



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 14. Dezember 2010

Predesign Studie mobiler Teststand für solarthermische Prozesswärmeanlagen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm II.3
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

SPF Institut für Solartechnik
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil
www.solarenergy.ch

Autoren:

Andreas Bohren, SPF Institut für Solartechnik, andreas.bohren@solarenergy.ch
Matthias Rommel, SPF Institut für Solartechnik, matthias.rommel@solarenergy.ch

BFE-Bereichsleiter: Stefan Oberholzer

BFE-Programmleiter: Pierre Renaud

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154249 / 103226

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Abstract

Die Erweiterung der konventionellen Solarthermie in höhere Temperaturbereiche wird von verschiedenen Firmen mit viel Elan vorangetrieben. Dabei werden verschiedenste Konzepte und Temperaturbereiche bearbeitet. Um die Technologie zu unterstützen sind normierte Messverfahren wichtig die vergleichbare Messwerte liefern. Dazu müssen einerseits die Normen geschaffen oder erweitert werden und anderseits auch geeignete Messeinrichtungen verfügbar sein.

In dem anvisierten Bereich bis maximal etwa 400°C kann man davon ausgehen, dass die bestehenden Messverfahren wie z.B. EN12975 grundsätzlich geeignet sind zur Leistungscharakterisierung einzelner Module und Kollektoren. Mittlerweile sind auch getrackte Kollektoren nach dieser Norm prüfbar. Damit können - zumindest in der Theorie - praktisch alle Mitteltemperaturkollektoren bezüglich Leistung vermessen werden

Die dazu notwendige Infrastruktur ist allerdings noch weitgehend nicht vorhanden. In diesem Projekt sollen deshalb die Grundlagen dafür geschaffen werden um ein entsprechende Messanlage zu bauen.

Da viele dieser Anlagen nicht oder nur schwer transportabel sind, wird vor allem auch die Möglichkeit einer mobilen Messanlage untersucht und evaluiert.

A.) Evaluation und theoretische Entwicklung eines Messverfahrens in Anlehnung an die Europäische Kollektornorm EN-12975

1. Definition notwendiger Messparameter für die Charakterisierung einer Testanlage. Bedürfnisabklärung anhand bestehender Anlagen.

Die Geltungsbereich der Norm EN12975 wurde mittlerweile so erweitert, dass damit nun auch getrackte konzentrierende Kollektoren charakterisiert werden können. Damit ist automatisch auch die Solar Keymark Zertifizierung möglich. Dieses Zertifikat ist in Europa in aller Regel die notwendige Grundlage für Förderprogramme. Mit der Erweiterung der Norm ist vorderhand grundsätzlich klar, welche Parameter für die Leistungscharakterisierung bestimmt werden müssen. Da allerdings nur der Geltungsbereich der Norm angepasst wurde, muss man davon ausgehen, dass die Erweiterung der Norm in vielen Fällen den spezifischen Eigenheiten konzentrierender Kollektoren nicht wirklich gerecht wird. Eigene Messungen bestätigen diesen Sachverhalt (siehe weiter unten).

Grundsätzlich wurde die sogenannte quasidynamische Methode zur Bestimmung der Leistungskenzahlen in der Norm als zu bevorzugende Methode verankert. In diesem Modell werden alle möglichen Parameter die den effektiven Wirkungsgrad definieren gleichzeitig bestimmt (Anhang A). Es ist aber zu bedenken, dass dabei zum Beispiel die Trackgenauigkeit nicht direkt erfasst wird. Falls bei einem Produkt der Tracker eine wichtige Rolle spielt, z.B. weil der Mechanismus nicht genügend genau ist, dann kann die Norm nur eingeschränkt angewendet werden.

Der Vorteil des quasidynamischen Verfahrens ist eindeutig der, dass weniger Eingriffe in die Anlage notwendig sind um Messungen durchzuführen. Insbesondere ist kein spezieller Tracker notwendig, da die Einfallsinkelkorrekturen nur über ein Modell bestimmt und nicht effektiv gemessen werden. Das bedeutet aber auch, dass für eine korrekte Messung ein entsprechendes, individuelles Modell für die Winkelabhängigkeiten verfügbar sein muss. Erfahrungen bei konventionellen Röhrenkollektoren haben allerdings schon gezeigt, dass diese Modelle nur mit sehr hohem Simulationsaufwand verfügbar werden. Die Unsicherheit der Messung ist deshalb deutlich grösser als bei stationären Verfahren. Die quasi dynamischen Methoden werden deshalb am SPF eigentlich nicht eingesetzt.

Fazit: i) Die Parameter die auch in der normalen Messung nach EN12975 bestimmt werden sind grundsätzlich dazu geeignet auch konzentrierende getrackte Kollektoren zu vermessen.

Zumindest solange der Trackingmechanismus nicht bewertet wird, also als genügend genau angenommen werden kann, so dass er keinen Einfluss auf das Resultat hat. Sobald der Tracker auch bewertet werden soll, sind neue Parameter notwendig die aber den Tracker betreffen und nicht den Kollektor an und für sich. ii) Es fehlt an Erfahrungen im realen Messbetrieb. Verschiedene uns bekannte Prüflabors haben erste Versuche gemacht, die Ergebnisse sind aber in aller Regel nicht zugänglich oder dann eher fraglich. Es müssen unbedingt eigene zusätzliche Messungen an realen Objekten gemacht werden.

2. Teilnahme an laufenden Projektmeetings auf europäischer Ebene zwecks Adaption von EN-12975 für Mitteltemperaturkollektoren.

Nach unserem Kenntnisstand befassen sich weiterhin vier internationale Projekte mit der Thematik:

- TC312, WG1: In einem Schnellverfahren wurde die Norm soweit vorbereitet, dass getrackte Kollektoren vermessen werden können. Die laufende Revision der Norm wird Anfang nächstem Jahr als Draft aufgelegt. Bezuglich der Leistungsmessung sind allerdings keine Änderungen mehr zu erwarten. Noch unklar ist die Handhabung der Qualitätsprüfungen die einen gewichtigen Teil der Norm ausmachen. Verschiedene etablierte Prüfungen sind nicht einfach auf Mittel- und Hochtemperaturkollektoren anzuwenden. So gibt es z.B. grosse Diskussionen über die Bewertung von Mechanismen zum Überhitzungsschutz.
- QAIST: Das QAIST Projekt hat mittlerweile eine vorberatende Funktion für die TC312 WG1 übernommen. Die Resultate des Projektes sind Input für die WG1.
- SRCC: Die amerikanische Zertifizierungsgesellschaft hat eine Norm eingeführt (Standard 600) und das SPF ist grundsätzlich dafür akkreditiert. Bezuglich der Leistungsmessung ist die Norm praktisch identisch mit den bestehenden Normen.
- IEA Task 43: Im Rahmen des IEA Task 43 werden Prozesswärmekollektoren behandelt. Die laufenden Teilprojekte sind alle im Bereich der bereits beschriebenen Projekte. Es werden keine grundlegenden Änderungen erwartet. Der Focus liegt hier bei der Entwicklung einer weltweiten Norm. Die Aktivitäten im IEA Task 43 konzentrieren sich bislang eher auf das Organisieren der Gesamt-Task beschäftigt und weniger auf konkrete Arbeitsergebnisse zu den einzelnen Arbeitspaketen. Auch zur Normung und zum Testen von konzentrierenden Kollektoren sind bislang keine abschliessenden Ergebnisse erzielt worden.

Sowohl die Ergebnisse des Task 43 als auch des TC312, WG1 Gremiums und des europäischen Projektes QAIST werden vom SPF weiterhin verfolgt und fließen in die Projektarbeit mit ein.

3. Abklärung von Aufwand um bestehende Simulationssoftware (z.B. Polysun4) hinreichend zu adaptieren.

Die Software Polysun ist bereits in der Lage gewisse getrackte Systeme abzubilden und auch zu simulieren. Um beliebig getrackte System zu simulieren muss der Code allerdings noch angepasst werden. Der Aufwand dafür ist im Bereich von etwa zwei Arbeitswochen. Besonders bei hochkonzentrierenden Systemen wäre es dann aber auch sehr aufschlussreich wenn Trackingfehler oder andere „Fehler“ wie z.B. Spiegelfehler simuliert werden könnten. Das ist aber bisher nicht vorgesehen und würde einen deutlich grösseren Eingriff in die Software notwendig machen.

Je nach Wärmeträgerfluid sind auch die thermischen Eigenschaften, insbesondere die Wärmekapazitäten bei sehr hohen Temperaturen, nicht so genau bekannt wie z.B. für Wasser. Die spezifischen Fluide sind deshalb noch nicht in den Polysun Datenbanken verfügbar und müssten dort auch temperaturabhängig implementiert werden. Für die entsprechenden Werte müsste man sich auf die Herstellerdeklarationen verlassen.

4. Kontakt mit Herstellern und Anlagenbesichtigungen zur Abklärung der Integrierbarkeit einer Messanlage in eine laufende Prozesswärmeanlage.

Verschiedene SPF Kunden aus dem Bereich der konventionellen Röhrenkollektoren haben Projekte im Prozesswärmebereich. Es sind auch bereits Kollektoren am SPF konventionell geprüft worden die durchaus in einen Temperaturbereich bis 300°C einsetzbar bzw. vorgesehen sind z.B. als Wärmequelle für kleine Organic Rankine Cycle Anlagen. Diese Kollektoren sind aber leicht transportabel und müssen darum nicht direkt auf der Anlage vermessen werden.

Neben eher allgemeinen Informationsgesprächen und Telefonanfragen wurden außerdem konkrete und fundierte Kontakte mit folgenden Firmen aufgenommen:

NEP: Die Gespräche wurden mit Stefan Minder, NEP Solar, Technoparkstr. 1, 8005 Zürich, geführt. NEP produziert in Australien einen Parabolrinnenkollektor für den Temperaturbereich von 80 bis 300°C. NEP hat konkretes Interesse an thermischen Leistungsmessungen und an Tests zur Weiterentwicklung des Kollektors. Der Kollektor PolyTrough 1200 hat eine Aperturweite von 1.2 m. In Feldanlagen ist eine Modul-einheit 24 m lang. Dies ist die Anlageneinheit, die von einer Nachführleinrichtung gesteuert wird. Sie besteht aus 4 Untereinheiten, je 6 m lang, die wiederum aus 3 Reflektormodulen bestehen. Die kleinste Kollektoreinheit, an der Messungen vorgenommen werden kann, ist also etwa 2 m lang und 1.2m breit. Allerdings kann diese kleinste Einheit nicht mit der Original-Nachführleinrichtung vermessen werden. Es ist vorgesehen, dass im Oktober 2010 die notwendigen Bauteile für eine Kollektoreinheit ans SPF gebracht werden, um diese für erste Testzwecke auf einem Tracker des SPF zu montieren und erste orientierende Leistungsmessungen durchzuführen. Ziel ist es dabei, erste grundlegende Erfahrungen mit den vorhandenen und bisher für nicht-konzentrierende Kollektoren verwendete Testprozeduren und Auswertungstools zu machen. NEP evaluiert momentan die Möglichkeiten, einen weiteren Kollektor mit einer Aperturweite von 2 m zu entwickeln.

SRB: SRB ist eine Entwicklungsfirma, die auf dem Gelände des CERN in Genf angesiedelt ist, SRB Energy Research, CH-1211 Geneve, www.srbenergy.com. SRB hat einen Hochvakuumflachkollektor entwickelt, dessen Absorber über Reflektoren beidseitig bestrahlt werden kann. Im September 2010 fanden bei SRB Gespräche statt, in denen Interesse sowohl an Entwicklungsmessungen, als auch an einer möglichen Unterstützung zur Auswertung von Feldmessungen und zur Bewertung von thermischen Leistungsbestimmungen an Anlagen in Genf und in Spanien geäussert wurden.

3A: 3A Technology & Management Ltd., RhyTech Areal, Badische Bahnhofstr. 16, 8212 Neuhausen am Rheinfall, ist Hersteller von Composites. Momentan befasst sich 3A mit verschiedenen Fragestellungen zur Entwicklung von Reflektoren. Über die Gesprächsinhalte wurde eine Geheimhaltungsvereinbarung unterzeichnet.

Energie Solaire SA: Die Firma Energie Solaire, CP 353 Z.I. Ile Falcon, Rue des Sablons 8, 3960 Sierre, stellt selektiv beschichtete Edelstahlabsorber her. Sie ist auch in der Lage runde Absorberrohre herzustellen, wie sie für Parabolrinnenkollektoren und für lineare Fresnelkollektoren benötigt werden. Diese Absorberrohre werden von verschiedenen Entwicklungsfirmen für unterschiedliche Eigenentwicklungen verwendet. Energie Solaire hat auch dem SPF Muster von Absorberrohren zur Verfügung gestellt. Eines davon wurde den Bau eines Testkollektors verwendet, der am SPF im Rahmen einer Projektarbeit eines Masterstudenten im Studiengang Renewable Energy Systems aufgebaut wurde. Energie Solaire ist an einer weiteren Zusammenarbeit interessiert. Insbesondere sind Methoden zur optischen und thermischen Charakterisierung von Bauteilen konzentrierender Kollektoren von besonderem Interesse.

Verschiedene Firmenkontakte Intersolar 2010: Im Rahmen der Messe Intersolar 2010 in München fand am 9.6.2010 die internationale Konferenz SOLAR HEAT FOR INDUSTRIAL PROCESSES AND SMALL SCALE POWER CO-GENERATION statt.

Vom SPF aus war Herr Prof. Rommel eingeladen, um einen Überblicksvortrag „Overview on Collector Developments for Industrial Applications“ zu halten. Dadurch sind Kontakte mit den Firmen SPOGY, trivelli energia, Dr. Vetter und CHROMASUN entstanden, die im weiteren Verlauf der Arbeiten wieder aufgenommen werden können.

Konkrete Anfragen für die Messung und Solar Keymark Zertifizierung: Im Laufe der letzten zwei Jahre sind etwa zehn Hersteller mit dem Wunsch nach Messung der auch Zertifizierung ihrer Produkte an uns gelangt. Auffallend ist dabei die Bandbreite der Ansätze. Der konventionell getrackte Rinnenkollektor ist nur eine von vielen Möglichkeiten für Prozesswärme. Oft scheinen die Produkte allerdings noch eher in einem Prototypenstadium zu sein. Nach unserem Wissen gibt es denn auch nur wenige Anlagen die effektiv in Betrieb sind und sich für eine eingehendere Untersuchung eignen würden.

Aktuell werden konkrete Gespräche mit einer Firma geführt bezüglich der Möglichkeit eine reale Anlage messtechnisch zu begleiten und auszuwerten um die notwendigen Erfahrungen zu sammeln.

B) Marktevaluation möglicher Komponenten, Sensoren und Regler für die Implementierung des Messverfahrens

1. Evaluation von Komponenten (Wärmetauscher, Pumpen, Ventile, Verbindungselemente, Wärmeabwurf, etc.), Sensoren (Durchfluss, Temperatur, Strahlung, etc.) und Reglern (inkl. Messdatenerfassung) im vorgesehenen Einsatzbereich unter spezieller Berücksichtigung der eingesetzten Wärmetransportmedien, Temperaturen und Systemdrücke.

Wie bereits die Evaluation der Messverfahren gezeigt hat, kann nicht eine einzige Messanlage definiert werden die allen Anforderungen der verschiedenen Hochtemperaturkollektoren gerecht wird. Dazu ist die Vielfalt der Konzepte und Ansätze zu gross. Es müssen verschiedene Fälle unterschieden werden die dann messtechnisch und infrastrukturell deutlich unterschiedliche Anforderungen stellen. Die wichtigen Unterscheidungskriterien sind „Temperaturbereich“, „eingesetztes Fluid“ und „Mobilität der Anlage“.

Wie bereits die theoretischen Betrachtungen gezeigt haben sind unbedingt Erfahrungen an realen Objekten notwendig. Dazu wurden erste Module auf dem Prüfdach des SPF aufgebaut und in dem möglichen Temperaturbereich mit den bestehenden Möglichkeiten ausgemessen (siehe Abbildung 1).

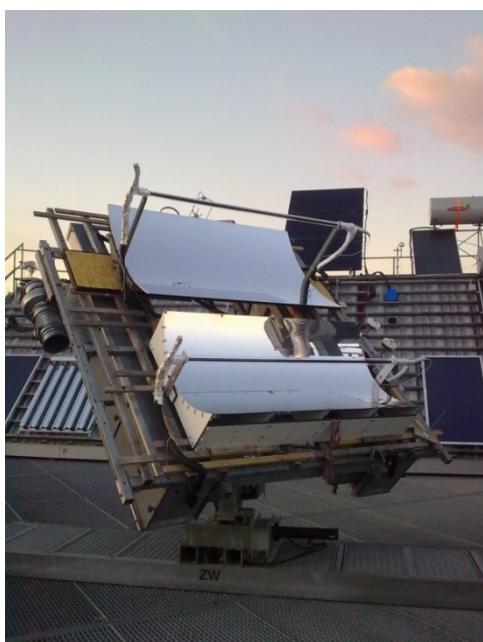


Abb. 1
Konzentrierende Kollektoren auf dem SPF Prüfstand.
Messungen mit einem normalen Wasser-Glykol Gemisch bis etwa 120°C.

Niedertemperaturkollektoren/Mitteltemperaturkollektoren, Bereich bis etwa 120°C.

Dieser Bereich wird aktuell durch die Messanlagen des SPF bereits vollständig abgedeckt, sofern wasserbasierte Wärmeträgerfluide (Glykole oder Wasser) zum Einsatz kommen. Alle Parameter für die Charakterisierung der Leistung können erfasst werden. Ein Prüfstand wird aktuell modifiziert um auch für höher konzentrierende Kollektoren genügend Trackgenauigkeit erreichen zu können. Erste Messungen wurden sowohl mit einem speziell dafür konstruierten variablen Rinnenkollektor als auch mit einem kommerziellen Testmodul durchgeführt (Abb. 1).

Diese Erfahrungen sind enorm aufschlussreich und aufbauend darauf wären weitere Messungen und Versuche sehr wertvoll. Verschiedene wichtige Erkenntnisse konnten aber bereits gewonnen werden wie zum Beispiel:

- i) Es ist wichtig, dass die Module sehr genau aufgebaut werden. Wird ein hochkonzentrierendes Modul nicht genügend genau ausgerichtet, so wird der Betriebszustand so instabil, dass eine Messung nicht möglich ist. Der gleiche Effekt würde zum Beispiel durch einen zu wenig genauen Tracker (unabhängig davon ob vom Hersteller geliefert oder vom Prüflabor gestellt) oder auch durch ein zu wenig genau gebautes Modul verursacht werden. Abb. 2 zeigt eine solche instabile Messung. In aller Regel, das heisst mit entsprechendem Aufwand, könnten diese Effekte im Prüfbetrieb beseitigt werden. Es stellt sich natürlich die Frage wie genau diese Resultate den realen Betrieb dann abbilden würden. Zum Vergleich zeigt Abbildung 3 die Messungen an einem weniger stark konzentrierenden Modul. Diese Messung ist deutlich stabiler und entspricht dem was von einer Messung nach EN12975 erwartet werden kann.

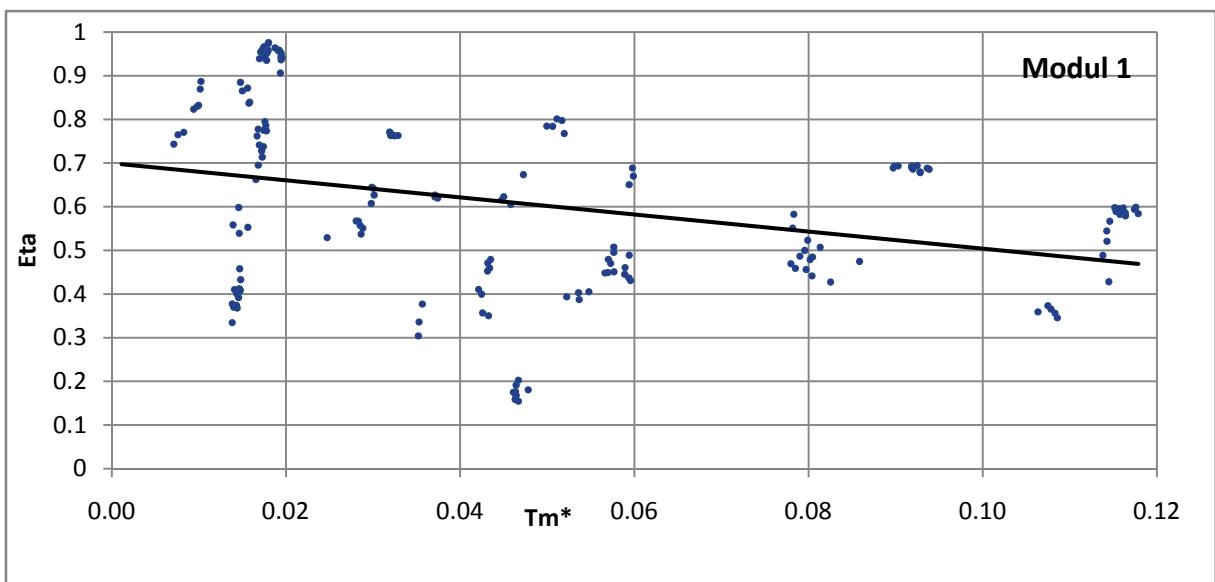


Abb. 2. Messung eines konzentrierenden Moduls mit vermutlich ungenügender Fokussierung. Die x-Achse bezeichnet die Temperaturdifferenz zwischen Modul und Umgebung, y-Achse ist der gemessene Wirkungsgrad. Die eingezeichnete Gerade entspräche der daraus ermittelten Wirkungsgradkennlinie nach EN12975.

Es ist klar, dass die korrekte Wirkungsgradmessung aus einer Messung wie in Abb. 2 gezeigt - unabhängig von der gewählten Analysemethode – wenig sinnvoll ist. Man muss aber mit solchen Modulen rechnen und entsprechende Methoden müssen entwickelt werden (z.B. viel längere Integrationszeiten).

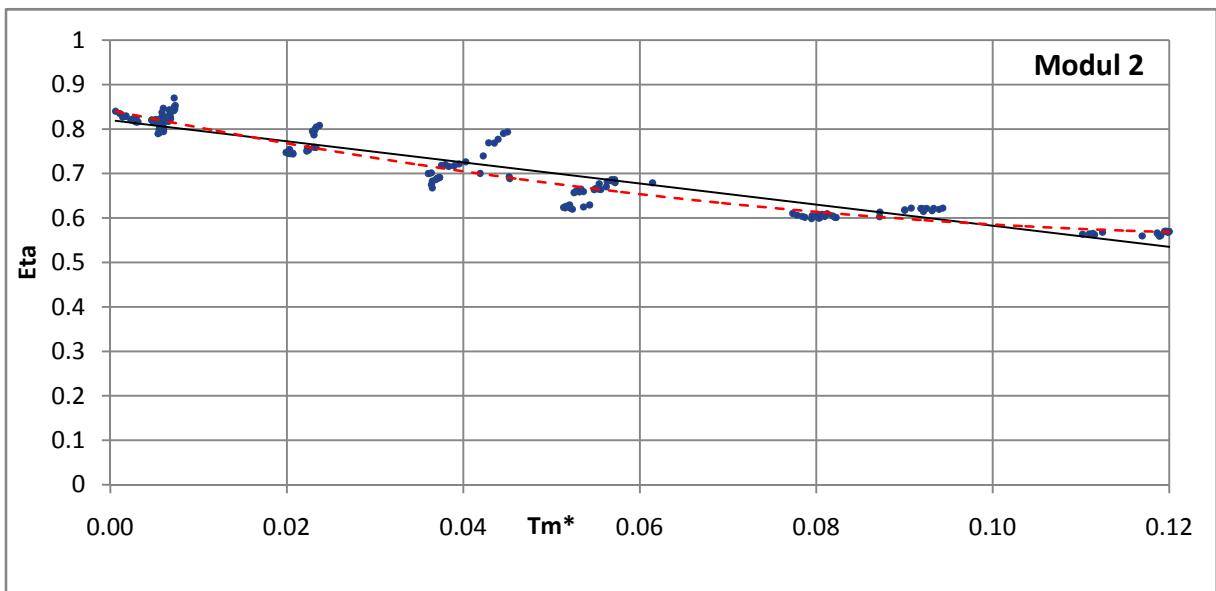


Abb. 3. Messung eines weniger stark konzentrierenden Moduls. Die Streuung der Punkte ist deutlich geringer. Die Messung entspricht in etwa einer normalen Standardmessung nach EN12975. Die lineare Wirkungsgradkennlinie (schwarz) wäre das Resultat der Messung. Die ebenfalls eingezeichnete theoretische rote Kurve zeigt, dass die gemessenen Wirkungsgrade über $T_m^*=0.06$ eher zu hoch sind. Vermutet wird als Ursache ein Übergang von laminarem zu turbulentem Durchfluss.

ii) Ein weiterer Effekt der bisher in der Norm nicht berücksichtigt wurde ist der Übergang von laminarem zu turbulentem Durchfluss. Aufgrund des grossen Temperaturbereiches in dem Prozesswärmekollektoren gemessen werden sollen ist ein solcher Übergang wahrscheinlich. Beim zweiten Modul findet dieser Übergang rechnerisch (Reynoldszahl) bei etwa $T_m^* = 0.06 - 0.07$ statt. Das könnte die gemessenen Wirkungsgradwerte über $T_m^*=0.06$ die eher zu hoch sind erklärt. Damit müsste dann die Messung in zwei Abschnitten erfolgen und würde dann auch zwei unterschiedliche Sätze Resultate liefern.

Weitere Versuche wurden durchgeführt um die Verlustfaktoren aus einer Messung der thermischen Verluste zu bestimmen. Dazu wurde der Wärmeverlust der Module unter kontrollierten Bedingungen ohne Einstrahlung (also nachts) vermessen. Theoretisch könnte man damit auf Messungen bei sehr hohen Temperaturen weitgehend verzichten. Dies würde die gesamte Messung deutlich vereinfachen. Die Resultate (Abb. 4) sind zwar interessant, vorderhand sind die Abweichungen aber noch eindeutig zu gross um auf Messungen bei Bestrahlung verzichten zu können. Im Endeffekt wird man vermutlich doch dazu gezwungen sein, Messungen bei den effektiv zu erwarteten Betriebszuständen zu machen.

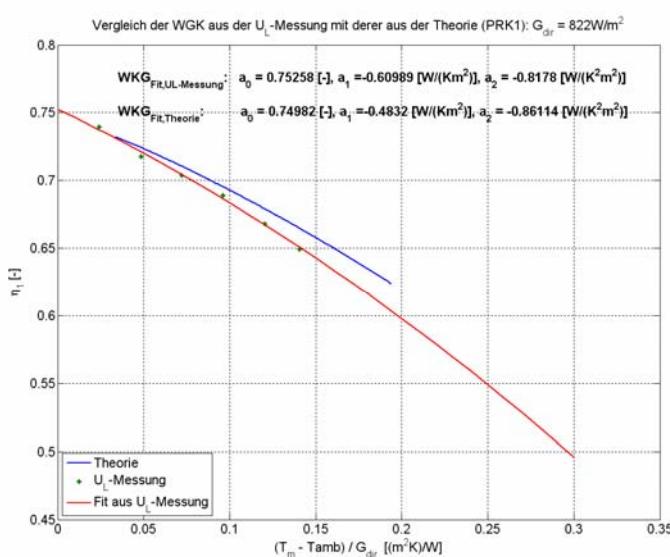


Abb 4. Vergleich der Verlustkennlinie aus einer U_L -Messung ohne Einstrahlung mit der theoretisch zu erwartenden Kennlinie.

Der Vergleich bezieht sich nur auf die Verlustfaktoren (Steigung der Kurven). Der Offset wurde so angenommen, dass die Kurven gut überlagert dargestellt werden. Ziel wäre es diesen Offset aus einer verhältnismässig einfachen Messung des Konversionsfaktors η_0 bei tiefen Temperaturen zu bestimmen.

Insbesondere im Hinblick auf die Anwendung im Feld und zum Anlagenmonitoring wurden außerdem Untersuchungen zum Thema der Strahlungsmessung durchgeführt. Für eine genaue Bewertung einer Anlage muss die effektive Einstrahlung der Sonne sehr gut bekannt sein. Dazu wird am Prüflabor ein getracktes Pyrheliometer verwendet das die Beamstrahlung misst, also die Strahlung die aus einem engen Winkelbereich der Sonne kommt. Für stark konzentrierende Kollektoren ist nur diese Strahlung nutzbar, diffuse Strahlung ist weitgehend verloren. Um die Strahlungssituation genau zu kennen wird also in aller Regel ein getracktes Pyranometer (misst die gesamte Einstrahlung) und das Pyrheliometer benötigt. Der Aufwand dafür ist sehr gross, weil ein Messtracker benötigt wird der genau der Sonne folgt. Es wäre deutlich einfacher und günstiger wenn diese Information aus horizontal fest montierten Pyranometern bestimmt werden könnte. In aller Regel wären dies zwei Pyranometer, eines das nicht verschattet ist (misst Gesamtstrahlung in horizontaler Ebene) und eines das mit einem Schattenring versehen, den horizontalen Diffusanteil der Strahlung liefert. Wenn der Sonnenstand bekannt ist, könnte daraus mit einiger Trigonometrie die direkte Beamstrahlung errechnet werden. Entsprechende Versuche wurden gemacht und es konnten auch sehr gute Übereinstimmungen gefunden werden, insbesondere im Sommer, also bei hohem Sonnenstand. Abbildung 5 zeigt Beispiele solcher Vergleichsmessung an vier verschiedenen Tagen. Im Sommer ist der Fehler in aller Regel klein, im Bereich von bis zu etwa 3.5%. Das sind schon ganz gute Werte, da die Strahlungsmessung an und für sich schon sehr schwierig ist. Deutlich grösser sind die Abweichungen bei tieferen Sonnenständen. Hier muss mit einem Fehler von ca. 10% gerechnet werden. Besonders in diesem Bereich kann das Modell sicher verbessert werden. Ziel wäre es dann, dass die Strahlungsmessung für das Monitoring einer Anlage finanziert bleibt für den Preis einer etwas reduzierten Genauigkeit.

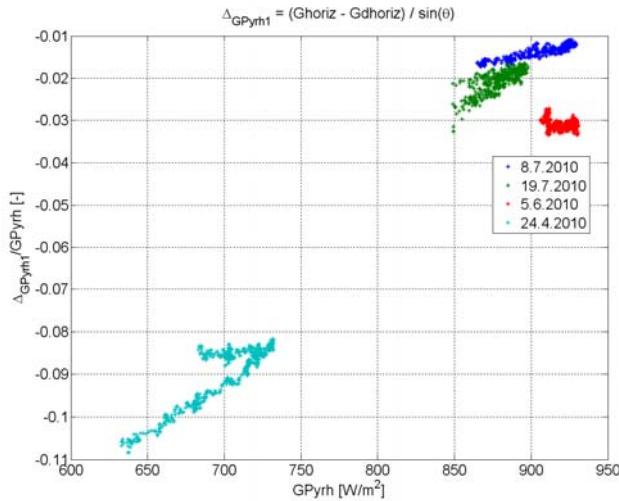


Abb. 5. Vergleich gemessene Direktstrahlung zu berechneter Direktstrahlung an verschiedenen Tagen. Berechnung aus den Daten von Horizontal angeordneten Pyranometern.

Bei hohem Sonnenstand (rot, grün, dunkelblau) ist die Übereinstimmung ganz gut und könnte für das Monitoring einer Anlage durchaus genutzt werden. Bei tieferem Sonnenstand (hellblau) ist der Fehler deutlich grösser.

Sowohl getrackte als auch nicht getrackte Kollektoren können grundsätzlich vollständig bezüglich Ihrer Leistungsfähigkeit im tieferen Temperaturbereich mit den bestehenden Einrichtungen des SPF charakterisiert werden. Der Temperaturbereich könnte mit geeigneten Massnahmen bis zu einer Temperaturdifferenz von maximal etwa 150K erweitert werden. Abgesehen vom Temperaturbereich ist die einzige Limitierung die Grösse und Transportierbarkeit des Prüflings. Die bestehenden Anlagen sind in der aktuellen Konfiguration nicht mobil.

Die Anlagen des SPF können grundsätzlich nicht mit thermischen Ölen betrieben werden. Dazu müsste eine hydraulisch separierte Anlage neu aufgebaut werden. Allerdings ist es gut möglich und sinnvoll eine solche Anlage als hydraulisches Plug-On Konzept zu realisieren um die Tracker des SPF doch zu nutzen. Ein solches Plug-On ist praktisch unabhängig von der SPF Infrastruktur und könnte somit auch mit relativ wenig Aufwand mobil gemacht werden (Siehe Abschnitt C).

Mitteltemperaturkollektoren, Bereich bis etwa 200°C/400°C.

In Bereich bis etwa 200°C gibt es zwei Alternativen. Einerseits können noch wasserbasierte Wärmeträger eingesetzt werden (reines Wasser, kurzfristig auch spezielle Wasser Glykol Gemische). Andererseits können natürlich auch schon die hitzebeständigen Silikonöle eingesetzt werden. Der Vorteil von Wasser als Medium ist die einigermassen einfache Handhabung und Ungefährlichkeit. Es muss allerdings schon mit sehr hohen Drücken gerechnet werden die wiederum ein grosses Sicherheitsrisiko darstellen. Durch den Einsatz von Silikonölen ist das Druckproblem weitgehend gelöst. Allerdings sind diese Öle in der Handhabung schwierig und auch von der Umweltverträglichkeit her eher als problematisch einzuschätzen. Insbesondere müssen klare bauliche Massnahmen ergriffen um im Fall einer Leckage Umweltprobleme zu verhindern (am SPF z.B. auch die Zerstörung der Dachhaut).

Bis 400°C kann eine Anlage nur noch mit Silikonölen betrieben werden. Damit kommen in allen Bereichen nur noch spezielle Komponenten zum Einsatz. Bei hohen Temperaturen steigt auch der Dampfdruck bei den Ölen an und muss entsprechend auch berücksichtigt werden. Ab etwa 350°C ist der Dampfdruck auch bei Ölen schon im Bereich von 10 bar.

Die bisherige Evaluation der Komponenten hat gezeigt dass sowohl die Komponenten als auch die Probleme für die beiden Fluide sehr ähnlich sind. Bei den Komponenten wie z.B. Pumpen, Ventilen, Rohrverbindungen kommen sogar oft die gleichen Produkte zum Einsatz. Diese sind aber grundsätzlich verfügbar, da ähnliche Anlagen in vielen Bereichen der Chemie-, Öl- und Nahrungsmittelindustrie benötigt werden.

In jedem Fall und unabhängig vom Medium wird die eigentliche Messung der Leistungsfähigkeit sinnvollerweise in mindestens zwei verschiedenen Temperaturbereichen mit unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen erfolgen. Bei tieferen Temperaturen/Drücken kann die Wärme konventionell über leistungsfähige Plattenwärmetauscher an die Umgebung oder an einen geregelten Kühlkreislauf abgegeben werden. Bei höheren Temperaturen/Drücken müssen andere Konzepte wie z.B. druckbeständige Koaxialwärmetauscher eingesetzt werden. Da für eine komplette Messung verschiedene Anlagenkonfigurationen notwendig sind, ist ein sicheres Druck- und Temperaturmanagement wichtig um Schäden und Gefahren zu vermeiden.

Stationäre Anlagen / Mobile Anlagen

Eine stationäre Anlage könnte in der Messumgebung des SPF integriert werden. Damit sind dann auch Messungen möglich die unabhängig von der Güte des vorgesehenen Trackers sind, bzw. Messungen an Kollektoren mit unsicherer Trackergenauigkeit. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn verlässliche Zahlen für die Winkelabhängigkeiten bzw. der Acceptance Angle bestimmt werden sollen.

Mobile Anlagen sind dann realistisch, wenn kein Trackmechanismus für die Prüfung erforderlich ist. Sofern der Trackmechanismus nicht als Teil der Prüfung angesehen werden kann ist der Bau einer mobilen Anlage machbar. Das dafür vorgesehene quasidynamische Messverfahren ist zwar relativ günstig hat allerdings die oben beschriebenen Nachteile. Besonders für nichtgetrackte Kollektoren ist die Genauigkeit des Verfahrens allerdings ohne aufwändige Simulationsrechnungen zweifelhaft.

Invasive und nichtinvasive mobile Anlagen

Mobile Anlagen die nicht direkt in die Anlage eingreifen wären wünschenswert. Eine derartige Anlage würde nur Fluidtemperaturen, Durchfluss und Strahlung messen ohne dass die zu bewertende Anlage dabei modifiziert werden müsste, der ganze Fluidkreislauf würde nicht beeinflusst. Die dazu notwendigen Messgeräte sind grundsätzlich verfügbar wie z.B. Anlegefühler für die Temperatur und den Durchfluss. Besonders schwierig ist dann aber die Kalibrierung der Sensoren, da diese vom Rohr auf dem sie befestigt sind abhängig ist. Die Strahlung kann relativ einfach und unabhängig von einer bestehenden Anlage bestimmt werden.

Leider ist die Genauigkeit der Anlegefühler so schlecht, dass eine derartige Anlage nur in wenigen Fällen Sinn macht und eher zu Überwachungs- oder Diagnosezwecke geeignet wäre. Die absolute Messung von Leistungskennzahlen mit dieser Art von Fühlern halten wir deshalb für wenig sinnvoll und nicht realistisch.

Der Einsatz von invasiven Messanlagen erfordert grössere Eingriffe in die bestehenden Anlagen. Der gesamte Fluidkreislauf muss modifiziert werden. Fühler werden eingebaut und der gesamte hydraulische Kreislauf sowie die Steuerung muss von der Messanlage übernommen werden. Damit könnte eine Prüfung unter Laborbedingungen mit der notwendigen Genauigkeit durchgeführt werden. In der Messperiode ist die Anlage dann aber grundsätzlich nicht funktionsfähig da zur Charakterisierung auch anormale und extreme Betriebszustände gefahren werden müssen. Im Sinne einer korrekten Leistungsmessung bzw. allenfalls auch eine Zertifizierung sind gewisse Eingriffe deshalb kaum zu umgehen. Wird die Anlage von vornherein so konzipiert, dass eine spätere Leistungsbewertung vorgesehen ist, kann auch eine invasive Messung ohne grösseren Aufwand gemacht werden. Es wäre deshalb wichtig mit einer realen Anlage Erfahrungen zu sammeln um dann geeignete Schnitt- und Eingriffstellen für die spätere Leistungsmessung definieren zu können. Entsprechend Abklärungen laufen mit der Firma NEP.

Kalibrierung der Durchflussmessgeräte

Eine der Hauptschwierigkeiten bei allen Messanlagen im Hochtemperaturbereich ist die Genauigkeit der Durchflussmessung. Es sind zwar Geräte verfügbar die in den Temperatur und Druckbereichen einsatzfähig sind. Das Problem ist die temperaturabhängige Kalibrierung der Geräte. Diese ist schon bei Durchflussmessgeräten für Niedertemperaturkollektoren eine der Hauptschwierigkeiten. Insbesondere da Fehler in der Durchflussmessung direkt an den Wirkungsgrad weitergegeben werden. Die temperaturabhängige Kalibrierung der Durchflussmessgeräte ist darum je nach Medium, Durchfluss und Temperatur erforderlich und sollte am Prüflabor gemacht werden. Die dazu notwendigen Kalibrierungsanlagen müssen speziell dafür konstruiert werden und sind nach unserem Kenntnisstand nicht einfach verfügbar. Die bisher am SPF eingesetzte Anlage kann unmöglich erweitert werden und ein alternatives Anlagenkonzept müsste realisiert werden. Der Aufwand wäre allerdings so gross, dass man in einem ersten Schritt vermutlich darauf verzichten und die entsprechenden Fehler in Kauf nehmen müsste.

C) Predesign Studie

1. Basierend auf A) und B): Grobplanung einer Messanlage. Konzepte für Thermodynamik, hydraulische Verschaltung und messtechnische Umsetzung, sowie ein Konzept für die mobile Anwendbarkeit.

Es wurde am SPF ein Messstand mit dem speziell dafür konstruierten und selber gebauten Modulkollektor (Abb. 1) sowie mit einem kommerziellen Produkt aufgebaut. Damit sind die normalen Leistungskennzahlen bestimmt worden, allerdings nur in dem zulässigen Temperaturbereich für unser Wasser-Glykolgemisch. Damit wird in einem ersten Schritt die Eignung der bestehenden Anlagen überprüft. Die Resultate und entsprechende Erkenntnisse darüber werden in einer Studentenarbeit innerhalb der nächsten Monate noch weiter analysiert.

Parallel und aufbauend dazu wurden Konzepte für einen hydraulisch und messtechnisch mobilen Prüfstand erarbeitet. Dabei kann in einigen Bereichen auf bestehende Infrastruktur und Know-How aus dem bisherigen Prüfbetrieb zurückgegriffen werden (z.B. Software). Das Konzept wird in erster Linie für den Einsatz mit Öl erstellt unter Berücksichtigung der evaluierten Komponenten (inkl. Kosten). Dieser Messstand soll grundsätzlich als Plug-On für unsere Tracker eingesetzt werden können, aber auch mit realem Zusatzaufwand mobil betreibbar sein.

Bei den Evaluationen für den Prüfstand wurden der hydraulische Teil und der Tracker absolut getrennt betrachtet. Wenn der Stand als Plug-On auf dem SPF Prüffeld eingesetzt wird, soll in jedem Fall auf die bestehenden Tracker zurückgegriffen werden. Die aktuell mögliche Trackinggenauigkeit kann dazu noch in einem gewissen Rahmen verbessert werden. Wir gehen aber davon aus, dass dies in aller Regel für normale Kollektoren nicht ein Problem sein sollte. Natürlich können grundsätzlich auch auf dem Prüfdach des SPF die Tracker die vom Hersteller bereitgestellt werden verwendet werden.

Der hydraulische Teil der Anlage wird völlig autonom konzipiert, so dass er sowohl am SPF als auch an einem beliebigen anderen Ort eingesetzt werden könnte. In diesem Fall würde dann der zum Modul gehörende Tracker verwendet werden. Für die Hydraulik wurden zwei abweichende Konzepte durchgerechnet. Der Grundaufbau ist dabei der Selbe. Ein hydraulischer Kreislauf soll einstell- und regelbar Temperaturen bis zu 300°C liefern. Die Temperaturen am Ein- und am Austritt des Kollektors müssen gemessen werden. Es wird ein Kühlsystem benötigt um die Wärme abzuführen. Der Durchfluss muss genau regelbar sein und auch messtechnisch erfasst werden. Der Kreislauf muss einfach entleert und befüllt werden können. Dazu sind gewisse Sicherheitsmaßnahmen gegen Überhitzung, Überdruck, usw. notwendig. Grundsätzlich gehen wir davon aus, dass vom Prinzip her die bestehenden Prüfstände des SPF als Vorlage geeignet sind. Somit könnte ein grosser Teil der Regelung und Messdatenerfassung weitgehend kopiert werden. Als Rahmenbedingungen wurden Anlagen mit einer Leistung bis zu 10kW als obere Grenze angenommen. Mit diesen Größenordnungen und Randbedingungen könnten wir alle bisherigen Anfragen für Messungen abdecken. Die Anlage ist für den Einsatz von thermischen Ölen (Siltherm) konzipiert. Es sind im Wesentlichen zwei Optionen durchgespielt worden: Vollständiger Eigenbau oder Kauf einer weit vorgefertigten Anlage.

Das Konzept I (Eigenbau, Abb. 6) wäre für die Messung bei tieferen Temperaturen auf die bereits vorhandene SPF Kältemaschine angewiesen. Dieser WasserGlykol Kreislauf kann dazu eingesetzt werden bei tiefen Temperaturen sehr grosse Wärmemengen abzuführen. Bei hohen Temperaturen darf der Kreislauf nicht mehr verwendet werden. In diesem Bereich würde dann ein separater Luftkühler die Wärme abführen. Für eine mobile Anlage müsste der SPF Kühlkreislauf durch eine leistungsfähige lokale Kühlung (Wasser) ersetzt werden. Weiter Komponenten wie Pumpen und Ventile sind evaluiert worden und sind verfügbar.

Das zweite Konzept II (Abb. 7) ist vom hydraulischen Prinzip her identisch mit dem Eigenbau. Die ganze Konditionierung des Fluides würde aber durch ein kommerzielles System erledigt das die Firma Lauda anbietet. Dadurch wird die Anlage einfacher mobil und auch kompakter. Dieses Modul bietet auch schon die notwendigen Funktionen zum Entleeren und Befüllen der Anlage. Der Messteil der Anlage bleibt praktisch identisch und unverändert.

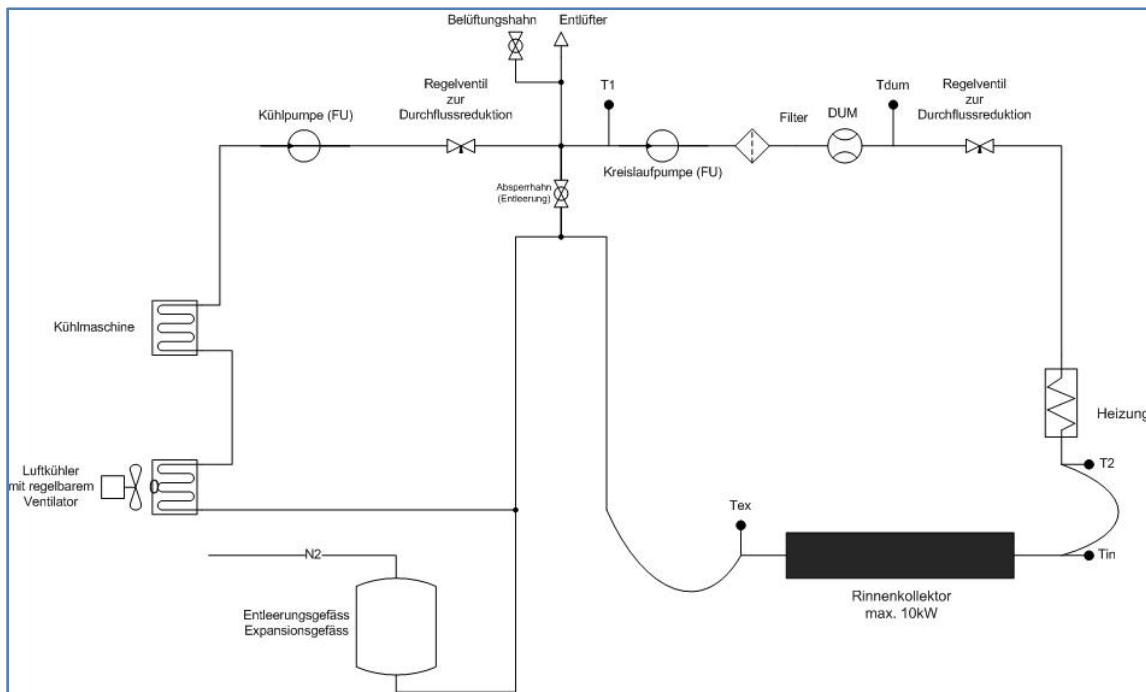


Abb 6. Hydraulisches Schema für eine mobile Testanlage. Eigenbau.

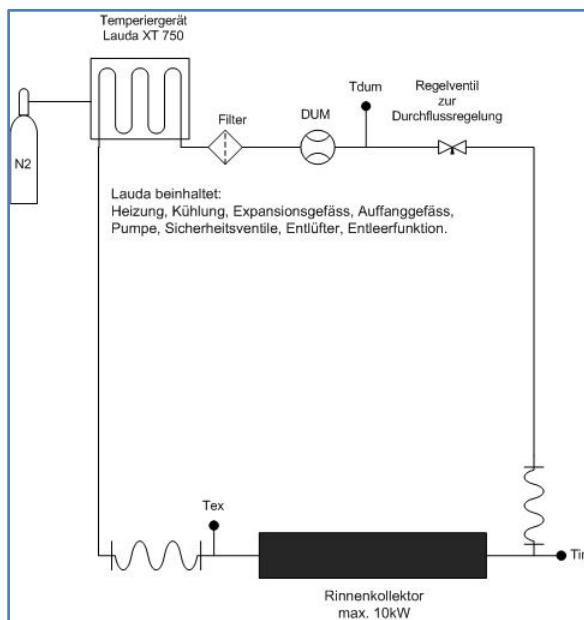


Abb 7. Hydraulisches Schema für eine mobile Testanlage. Das kommerzielle Gerät kann alle wesentlichen hydraulischen Funktionen abdecken. Der Messbereich ist davon unabhängig und wird für beide Konzepte gleich sein.

Die Kosten für die beiden Konzepte sind im Anhang B aufgestellt. Die Lösung II hat trotz Kauf der hydraulischen Anlage keine höheren Anschaffungskosten. Die Version „Eigenbau“ wird mit höheren Materialkosten und auch deutlich höheren Personalkosten im Endeffekt teurer. Die Kosten durch Personal sind schwerer abzuschätzen und aufgrund der allgemeinen Personalknappheit eher als Nachteil einzustufen. Ebenso wichtig ist der Zeitfaktor der deutlich für die kommerzielle Lösung spricht.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Der Rahmen für eine mobile Prüfanlage von solarthermischen Prozesswärmekollektoren konnte soweit möglich, abgesteckt werden. Es hat sich gezeigt, dass die grosse Bandbreite an verschiedenen Konzepten eine Schwierigkeit im Prüfbetrieb und bei der Konzeption der Messanlage ist.

Es konnten verschiedene Messungen mit den bestehenden Anlagen des SPF bereits durchgeführt werden. Die Erkenntnisse daraus sind enorm wichtig, auch wenn der Temperaturbereich noch nicht erweitert werden konnte. Die weitaus wichtigste Erkenntnis aus dem ganzen Projekt ist die, dass noch viel an Grundlagenwissen erarbeitet werden muss. Dies kann nur durch Messungen an realen Objekten geschehen.

Im Bereich der Normierung ist man etwas vorgeprescht und hat die Messung an konzentrierenden Kollektoren etwas unbesehen in den Geltungsbereich eingeschlossen. Das wird zur Folge haben, dass zwar mit Sicherheit auch Fehlmessungen passieren werden, andererseits hat es auch den Vorteil, dass viel schneller Erfahrungen gesammelt werden können.

Insgesamt rechnen wir noch mit verschiedenen unerwarteten Problemen die in einem realen Messbetrieb auftreten werden. Im Sinne einer vernünftigen Roadmap sollten deshalb unbedingt zuerst noch mehr Messungen an realen Objekten vorgesehen werden. Einerseits an Objekten wie sie bereits auf dem SPF Prüffeld vermessen wurden (z.B. Auftragsmessungen), andererseits aber auch an einer realen Anlage. Die Investitionen in die hochspezialisierte Prüfanlage sind relativ hoch und sollten darum noch besser durch Erfahrungen abgesichert werden.

Als nächster Schritt (2011), wäre darum die weitere Vermessung von Kollektoren und das Monitoring einer echten Anlage mit reduzierter Messinfrastruktur wichtig. Aufbauend auf diesen Erfahrungen und den Entwicklungen in anderen Prüflaboratorien, den Normen und im Markt, ist erst dann der Bau einer geeigneten Anlage sinnvoll (2012).

Anhang A: Vergleich Quasi Dynamische Methode und Steady State Methode

Die Norm EN12975 beinhaltet grundsätzlich zwei verschiedene Methoden zur Bestimmung der Leistungskennzahlen eines solarthermischen Kollektors. Das Resultat, bzw. die Parameter die bestimmt werden, sollten aber weitgehend die Selben sein, damit Simulationsprogramme auch die gleichen Inputs verwenden können:

- i) Parameter für die Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades
- ii) Parameter für die Abhängigkeit vom Einfallswinkel
- iii) Parameter für das zeitliche Verhalten (Zeitkonstante, Wärmekapazität)

Je nach Kollektortyp können weitere Parameter notwendig sein wie z.B. für den langwelligen Strahlungsaustausch oder die Windabhängigkeit. Mit der sogenannten „Steady State Methode“ werden diese drei Parametersätze in separaten Messungen bestimmt. Dazu wird der Kollektor jeweils in einen stabilen Betriebszustand versetzt und dann die entsprechende Messung durchgeführt. So wird zum Beispiel der Kollektor unter einem festen Einfallswinkel zur Sonne stabil (d.h. bei gleichbleibenden anderen Parameteren wie Temperatur oder Einstrahlung) betrieben und daraus dann die Winkelabhängigkeit bestimmt. Diese Messmethode erscheint verhältnismässig aufwändig, da bestimmte Wetterbedingungen notwendig sind um korrekte Resultate zu erhalten. Zusätzlich muss natürlich für die Bestimmung der Winkel faktoren ein Tracker zur Verfügung stehen der genügend genau auch unter festem Winkelversatz zur Sonne betrieben werden kann.

Im Gegensatz dazu steht die Quasidynamische Methode. Bei dieser Methode werden theoretisch alle Parameter in einer einzigen – wenn auch langen- Messsequenz bestimmt. Der Kollektor soll nicht der Sonne nachgeführt werden und auch die Anforderungen bezüglich den Wetterbedingungen sind deutlich tiefer gesetzt. Zur Analyse der Daten wird der thermische Output ($\partial_t Q/A$) mit einem einzigen Modell gefittet das alle möglichen Effekte gleichzeitig enthält:

$$\begin{aligned}\partial_t Q/A = & F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta b}(\theta, \Phi) G_b + F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta d} G_d \\ & - c_6 u G^* - c_1(t_m - t_a) - c_2(t_m - t_a)^2 - c_3 u(t_m - t_a) + c_4(E_L - \sigma T_a^4) - c_5 \partial_t t_m - \dots\end{aligned}$$

Die einzelnen Parameter sind in der Norm EN12975 beschrieben. Im mathematischen Sinne ist das Modell eine einfache Reihenentwicklung für alle möglichen Parameter. Die Idee ist auf den ersten Blick bestechend und scheint der Realität näher als die Steady State Methode. In der Realität gibt es aber verschiedene schwerwiegende Probleme wie zum Beispiel:

$K_{\theta b}(\theta, \Phi)$, ist eine Funktion für die Beschreibung der Winkelabhängigkeit. Diese Funktion ist zunächst unbekannt und müsste für jeden Kollektor zuerst bestimmt werden (z.B. Raytracing simulation). Aber auch wenn die Funktion aus einer Simulation bekannt wäre, so ist immer noch nicht sicher, ob der Kollektor auch so funktioniert wie berechnet (Bautoleranzen, Materialfehler). Das ist aber Voraussetzung für korrekte Resultate und im Endeffekt auch der Sinn einer Prüfung. Die Unsicherheit die mit dem Winkelfaktor einhergeht ist darum schwerwiegend, weil dieser sich aufgrund des Modells auch in die anderen wichtigen Parametern, insbesondere dem Wirkungsgrad $F'(\tau\alpha)_{en}$ fortsetzt.

Weiter müssen verschiedene Parameter in dem möglichen Messbereich als quasi-redundant angesehen werden. Das heisst der Fehler bei einem Parameter kann durch einen anderen Fehler bei einem anderen Parameter „ausgeglichen“ werden. Bekanntes Beispiel sind die beiden Parameter c_1 und c_2 die im betrachteten Messbereich oft stark korrelieren. Es ist klar, je mehr Parameter in einem Modell eingeführt werden, desto grösser wird die Wahrscheinlichkeit für solche Interferenzen. Es wird so immer schwieriger zuverlässig die einzelnen Parameter zu bestimmen

Die Methode ist natürlich verlockend weil ohne grossen Aufwand beliebige Erweiterungen eingeführt werden können. So könnte zum Beispiel das Modell einfach um einen Term erweitert werden, der (für einen konzentrierenden getrackten Kollektor) die Trackerungenaugkeit beschreibt:

$$\partial_t Q/A = (\text{obige Formel}) - k_1 \Delta(\theta, \Phi)$$

wobei $\Delta(\theta, \Phi)$ der gemessene Trackingfehler ist und k_1 dann der Parameter wäre der den Trackingfehler beschreibt. Mit Sicherheit wird man für k_1 einen Wert bestimmen können und der Fit der gesamten Messung wird mit Sicherheit besser werden. Der Faktor k_1 ist aber ebenso sicher nicht ganz unabhängig von der Funktion für die Winkelabhängigkeit $K_{\theta b}(\theta, \Phi)$. Damit hätte man eine neue Korrelation zwischen Parametern geschaffen die im Endeffekt die Sicherheit bezüglich der einzelnen Parameter eher reduziert als verbessert.

Die skizzierte quasi dynamische Methode kann in gewissen Fällen durchaus Anwendung finden. Der sorgfältige Umgang ist aber Voraussetzung. Allenfalls wird sich mit der Zeit eine Art kombinierte Methode daraus entwickeln bei der gewisse Messungen im Steady State Regime gemacht werden und diese Resultate dann als Grundlage für die dynamische Methode weiter verwendet werden. Gerade bei den Prozesswärmekollektoren ist die Vielfalt an technischen Konzepten noch gross und damit muss man wahrscheinlich auch bei der Wahl der Mess- und Analysemethode zuerst genügend Erfahrungen sammeln und auch unkonventionelle Ansätze zulassen.

Anhang B: Kostenabschätzung Prüfstand

B1 Kosten im Eigenbau

Messtechnik		Anzahl	Preis/Stk	Preis
Artikel				
Datenlogger Yokogawa Grundgerät		1	2700	2700
Datenlogger Pulsmodul		1	1600	1600
Datenlogger Universalmodul		1	2200	2200
Industriecomputer		1	1900	1900
Durchfluss Messgerät Hochtemperaturfähig (300C)		1	13000	13000
Temperaturfühler PT100		5	150	750
Wago Knoten mit I/O Modulen		1	2000	2000
Profibus Karte für PC zur Ansteuerung des Wago Knoten		1	1500	1500
Schaltschrank		1	700	700
Frequenzumrichter für Pumpe		2	600	1200
Diverses Elektroinstallationsmaterial		1	2000	2000
Pyranometer		1	5000	5000
Total Messtechnik				34550

Hydraulik		Anzahl	Preis/Stk	Preis
Artikel				
Ventile Hochtemperaturfähig		4	2500	10000
Silikonöl Siltherm 800 (1 Liter)		100	20	2000
Rohre/Leitungen Edelstahl (1m)		50	30	1500
Dämmmaterial Hochtemperatur		1	3000	3000
Aluprofile/Material für Messwagen mobil		1	3000	3000
Expansionsgefäß		1	2000	2000
Pumpe		2	13500	27000

Kältemaschine 10kW	1	25000	25000
Durchlauferhitzer 11kW bis max 350°C	1	22000	22000
N ₂ Flasche	1	2000	2000
Filter	1	500	500
Luftkühler	1	2000	2000
Entlüfter	1	500	500
Kompensatoren	15	700	10500
Sicherheitsbatterie und Auffanggefäß	1	5000	5000
Verschiedenes Kleinmaterial	1	10000	10000
Metallschlauch 300°C (1m)	20	600	12000
Total Hydraulik			138000
Total Anschaffungskosten Material			172550

Zusammenfassung			
Übertrag Anschaffung Materialkosten			173 kFr
Sicherheitszuschlag	+20%	35 kFr	35 kFr
Manpower, mit Einsatz von Studenten			120 kFr
Total			328 kFr

B2 Kosten wenn Hydraulik durch externes Gerät bereitgestellt wird.

Messtechnik			
Artikel	Anzahl	Preis/Stk	Preis
Datenlogger Yokogawa Grundgerät	1	2700	2700
Datenlogger Pulsmodul	1	1600	1600
Datenlogger Universalmodul	1	2200	2200
Industriecomputer	1	1900	1900
Durchfluss Messgerät Hochtemperaturfähig (300C)	1	13000	13000
Temperaturfühler PT100	5	150	750
Wago Knoten mit I/O Modulen	1	2000	2000
Profibus Karte für PC zur Ansteuerung des Wago Knoten	1	1500	1500
Schaltschrank	1	700	700
Diverses Elektroinstallationsmaterial	1	2000	2000
Pyranometer	1	5000	5000
Total Messtechnik			33350

Hydraulik				
Artikel		Anzahl	Preis/Stk	Preis
Durchflussregelventil		1	3000	3000
Lauda KH350W		1	100000	100000
N2 Flasche		1	2000	2000
Verschiedenes Kleinmaterial		1	10000	10000
Metallschlauch 300°C (1m)		20	300	6000
Total Hydraulik				121000
Total Anschaffungskosten Material				154350

Zusammenfassung			
Übertrag Anschaffung Materialkosten			154 kFr
Sicherheitszuschlag	+20%	31 kFr	31 kFr
Manpower, mit Einsatz von Studenten			80 kFr
Total			265 kFr

B3 Zusammenfassung

Bei beiden Entwürfen wird davon ausgegangen, dass ein Teil der SPF Infrastruktur benutzt werden kann (z.B. Pyrheliometer, Steuer- und Auswertungssoftware, sowie Werkzeug und Anlagen). Ebenso sind in jedem Fall Studenten als kostenneutrale Arbeitskräfte notwendig.

Die effektiven Kosten für ein mobiles System im Eigenbau liegen also im Bereich von etwa 330kFr. Durch den Einsatz des kommerziellen hydraulischen Systems können deutlich Kosten eingespart werden. Für ein Forschungsinstitut ist damit natürlich der Nachteil verbunden, dass man nicht über alle Funktionen die volle Kontrolle hat und bei gewünschten Erweiterungen oft nur noch wenige Optionen hat. Für die Aufnahme eines Prüfbetriebes ist es aber mit Sicherheit die schnellere und eindeutig zielführendere Option.

Die Unterlagen und Offerten zu den einzelnen Komponenten sind am SPF abgelegt. Für einzelne Komponenten oder Baugruppen sind die Preise konservative Schätzungen. Die Offerten gelten meistens bis etwa im ersten Quartal 2011. Wird der Bau der Anlage für 2012 oder später geplant, muss die entsprechende Kostensteigerung durch Teuerung und steigende Materialkosten berücksichtigt werden.