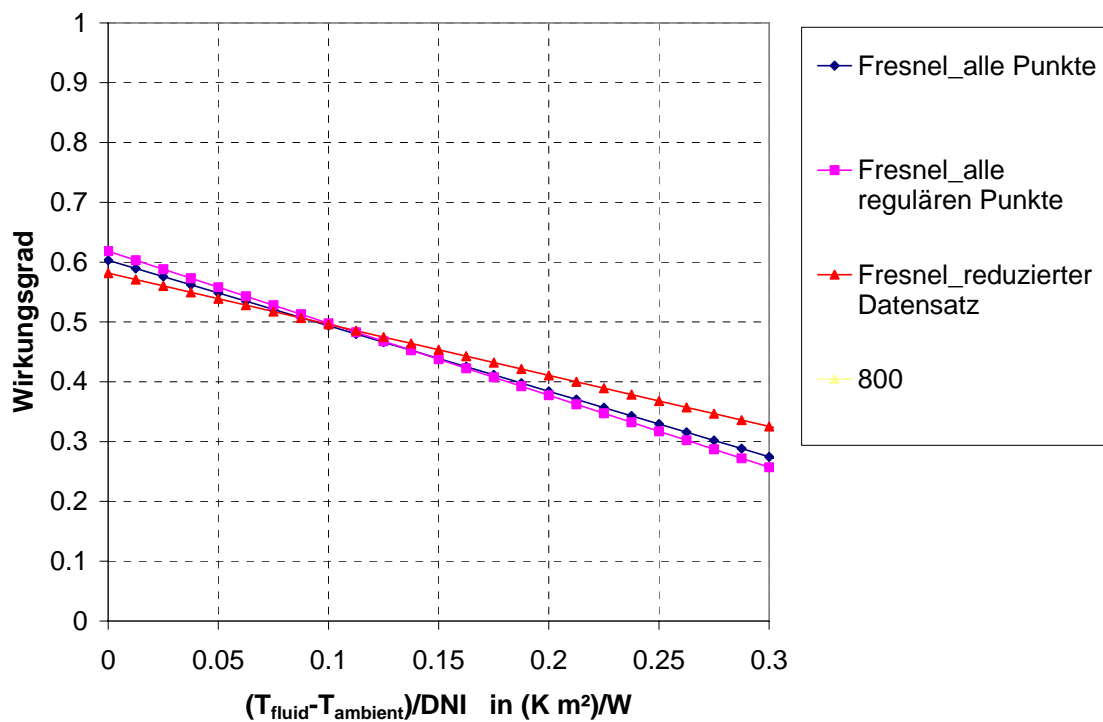


Abbildung 5.7: Vergleich der Wirkungsgradkennlinien. Die resultierenden Kennlinien werden durch in 5.2 und 5.3 beschriebene Reduktion der Datensätze nicht wesentlich beeinflusst. Die höchsten gemessenen Punkte lagen bei $(T_{\text{fluid}} - T_{\text{ambient}})/\text{DNI} = 0.175 (\text{K m}^2)/\text{W}$. Deshalb ist der Verlauf der Wirkungsgradkennlinie für Werte von $(T_{\text{fluid}} - T_{\text{ambient}})/\text{DNI}$ größer als $0.2 (\text{K m}^2)/\text{W}$ nicht gesichert, sondern rein spekulativ extrapoliert.

6 Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen

6.1 Kollektorzeitkonstante bestimmen

Es wäre sinnvoll, die Kollektorzeitkonstante des Fresnelkollektors entsprechend EN 12975-2:2006 Abschnitt 6.1.6.4 zu bestimmen. Dies sollte experimentell durch gleichzeitiges Fokussieren aus einer defokussierten Anfangsstellung heraus möglich sein. Über die gemessene Kollektorzeitkonstante könnten die sinnvollerweise zu verwendenden Zeitspannen für die Konditionierung und die Mittelung zur Bestimmung von gültigen Leistungsmesspunkten bestimmt werden.

6.2 IAM durch Messung verifizieren

In der bisherigen Auswertung werden rein theoretisch berechneten IAM-Werte verwendet. Wenn die experimentellen Voraussetzungen dazu geschaffen sind und die Kollektorleistung hinreichend stabil bei konstanten Kollektortemperaturen gemessen werden kann, wäre es als nächstem Schritt möglich, gezielt Messungen zur Verifizierung der IAM Kurven durchzuführen. Damit könnte die Auswertung dann komplett auf gemessene Werte basieren.

7 Anhang Liste der gemessenen Wirkungsgradkennlinienpunkte

date	time	Tamb	G	m	Tin	Tout	Tout-Tin	Tmean	dT_G	eta	IAM	eta/IAM
22.09	124210	25.35	832.89	1084.06	147.3	157.51	10.208	152.4	0.1525	0.363	0.9	0.4033
22.09	130710	26.12	830.1	1071.37	154.82	164.96	10.1412	159.89	0.1611	0.356	0.9193	0.3873
22.09	132250	26.4	814.16	1070.46	158.03	168.6	10.5691	163.32	0.1682	0.378	0.9216	0.4102
22.09	143300	26.32	668.52	1105.38	119.65	127.36	7.71	123.51	0.1454	0.353	0.8237	0.4286
19.07	111100	31.62	826.33	1083.92	146.34	155.11	8.7774	150.72	0.1441	0.315	0.9254	0.3404
19.07	111600	31.45	828.42	1086.07	147.78	156.19	8.4131	151.98	0.1455	0.301	0.9279	0.3244
19.07	112610	32.18	833.75	1084.25	150.03	158.12	8.0919	154.07	0.1462	0.287	0.9273	0.3095
19.07	113340	31.98	834.75	1076.64	149.82	158.1	8.2774	153.96	0.1461	0.292	0.9258	0.3154
19.07	122210	33.57	834.14	1072.5	167.7	179.58	11.8838	173.64	0.1679	0.414	0.9611	0.4308
19.07	124740	33.73	842.81	1078	172.15	183.47	11.3161	177.81	0.171	0.391	0.985	0.397
19.07	125240	33.8	837.17	1074.3	172.17	183.78	11.6111	177.97	0.1722	0.403	0.9849	0.4092
19.07	125740	34.2	838.71	1068.75	171.76	182.65	10.8898	177.2	0.1705	0.375	0.9838	0.3812
19.07	130240	34.05	837.12	1067.01	172.38	183.75	11.372	178.06	0.172	0.392	0.9828	0.3989
19.07	130740	33.79	837.74	1068.15	171.81	183.1	11.2922	177.46	0.1715	0.389	0.982	0.3961
19.07	135440	34.72	810.13	1066.89	171.72	182.02	10.2974	176.87	0.1755	0.367	0.9622	0.3814
19.07	152010	35.12	752.45	1059.48	156.55	165.41	8.8646	160.98	0.1673	0.34	0.8311	0.4091
19.07	152510	35.19	747.54	1059.29	156.11	164.87	8.7546	160.49	0.1676	0.338	0.8195	0.4124
18.07	132500	31.78	876.88	1022.06	162.37	177.35	14.9788	169.86	0.1575	0.473	0.9764	0.4844
18.07	140050	32.14	855.3	1021.22	161.48	176.56	15.0842	169.02	0.16	0.488	0.9587	0.509
18.07	151100	33.5	827.45	1099.06	154.66	166.6	11.9424	160.63	0.1536	0.431	0.8511	0.5064
6.11	150310	11.39	458	1139.27	56.23	58.3	2.0688	57.26	0.1002	0.147	0.3375	0.4356
6.11	150810	11.35	477.12	1138.89	56.52	58.58	2.0661	57.55	0.0968	0.141	0.2938	0.4799
6.11	151310	11.33	462.39	1138.67	57.02	58.98	1.9679	58	0.1009	0.139	0.2456	0.566
6.11	151810	11.31	398.04	1138.38	57.27	59.05	1.7802	58.16	0.1177	0.146	0.2001	0.7296
7.11	123400	11.01	826.63	1114.44	50.38	56.8	6.4226	53.59	0.0515	0.249	0.5764	0.432
7.11	123900	11.13	824.97	1113.93	50.68	56.49	5.8129	53.59	0.0515	0.225	0.5857	0.3842
7.11	133120	12.38	786.12	1110.5	55.24	62.53	7.2868	58.89	0.0592	0.295	0.6303	0.468
7.11	133620	12.46	790.09	1110.09	56.01	63.4	7.3833	59.7	0.0598	0.297	0.6284	0.4726
7.11	134120	12.52	787.84	1109.7	56.33	63.65	7.318	59.99	0.0603	0.295	0.6264	0.4709
16.11	124228	17.82	782.44	1078.58	62.66	69.33	6.6657	65.99	0.0616	0.262	0.5195	0.5043
16.11	124728	17.94	786.36	1077.7	62.64	69.21	6.5655	65.92	0.061	0.257	0.5274	0.4873
16.11	125228	18.52	781.3	1077.42	62.83	69.52	6.6826	66.18	0.061	0.263	0.5382	0.4887
16.11	125728	18.99	748.28	1076.58	63.16	69.78	6.6209	66.47	0.0635	0.272	0.5454	0.4987
16.11	130228	19.02	728.29	1075.57	63.1	69.53	6.4341	66.32	0.0649	0.271	0.5509	0.4919
16.11	131808	19.03	731.37	1074.78	61.3	67.4	6.0999	64.35	0.062	0.256	0.567	0.4515
16.11	132308	19.17	732.55	1074.59	60.87	67.06	6.1908	63.96	0.0611	0.259	0.5706	0.4539
16.11	144518	19.37	642.32	1072.94	49.59	53.81	4.227	51.7	0.0503	0.203	0.3993	0.5084
16.11	145018	19.55	633.79	1073.66	49.64	53.8	4.1688	51.72	0.0508	0.203	0.3682	0.5513
16.11	145518	19.29	618.16	1073.54	49.43	53.51	4.0868	51.47	0.0521	0.204	0.3374	0.6046
16.11	150018	19.28	619.54	1072.8	49.07	53.01	3.9329	51.04	0.0513	0.196	0.2991	0.6553