

PSE AG

Fresnel-Kollektor zur Dampferzeugung für industrielle Prozesswärme

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ 26868 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Bericht erstellt von

Michael Berger
Christian Zahler
Frank Luginsland
Dr. Andreas Häberle

Freiburg, Juli 2011

Bezug des Berichts und weitergehende Informationen:

PSE AG
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	26868	Referat	24/2	Fördersumme	125.000,00 €
Antragstitel		Fresnel-Kollektor zur Dampferzeugung für industrielle Prozesswärme			
Stichworte		Regenerativ, Solarthermie, Industrielle Prozesswärme, Solare Dampferzeugung			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
22 Monate	10.07.2008	10.05.2010			
Abschlussbericht					
Bewilligungsempfänger	PSE AG Emmy-Noether-Str. 2 79110 Freiburg			Tel	(07 61) 4 79 14-0
				Fax	-44
				Projektleitung	Michael Berger
			Bearbeiter		
Kooperationspartner	Christian Reetz, Hügelheimer Weg 25, 79114 Freiburg Fraunhofer ISE, Heidenhofstr. 2, D-79110 Freiburg				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ziel dieses Projekts war es, solare Direktverdampfung in einem linearen Fresnel-Kollektor bei niedrigen Drücken für Prozessdampfanwendungen zu testen, ggf. notwendige Systemkomponenten zu identifizieren und Regelstrategien zu entwickeln. Die bisher verwirklichten Prozesswärmekollektoren der PSE AG wurden allesamt zur Druckwassererwärmung genutzt. Viele Prozesswärmesysteme in der Industrie verwenden jedoch Dampfnetze zur Verteilung der Wärme von einem zentralen Kessel an die einzelnen Prozessschritte. Die Möglichkeit solar erzeugten Dampf in ein Dampfnetz einzuspeisen erweitert daher nicht nur die Zahl möglicher industrieller Prozesswärmeanwendungen für den Fresnelkollektor, sondern senkt gleichzeitig die Investitionshürden für die Nachrüstung bereits bestehender Prozessdampfanlagen mit Solarkollektoren.

Zusätzlich sollte in diesem Projekt die Kollektortechnologie weiterentwickelt werden. So sollte für die Produktion eine Qualitätskontrolle entwickelt werden sowie die Spiegelnachführung sowohl im Antrieb als auch in der Sensorik verbessert werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Laufe des Projekts wurde zunächst im Rahmen einer Diplomarbeit die Auslegung einer Testanlage zur solaren Direktverdampfung vorgenommen und mögliche Betriebspunkte einer solchen Anlage berechnet. Notwendige Systemkomponenten (Dampfabscheider, Teilentleerung, Überströmventil, Dampfmassenstrommessung, Verdränger im Absorberrohr, kontinuierliche Einspeisung) wurden identifiziert.

Auf Grundlage der daran anschließenden Detailauslegung wurde eine Demoanlage mit einem linearen Fresnelkollektor (Aperturfläche 132m²), die sowohl für Direktverdampfung als auch zur Druckwassererwärmung genutzt werden kann, in Freiburg-Hochdorf geplant und aufgebaut.

Nach Fertigstellung wurden Tests bei unterschiedlichen Betriebsdrücken bzw. -temperaturen durchgeführt und die Ergebnisse interpretiert.

(Forts.) Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Für die Qualitätskontrolle in der Produktion der Primärspiegel wurde ein Prüfstand entwickelt und erfolgreich in der Produktion zweier Kollektoren zur stichprobenhaften Qualitätskontrolle eingesetzt. Solarsensoren wurden zur Überprüfung der Wärmebelastung mit Temperatursensoren ausgestattet und damit im Betrieb dauerhaft überwacht. Gleichzeitig wurde mit Lichtwellenleitern ein alternatives Sensorkonzept zur Kalibrierung der Antriebe eingebaut.

Zur Verbesserung des Antriebskonzepts wurde ein Antrieb mit integrierter Neigungsmessung im Betrieb getestet. Die Winkelmessung wurde auf CAN-Bus umgestellt.

Ergebnisse und Diskussion

Die Auslegung der Anlage, die Berechnung der Betriebspunkte sowie die Identifizierung und Detailauslegung der notwendigen Systemkomponenten konnte im Frühjahr 2009 abgeschlossen werden. Neben einer Dampftrommel mit integriertem Lamellenabscheider und einem Verdränger im Absorberrohr zur Vermeidung kritischer Schichtströmungen wurden ein Überströmventil zur Einstellung des Betriebsdrucks, ein Magnetventil zur Teilentleerung der Trommel bei einsetzender Verdampfung, ein Messgerät zur Messung des Dampfmassenstroms, eine Speisepumpe, die mittels FU bei kleinen Volumenströmen und großen Druckdifferenzen regelbar ist, sowie zusätzliche Temperatur- und Drucksensoren benötigt.

Nach Verzögerungen in der Planung, die insbesondere durch den Ausstieg des Kooperationspartners IMTECH verursacht worden war, wurde der Bau der Anlage im Frühjahr und Sommer 2009 vorgenommen, so dass der erste solar erzeugte Dampf im Oktober 2009 gesehen werden konnte. Messungen bei unterschiedlichen Betriebsdrücken wurden seither durchgeführt.

Die Solarsensoren, die zur Kalibrierung der Antriebe eingesetzt werden, wurden mit Temperatursensoren ausgestattet, so dass die Temperaturbelastung bei konzentrierter Bestrahlung im Betrieb nachvollzogen werden kann. Gleichzeitig kamen erstmals Lichtwellenleiter als alternatives Sensorkonzept zum Einsatz. Im Antrieb wurde ein Antrieb mit integrierter Winkelmessung getestet und die bisherigen Potentiometer auf CAN-Bus umgestellt.

Die Qualität bei der Produktion der Primärspiegel ist entscheidend für die Effizienz des linearen Fresnel-Kollektors. Zur Bestimmung der Qualität wurde ein Prüfstand aufgebaut und die Software zur Auswertung der Messung entwickelt. Dieser Prüfstand wurde 2009 bei der Produktion zweier Kollektoren stichprobenhaft eingesetzt.

Fazit

Mit der Direktverdampfung als Alternative zu Druckwasser und Thermoöl steigt für den Fresnel Prozesswärmekollektor die Zahl möglicher Anwendungen und damit auch Kunden. Da die Auslegung und Regelung eines solaren Systems zur Direktverdampfung jedoch ungleich komplexer und im Druckbereich unter 30 bar kaum erforscht ist, war es notwendig, eine Demoanlage zu bauen und daran Tests durchzuführen.

In diesem Projekt konnten erste wertvolle Erfahrungen im Betrieb mit Direktverdampfung bei niedrigen Drücken gesammelt werden. Auch in den Bereichen Antrieb, Sensorik und Produktion konnten deutliche Fortschritte erzielt werden.

Inhalt

1	Verzeichnis von Bildern und Tabellen	7
2	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	9
3	Zusammenfassung	10
4	Einleitung	13
4.1	Ausgangssituation	13
4.2	Potenzial	15
4.3	Projektziel Direktverdampfung	16
4.4	Weitere Projektziele	17
5	Darstellung der Arbeitsschritte und Ergebnisse	18
5.1	AP1 Spielfreie Montagevorrichtung	18
5.1.1	Anforderungsliste	18
5.1.2	Grundaspekte der technischen Funktion	19
5.1.3	Geometrische Betrachtungen – erlaubte Toleranzen	21
5.1.4	Markt	22
5.1.5	Funktionsstruktur	22
5.1.6	Wirkprinzipien	24
5.1.7	Prinzipkombinationen	26
5.1.8	Konzeptphase	27
5.1.9	Bewertung der Konzepte	27
5.2	AP2 Inline Qualitätskontrolle	28
5.2.1	Beschreibung des Prüfstands	28
5.2.2	Vorbereitung	29
5.2.3	Messmethode	29
5.2.4	Vermeidung systematischer Messfehler	30
5.2.5	Korrektur systematischer Messfehler	31
5.2.6	Stichproben	32
5.2.7	Auswertung	32
5.2.8	Interpretation	32
5.3	AP3 Solarsensoren	34
5.4	AP4 Optimierung der Steuerung	37
5.4.1	Testaufbau zur Winkelauflösung und Wiederholgenauigkeit	37
5.4.2	Auswertung	40
5.4.3	Fazit	43
5.4.4	Feldtest	44
5.5	AP5 Direktverdampfung	45

5.5.1	Systemkonzept	45
5.5.2	Auslegung	48
5.5.3	Aufbau	55
5.5.4	Betriebserfahrungen und Messergebnisse	56
6	Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung	61
7	Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung	62
7.1	Marktpotenzial von Prozessdampf als häufige Form industrieller Prozesswärme	62
7.2	Ökologische Verbesserung laufender industrieller Prozesse	63
8	Verbreitung der Vorhabensergebnisse	64
9	Fazit	65
10	Literaturverzeichnis	66

1 Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1: Prinzip des Fresnelkollektors	13
Abbildung 2: Prototypen des Prozesswärmekollektors, die im Rahmen des vergangenen DBU-Fördervorhabens (Az 23951) realisiert wurden	14
Abbildung 3: Konzeptskizze Direktverdampfung und Dampfeinspeisung in ein bestehendes Dampfnetz	16
Abbildung 4: Muster	21
Abbildung 5: Beispiel eines Ergebnisses der Marktrecherche: Centaflex-Kupplung	22
Abbildung 6: Funktionsstruktur der Hauptfunktionen	23
Abbildung 7: Verbindungsoption direkt	23
Abbildung 8: Verbindung zweier Wellen mittels Verbindungselement, welches Zusatzfunktionen wie Lagerung übernehmen kann.	23
Abbildung 9: Verbindungsoption mit zwei Zwischenbauteilen (Verbinder 1 und Verbinder 2)	23
Abbildung 10: Verbindungsstück mit 3 oder mehreren Zwischenbauteilen	24
Abbildung 11: Prüfstand zum Messen der Fertigungsqualität	29
Abbildung 12: Lichtwellenleitersystem, bestehend aus Linsenkopf, Lichtwellenleiter, Messumformer und Spannungsversorgung	34
Abbildung 13: Signale an den Positionen 1 und 2 im Vergleich, untergrundbereinigt	35
Abbildung 14: Signale an den Positionen 3 und 4 im Vergleich, untergrundbereinigt	35
Abbildung 15: Wiederholgenauigkeit beim Ansteuern der Winkelposition „1000 Ticks“, links mit der Dunker- und rechts mit der Seefrid-Steuerung	41
Abbildung 16: Wiederholgenauigkeit bei „6970 Ticks“, links mit Dunker- und rechts mit Seefrid-Steuerung, wobei unterschieden wird, aus welcher Richtung die Position angefahren wird.	41
Abbildung 17: Interne Abweichung der angesteuerten von den erreichten Positionen in Ticks, wobei unterschieden wird, aus welcher Richtung die Position angefahren wird.	42
Abbildung 18: Abweichungen von der Linearität	43
Abbildung 19: Konzept für ein System mit kontinuierlicher Einspeisung, Grafik aus [Alk08]	46
Abbildung 20: Verdampfungsbeginn in Abhängigkeit vom Trommelvolumen bei unterschiedlichen Betriebsdrücken und Jahreszeiten	47
Abbildung 21: berechnete Dampfproduktion mit einer 100l-Trommel in Hochdorf bei verschiedenen Drücken mit Kondensat- oder Frischwassereinspeisung	47
Abbildung 22: gesamte über einen Tag produzierbare Dampfmenge bei unterschiedlichen Drücken und Jahreszeiten	48
Abbildung 23: Zylindrischer Verdränger, die kleinen Kreise links und rechts unten sind Abstandshalter, bzw. Füße, Grafik aus [Lou09].	50
Abbildung 24: Dampftrommel (links) mit Lamellenabscheider (rechts).	52
Abbildung 25: Dampftrommel auf Gestell in 3 m Höhe.	54

Abbildung 26: Anlagenschema der Demonstrations-anlage zur Direktverdampfung in Freiburg-Hochdorf	55
Abbildung 27: Dampfparameter bei Dampferzeu-gung am 19.10.2009.	56
Abbildung 28: Temperaturen im System bei Dampferzeugung am 19.10.2009.	56

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_{\perp}	projizierter Sonnenstandswinkel Transversalwinkel	°
θ_{\parallel}	projizierter Sonnenstandswinkel Longitudinalwinkel	°
$\eta(\theta_{\perp}, \theta_{\parallel})$	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
$\text{IAM}(\theta_{\perp}, \theta_{\parallel})$	Einstrahlwinkelkorrekturfaktor	-
$\text{IAM}_{\perp}(\theta_{\perp})$	transversaler IAM	-
$\text{IAM}_{\parallel}(\theta_{\parallel})$	longitudinaler IAM	-
$I_{\text{Sun}}(r)$	Winkelverteilung des direkten Sonnenlichts, Sunshape	-

3 Zusammenfassung

Mit der Direktverdampfung als Alternative zur Verwendung der Wärmeträger Druckwasser und Thermoöl steigt für den Fresnel Prozesswärmekollektor die Zahl möglicher Anwendungen und damit auch Kunden. Da die Auslegung und Regelung eines Systems zur Direktverdampfung jedoch ungleich komplexer und im Druckbereich unter 30 bar kaum erforscht ist, war es notwendig, eine Demoanlage zu bauen und daran Tests durchzuführen.

Die Auslegung der Anlage, die Berechnung der Betriebspunkte sowie die Identifizierung und Detailauslegung der notwendigen Systemkomponenten konnte im Frühjahr 2009 abgeschlossen werden. Neben einer Dampftrommel mit integriertem Lamellenabscheider und einem Verdränger im Absorberrohr zur Vermeidung kritischer Schichtströmungen wurden ein Überströmventil zur Einstellung des Betriebsdrucks, ein Magnetventil zur Teilentleerung der Trommel bei einsetzender Verdampfung, ein Messgerät zur Messung des Dampfmassenstroms, eine Speisepumpe, die mittels FU bei kleinen Volumenströmen und großen Druckdifferenzen regelbar ist, sowie zusätzliche Temperatur- und Drucksensoren benötigt.

Nach Verzögerungen in der Planung, die insbesondere durch den Ausstieg des Kooperationspartners IMTECH verursacht worden war, wurde der Bau der Anlage im Frühjahr und Sommer 2009 vorgenommen, so dass zum ersten Mal im Oktober 2009 Dampf mit der Sonne erzeugt werden konnte. Messungen bei unterschiedlichen Betriebsdrücken wurden seither durchgeführt.

Die Hauptschwierigkeit im Betrieb wird bei der Regelung des Füllstands in der Dampftrommel gesehen. Um einen Druckabfall oder gar einen Unterdruck zu vermeiden, muss die Trommel bei längeren Unterbrechungen des Betriebs oder beim Abfahren der Anlage zügig befüllt werden. Während des Betriebs ist durch eine kontinuierliche Einspeisung dafür zu sorgen, dass die Trommel nicht leer läuft. Hierfür muss in der Trommel der Füllstand oder der ausgehende Dampfmassestrom, der Druck und die Temperatur gemessen werden. An die Einspeisung stellt sich zum einen die Anforderung, auch bei kleinen Volumenströmen genau regelbar zu sein, sowie zum anderen die Trommel bei Abfahren des Verdampfungsbetriebs, wie etwa bei einem Wetterumschwung oder bei Sonnenuntergang, mit hohem Volumenstrom schnell befüllen zu können. Für diese Regelung wird andererseits auch Sensorik benötigt.

Es hat sich im Betrieb die Vermutung bestätigt, dass Direktverdampfung bei höheren Drücken und Temperaturen leichter zu beherrschen ist. So setzte

bei Drücken unterhalb von 3 bar zum einen Kavitation in der Umwälzpumpe ein, zum anderen, bedingt durch die niedrigere Dampfdichte und die daraus resultierende erhöhte Dampfgeschwindigkeit, muss die Regelung dynamischer reagieren. Diese Probleme sind zwar lösbar, erfordern aber zusätzlichen technischen Aufwand, der in diesem Projekt nicht zu verwirklichen war. Zudem sind derart niedrige Dampfdrücke unter 3 bar für reale Anwendungen in der Industrie kaum relevant.

Die Solarsensoren, die zur Kalibrierung der Antriebe eingesetzt werden, wurden mit Temperatursensoren ausgestattet, so dass die Temperaturbelastung bei konzentrierter Bestrahlung im Betrieb nachvollzogen werden kann. Gleichzeitig kam erstmals ein auf Lichtwellenleitern basierendes System als alternatives Sensorkonzept für die Kalibrierung der Primärspiegel zum Einsatz. Dieser Ansatz birgt den Vorteil, dass keinerlei aktive elektronische Komponenten am thermisch stark belasteten Receivergehäuse verbaut werden müssen, wodurch die Zuverlässigkeit und Wartungsfreundlichkeit der Anlage verbessert werden kann. Beim Antrieb der Primärspiegel wurde ein Elektromotor mit integrierter Winkelmessung getestet und die Drehwinkelerfassung mit den augenblicklich verwendeten Sensoren wurde auf CAN-Bus umgestellt. Durch diese Maßnahmen wird sowohl die Kommunikation zwischen zentraler Kollektorsteuerung und Aktoren / Sensoren stark verringert als auch die Verkabelung um bis zu 90% reduziert.

Die Qualität bei der Produktion der Primärspiegel ist entscheidend für die Effizienz des linearen Fresnel-Kollektors. Zur Bestimmung der Qualität wurde ein Prüfstand aufgebaut und die Software zur Auswertung der Messung entwickelt. Dieser Prüfstand wurde 2009 bei der Produktion zweier Kollektoren erstmals eingesetzt.

In diesem Projekt konnten erste wertvolle Erfahrungen im Betrieb mit Direktverdampfung bei niedrigen Drücken gesammelt werden. Auch in den Bereichen Antrieb, Sensorik und Produktion konnten Fortschritte erzielt werden. Die wesentlichen Ziele des Vorhabens wurden damit verwirklicht, auch wenn im Detail umgewichtet werden musste.

Als nächste Schritte sind Weiterentwicklungen im Bereich der Primärspiegelkonstruktion und -produktion geplant, die in diesem Projekt wegen gestiegener Kosten für die Verdampfungsanlage noch nicht verwirklicht wurden. Weiterhin ist die Entwicklung eines Reinigungskonzepts für das Primärspiegelfeld notwendig sowie die Entwicklung einer Montageerleichterung für den Receiver.

Kooperationspartner war in diesem Entwicklungsprojekt Christian Reetz RIAP. Das Vorhaben wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem AZ 26868 gefördert.

4 Einleitung

4.1 Ausgangssituation

Für Prozesswärmeanwendungen im Niedertemperaturbereich können herkömmliche solarthermische Flach- und Röhrenkollektoren verwendet werden, jedoch sind diese Kollektoren sehr klein und auf relativ niedrige Betriebstemperaturen begrenzt. Für höhere Temperaturen werden konzentrierender Kollektoren wie der lineare Fresnel-Kollektor benötigt, welche Prozesswärme bei Temperaturen über 150 °C dank der geringeren Wärmeverluste sogar spezifisch günstiger als herkömmliche solarthermischen Kollektoren bereitstellen können.

Der lineare Fresnel-Kollektor mit mehreren einachsigen nachgeführten Primärspiegelstreifen, die das Sonnenlicht auf ein Absorberrohr reflektieren, ist wie auch die Parabolrinne ein linienfokussierendes System.

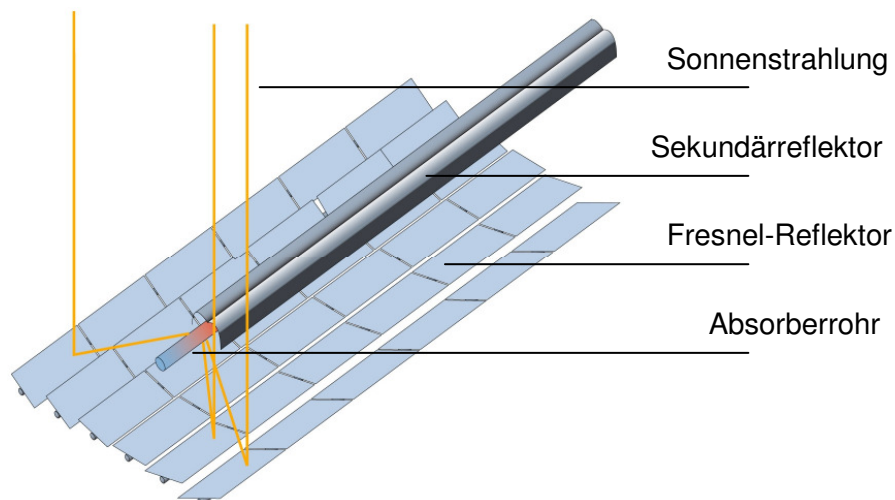


Abbildung 1: Prinzip des Fresnelkollektors

Die Vorteile dieses Kollektortyps sind:

- Betriebstemperatur bis 400 °C durch Konzentration
- Einfache Aufdachmontage durch sehr gute Gewichtsverteilung und geringe Windlast
- Präzise automatische Leistungs- und Temperaturregelung - keine Stillstands- oder Überhitzungsproblematik

- Installation nahe bei der Prozesswärmeanwendung auf dem Dach einer Produktionshalle
- Hoher Flächennutzungsgrad
- Der Kollektor muss nicht in Nord-Süd oder Ost-West-Richtung ausgerichtet werden
- Remote-Kontrolle und Monitoring über LAN oder Internet
- Alle Anlagen standardmäßig mit hochwertigen Features ausgestattet. Dies garantiert einen verlässlichen Betrieb, maximalen Ertrag und damit höchste Wirtschaftlichkeit.
- Stationärer Receiver
- Keine plastisch geformten Spiegel nötig, Nutzung von Flachglas möglich

Im Rahmen eines vorangegangenen DBU-Fördervorhabens (AZ 23951) entwickelten wir einen im Vergleich zu solarthermischen Kraftwerken kleinen linear konzentrierenden Fresnel-Kollektor für Prozesswärmeanwendungen. Neben den beiden im Rahmen dieses Fördervorhabens realisierten Prototypen (siehe Abbildung 2) wurden in der Zwischenzeit zwei weitere Anlagen zur solaren Klimatisierung umgesetzt (11/2007: 352m² in Sevilla / Spanien, 3/2008: 88m² in Grombalia / Tunesien). Sowohl das Interesse an der Technologie als auch das Marktpotential sind enorm, jedoch ist die Weiterentwicklung dieser Kollektortechnologie erforderlich um die Kosten weiter zu senken und kürzere Amortisationszeiten darstellen zu können.

Abbildung 2:
Prototypen des
Prozesswärmekollektors, die im
Rahmen des
vergangenen DBU-
Fördervorhabens
(Az 23951) realisiert
wurden



Um diese vielversprechende Kollektortechnologie zu kommerzialisieren hat die PSE AG diesen Geschäftsbereich Anfang des Jahres 2009 an die neugegründete Tochterfirma Industrial Solar GmbH ausgelagert, welche zwei weitere Projekte während der letzten 12 Monate realisiert hat - ein Kollektor mit 132m² Aperturfläche in Masdar City / Abu Dhabi und ein weiterer Kollektor mit 1408 m² Aperturfläche in Katar, für die solare Kühlung

eines kleinen Fußballstadions im Rahmen der erfolgreichen Bewerbung von Katar für die Fußball-WM 2022.

Da dieses Projekt zur solaren Direktverdampfung jedoch bereits vorher beantragt wurde, und da vertraglich festgelegt wurde, dass bereits begonnene Projekte nicht an Industrial Solar übertragen werden, sondern von der PSE AG abgeschlossen werden, wurden diese Arbeiten bei der PSE AG durchgeführt.

4.2 Potenzial

Die solare Erzeugung industrieller Prozesswärme stellt einen riesigen unerschlossenen Markt dar, welcher zwischenzeitlich auch als „schlafender Riese“ bezeichnet wird. Aus einer Studie des IEA SHC Task 33 »Solar Heat for Industrial Processes« geht hervor, dass ca. 28 % des Endenergieverbrauchs in den EU25-Ländern auf die Industrie fällt, wovon zwei Drittel als Prozesswärme benötigt werden. Davon wiederum ein Drittel wird bei Temperaturen unterhalb von 200 °C benötigt, also Temperaturen, die mit thermischen Solarkollektoren erreicht werden können. Das Potential für solare Prozesswärme in der Industrie wird in derselben Studie für die EU25-Länder mit einer Leistung von 100-125 GW_{th} bzw. mit einer Kollektorfläche von 140-180 Mio m² beziffert. Zielmarkt dieser Technologie sind neben Südeuropa generell die Regionen im Sonnengürtel der Erde, wie z.B. auch Nordafrika und der Mittlere Osten.

Häufig wird für Prozesswärme in diesem sogenannten Mitteltemperaturbereich jedoch Dampf als Wärmeträger verwendet. Zu den vielen Industriezweigen, in denen Prozessdampf verwendet wird, zählen die Papier-, Textil oder Lebensmittelindustrie. Ebenfalls benötigt wird Prozessdampf in Krankenhäusern, Wäschereien und in der chemischen Industrie. Derzeit wird diese Prozesswärme überwiegend - zu rapide steigenden Kosten - mit Gas und Öl in Boilern erzeugt.

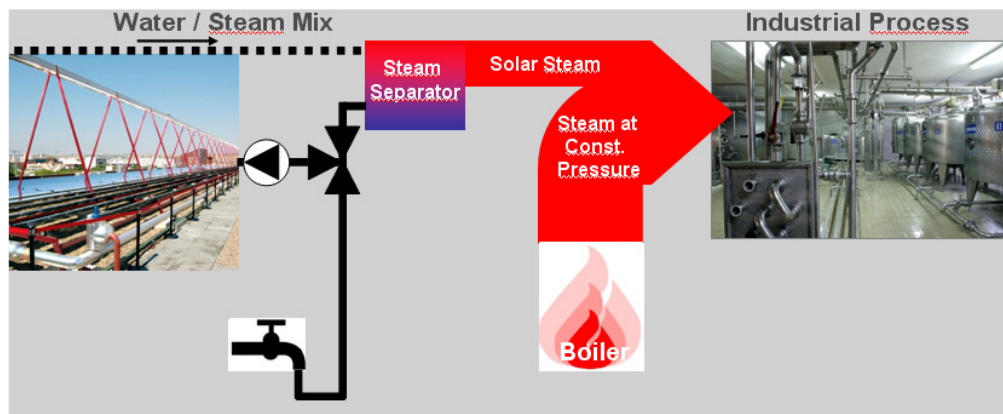
Solche Prozessdampfanwendungen benötigen in der Regel Dampf im Gegensatz zu Dampfturbinen in Kraftwerken bei Drücken deutlich unter 30 bar. Die Direktverdampfung in Solarkollektoren bei solch vergleichsweise niedrigen Betriebsdrücken stellt eine zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht bearbeitete Aufgabenstellung an die Entwicklung von Regelstrategien und Systemkomponenten dar.

Als vielversprechendes Konzept für die solare Prozessdampferzeugung erscheint die Einspeisung in ein bestehendes Dampfnetz zur Reduktion des Heizmittelbedarfs. Hierbei kann das vorhandene System nahezu unmodifiziert weiterverwendet werden, was die Investitionskosten minimiert.

Weiterhin ist es auch problemlos möglich, den solaren Anteil nachträglich weiter zu erhöhen, indem weitere Kollektorstrecken hinzugebaut werden.

Bei der Direktverdampfung wird der Kollektor mit Druckwasser auf dem Druckniveau des Dampfnetzes betrieben. Das Wasser wird bei der gewünschten Temperatur im Kollektor teilweise verdampft und der Dampf in einem Abscheider von der flüssigen Phase getrennt. Während das flüssige Wasser aus dem Abscheider zurück in den Kollektorkreislauf geleitet wird, wird der Dampf in das Dampfnetz eingespeist und der industriellen Verwendung zugeführt. Der dadurch dem Kollektorkreislauf entnommene Massenstrom wird je nach Anwendung durch Frischwasser oder aber durch Kondensat aus dem industriellen Prozess nachgespeist.

Abbildung 3:
Konzeptskizze
Direktverdampfung
und
Dampfeinspeisung
in ein bestehendes
Dampfnetz



4.3 Projektziel Direktverdampfung

Vorrangiges Ziel dieses Projekts war es, einen linearen Fresnel-Kollektor der PSE AG / Industrial Solar GmbH in Direktverdampfung zu betreiben, für die Direktverdampfung notwendige zusätzliche Systemkomponenten zu identifizieren und auszulegen, sowie aus dem Testbetrieb für diese Betriebsvariante Regelstrategien zu erlernen.

Da theoretische Modelle für die Direktverdampfung aus der Literatur bei Betriebsdrücken unter 30 bar ihre Gültigkeit verlieren und die Vorhersagen dieser Modelle bei Anpassung an diese Drücke sehr stark voneinander abweichen, waren keine genauen Vorhersagen für Druckverlust, Wärmeübergänge und Temperaturgradienten im Absorberrohrquerschnitt bei Direktverdampfung möglich.

Hierfür wurde ein Fresnel-Kollektor mit 132 m² Aperturfläche in Freiburg-Hochdorf aufgebaut. Die Anlage wurde mit zusätzlichen Sensoren und Systemkomponenten für den Verdampfungsbetrieb ausgestattet und kann

außer dem Betrieb im Druckwasserumlauf auch zur Direktverdampfung eingesetzt werden.

Aus der Simulation der Verdampfung im Absorberrohr ging hervor, dass Schichtströmungen wegen zu hoher Temperaturgradienten im Rohrquerschnitt als kritisch erachtet und vermieden werden müssen. Hierfür wurde ein Verdränger im Absorberrohr vorgesehen. Weiterhin wurden Schwall- und Pfropfenströmungen als heikel aber nicht kritisch eingestuft. Deren Auftreten und Auswirkungen sollten im Betrieb beobachtet werden.

Da bei Direktverdampfung am Ausgang des Kollektors ein Zweiphasengemisch aus Dampf und flüssigem Wasser vorliegt und das gewünschte Produkt nur der Dampf ist, muss dieser von der flüssigen Phase getrennt werden.

Zusätzliche Systemkomponenten wurden daher zur Trennung von Dampf und flüssigem Wasser benötigt, sowie zur Nachspeisung von Wasser in den Kollektorkreislauf zur Kompensation des abgetrennten Dampfmassestroms. Zur Regelung der Einspeisung musste der Dampfmassestrom gemessen werden. Eine hohe Dampfqualität bzw. niedrige Restfeuchte sowie eine möglichst kontinuierliche Dampfabgabe sind hierbei Anforderungen, die für die Einspeisung solar erzeugten Prozessdampfes in das Dampfnetz eines Kunden zu erreichen gilt.

Damit diese Komponenten richtig ausgewählt und dimensioniert werden konnten, war es im Vorfeld zunächst notwendig durch Simulationen und Berechnungen die Betriebsparameter für Umwälzung, Dampfabscheidung und Frischwassereinspeisung einzugrenzen. Da die für Simulationen zur Verfügung stehenden Modelle jedoch wie zuvor erwähnt in diesem Druckbereich nicht mehr gültig sind, konnte die Eingrenzung nur auf Grundlage von Ertragsberechnungen und Leistungsbetrachtungen durchgeführt werden.

4.4 Weitere Projektziele

Zusätzlich sollte in diesem Projekt die Sensorik überarbeitet und die Steuerung der Spiegelnachführung optimiert werden. Für die Primärspiegel sollte eine formschlüssige Verbindung zusammen mit einer spielfreien Montagevorrichtung entwickelt und getestet werden. Eine Inline-Qualitätskontrolle zur Messung der Qualität der Primärspiegel sollte entwickelt, aufgebaut und in die Fertigungsstrecke integriert werden. Mit diesen Maßnahmen lassen sich die optischen Abbildungseigenschaften der Fresnel-Spiegel kontrollieren und verbessern, wodurch wiederum der spezifische Ertrag gesteigert werden kann.

5 Darstellung der Arbeitsschritte und Ergebnisse

5.1 AP1 Spielfreie Montagevorrichtung

Das Ausrichten der Spiegel nach dem Einhängen bei der Montage ist beim bisherigen Kupplungskonzept nicht nur zeitaufwändig sondern auch anfällig für Ungenauigkeiten bzw. Montagefehler, die sich negativ auf den Wirkungsgrad des Kollektors auswirken können. Eine formschlüssige Verbindung der Primärspiegel einer Reihe untereinander vereinfacht daher die Montage und verringert die Anfälligkeit für Montagefehler. Der Formschluss erfordert jedoch eine deutlich verbesserte Qualität in der Fertigung der Primärspiegel, da Ungenauigkeiten nicht mehr ausgeglichen werden können.

Zunächst wurde nach VDI 2222 eine Anforderungsliste erstellt und die technische Funktion analysiert.

5.1.1 Anforderungsliste

Hauptmerkmal	Forderung
Geometrie	<p>möglichst geringer Platzbedarf zwischen zwei Spiegeln, möglichst leicht, möglichst wenig Verschattung der Spiegel</p> <p>Genauigkeit der Ausrichtung zweier Spiegelwellen zueinander $0,1^\circ$ (bei einer Welle eines Durchmessers von 40 mm entspricht das einer Verschiebung am Umfang von max. ca. 0,007 mm)</p> <p>Genauigkeit der Montageform $0,01^\circ$ wegen dem sich fortpflanzenden systematischen Fehler bei der Kopplung mehrerer Spiegelmodule hintereinander</p> <p>axiale Toleranz zweier Wellen zueinander bis max. 2 mm</p> <p>Rundheit der montierten Kupplung wichtig? (dient die montierte Kupplung als innere Lagerung, z.B. in einem Kunststoffgleitlager?)</p>
Kinematik	langsame Drehbewegung, < 1 U/min, Fliehkräfte spielen keine Rolle
	Lagerachse gleich Achse des Massenschwerpunkts der Spiegel

Kräfte	Gewichtskraft der Spiegel ca. 40 kg, Drehmomentübertragung ca. 80 Nm, wechselnd Torsionssteifigkeit maximieren muss die Kupplung elastisch sein, um Durchhängen der Spiegelwellen auszugleichen? (auch abhängig von der Steifigkeit der 4m-Welle)
Energie	-
Stoff	-
Signal	-
Sicherheit	-
Ergonomie	einfache Baustellenmontage, Spiegelmontage / Demontage „von oben“, d.h. quer zur Längsachse der Spiegelwelle
Fertigung	keine Festlegung, ob selbst oder Fremdfertigung
Kontrolle	-
Montage	Baustellenmontage, möglichst einfach und zeitsparend, lösbare Verbindung zweier Spiegelwellen
Transport	Transportierbarkeit der Spiegel im Gestell Transportierbarkeit der Spiegel mit 2 Personen
Gebrauch	Außenbewitterung in südlichen Ländern, Lebensdauer 20 Jahre
Instandhaltung	Wartungsfreiheit
Recycling	
Kosten	Herstellkosten je Verbindungsstelle < 100 €
Termin	-
Stückzahl	5000 Stk./a

5.1.2 Grundaspekte der technischen Funktion

Abbildungsfehler, die durch ungenaue Fundamenthöhen entstehen (Fehler im Fundament, in den Gestellbauteilen, im Lagergehäuse selbst), wirken sich optisch ähnlich wie eine Torsion in der Spiegelwelle aus. Im bisherigen Kupplungskonzept konnten diese Fehler ausgeglichen werden. Dies wäre allerdings mit einer formschlüssigen Kupplung nicht mehr möglich. Daher

müsste eine separate Einstellung der Gestellfüße, besser sogar jedes einzelnen Lagers vorgesehen werden.

Die zu koppelnden Elemente sind die Spiegelwellen (aktuell: 8-Kant-Blechwelle; alternativ: Rundrohr, Alu-Strangpressprofilrohr,...). Prinzipiell mögliche Fehler der Spiegelwellen, die u.U. auszugleichen wären, sind:

- Wellen sind zu lang oder zu kurz
- Wellen sind in sich verdreht
- Positionen der zu koppelnden Wellen sind zueinander höhenversetzt / seitenversetzt
- Formuntreue der Wellen

Für eine formschlüssige Kupplung ist eine Montagevorrichtung mit hohen Genauigkeitsanforderungen notwendig, damit der Formschluss keinen systematischer Montagefehler aufsummiert. Im derzeitigen Kollektorkonzept der PSE AG / Industrial Solar GmbH werden bis zu 8 Primärspiegelwellen in einer Reihe gekoppelt und mit einem Motor angetrieben. Wenn die durch einen Fertigungsfehler bedingte Ungenauigkeit im Versatz der Brennlinie einer Spiegelreihe nicht mehr als einen Zentimeter auf dem Absorberrohr ausmachen soll, dann ergibt sich daraus für den systematischen Fertigungsfehler eine maximale Winkeltoleranz von $0,01^\circ$ für die zwei Formteile an den entgegengesetzten Enden einer Spiegelwelle in der Montageform. Bezogen auf den Wellenstumpf im Lager mit einer Auflage von 40mm Durchmesser entspricht dies einem Versatz von 0,007 mm (7 μm).

Bei der Frage nach der Positionierbarkeit bei der Montage ist auch der Bereich der Einstellbarkeit (z.B. möglicher Einstellwinkel $0,2^\circ$) zu klären. Darüber hinaus muss auch eine Festlegung getroffen werden, ob ein mögliches Verbindungselement neben der Momentübertragung noch zusätzliche Funktionen wie Dämpfung, Ausgleich von Wellenversatz, Fluchtungsfehler etc. übernehmen soll.

Es kann sinnvoll sein, die unterschiedlichen Aufgaben der Verbindung auch örtlich zu trennen, z.B. auf der einen Seite eine komplexe Verbindung zwischen Spiegelwelle und Verbindungsglied in der Fertigung, dagegen eine einfache Verbindung zwischen dem Verbindungsglied und einem etwaigen Mittelstück auf der Baustelle zur vereinfachten Montage.

5.1.3 Geometrische Betrachtungen – erlaubte Toleranzen

Die Vorgabe eines Winkelfehlers zweier zueinander gekoppelter Spiegel lässt sich bei bekannter Dimension der einzelnen Bauteile auf deren Maßhaltigkeit übertragen. Folgendes Beispiel soll dies verdeutlichen:

Genauigkeit der Ausrichtung zweier Spiegelwellen zueinander $0,01^\circ$. Bei zwei planen Flächen mit einer Breite von beispielsweise 110 mm entspricht dies einer Ungenauigkeit im Randbereich der Platte von $19,2 \mu\text{m}$.

Der Auflösung halber wurde in folgender Skizze die Verdrehung der beiden Querschnitte um 1° gewählt. Es ergibt sich ein seitlicher Versatz von je $0,96 \text{ mm}$. Die Gesamthöhentoleranz beträgt somit $1,92 \text{ mm}$ (analog $19,2 \mu\text{m}$ bei $0,01^\circ$).

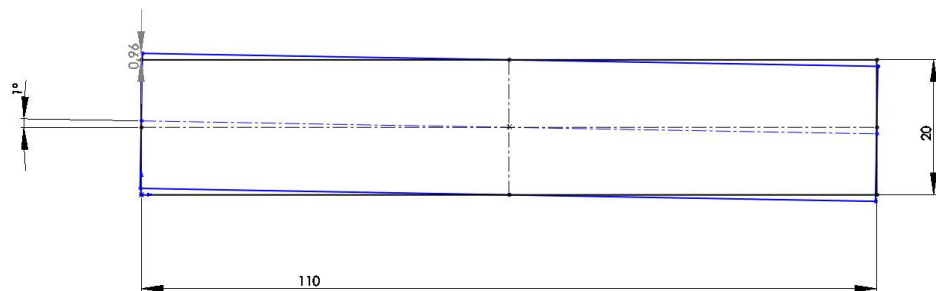


Abbildung 4: Muster

Prinzipiell ist eine Planparallelität von $0,01^\circ$ fertigungstechnisch herstellbar, vor allem bei einer Bearbeitung eines Bauteiles mit zwei planen Flächen und ohne Umspannen des Werkstückes können durch Fräsen bzw. Schleifen die geforderten Genauigkeiten erreicht werden. Bei der späteren Baustellenmontage kann auch ein Toleranzbereich von ca. $0,1^\circ$ gewählt werden – lediglich in der Fertigungsform / Montagetisch ist die höchste Genauigkeit gefordert, da sich die dort auftretenden Ungenauigkeiten als systematischer Fehler bei der Aneinanderkopplung mehrerer Spiegel aufaddieren.

Auf Grundlage einer präzisen Unterlage wie etwa eines optischen Tisches ist mit Einstellschrauben (Feingewinde) und einem ausreichenden Übersetzungsverhältnis eine Positionierung prinzipiell möglich. Es müssen geeignete Verfahren zur Messung und Nachjustierbarkeit der beiden Aufgestellen des Montagetisches gefunden werden.

5.1.4 Markt

In einer Marktrecherche (Ergebnisse siehe Anhang) wurde nach bestehenden Möglichkeiten von Welle-Nabe-Verbindungen gesucht, die eine Neuentwicklung womöglich überflüssig machen würde.

Die meisten der untersuchten Produkte sind für die Übertragung großer Leistungen und damit hoher Drehzahlen und ohne Reversierbetrieb ausgelegt. Eine spielfreie und winkelpräzise Verbindung ist in den Standardeinbaufällen dieser Produkte nicht notwendig.

Neben radialen Klemmverbindungen, die die Vielzahl der Produkte stellen (auch die bisherigen bei PSE verwendeten Kupplungen fallen in diese Kategorie) gibt es auch einige wenige formschlüssige Produkte, die jedoch aufgrund des notwendigen Spiels, welches zum formschlüssigen Verbinden durch Ineinanderstecken benötigt wird, für diese Anwendung ungeeignet sind.

Zudem werden viele der üblichen Wellen-Naben-Verbindungen in Wellenrichtung übereinander geschoben und befestigt, wodurch die Möglichkeit der Montage / Demontage einzelner Spiegelmodule von oben nicht möglich ist.

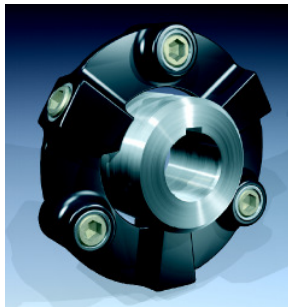


Abbildung 5: Beispiel eines Ergebnisses der Marktrecherche: Centaflex-Kupplung

5.1.5 Funktionsstruktur

Ausgangsprodukte: Teil A, Teil B

Funktionen: Die drei Hauptfunktionen sind die Verbindung der Bauteile zur Momentübertragung, die präzise Positionierung, sowie die Spielfreiheit. Die Nebenfunktion ist die rotatorische Lagerung.

Endprodukte: Teil A + B spielfrei und präzise positioniert, Teil A + B Drehmoment-übertragend verbunden.

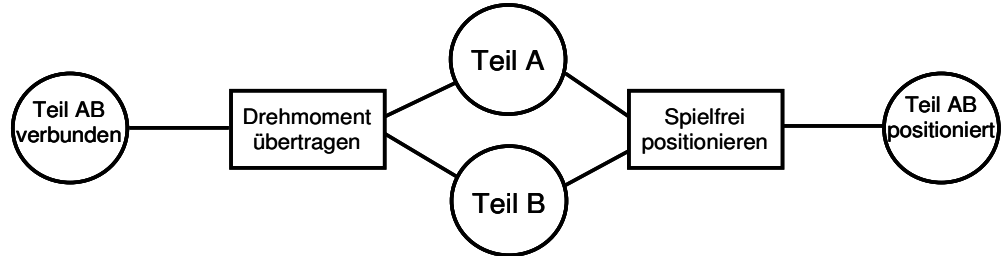


Abbildung 6:
Funktionsstruktur
der Hauptfunktionen

Hierbei kann prinzipiell die direkte Verbindung zweier Wellen miteinander (siehe Abbildung 7), die Verbindung einer Spiegelwelle zu einem Verbindungselement (siehe Abbildung 8), oder auch zweier zum Verbindungselement zugehöriger Bauteile miteinander (Abbildung 9, Abbildung 10) gemeint sein. Es gibt also mehrere Varianten für die letztendliche Stelle der Fügung auf der Baustelle.

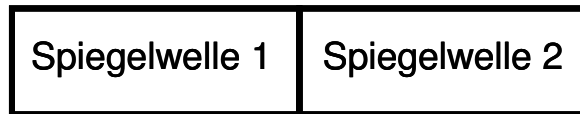


Abbildung 7:
Verbindungsoption
direkt



Abbildung 8:
Verbindung zweier
Wellen mittels
Verbindungsele-
ment, welches
Zusatzfunktionen
wie Lagerung
übernehmen kann.

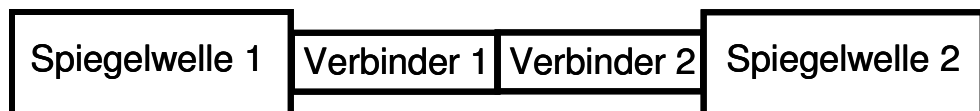


Abbildung 9:
Verbindungsoption
mit zwei
Zwischenbauteilen
(Verbinder 1 und
Verbinder 2)

Abbildung 10:
Verbindungsstück
mit 3 oder mehreren
Zwischenbauteilen



Baustellenfüugung zwischen Verbinder und Mittelstück; Zusatzfunktion
„Lagerung“ am Mittelstück

5.1.6 Wirkprinzipien

Wirkprinzipien zur Momentübertragung / Verbindung zweier Wellen

Stoffschlüssig	Schweißen
	Kleben
	Löten
Formschlüssig	Verzahnung
	4-Kant
	Polygon
	Passfeder
	Verstiften
reibschlüssig / kraftschlüssig	axiales Klemmen (Flansch)
	radiales Klemmen: Spannsatz
	Kegelpressverband
	Backenfutter
	Schalenkupplung
	Aufschumpfen
	Klemmen mit Nocke: Schnellspanner
	Klemmen mit Nocke: Kniehebel

Wirkprinzipien zur präzisen Positionierung zweier Bauteile /Änderung von Dimensionen

verstellbarer Anschläge Stellglied	mittels Schraube
	mittels Piezoeffekt
	mittels Erwärmung
	mittels elastischer Verformung im Bauteil durch äußere Kräfte (z.B. Druck eines Hydraulikpolsters)
Lehre	

Wirkprinzipien Spielfreiheit

Stoffschluss	
Reibschluss	
Formschluss mit Vorspannung	äußere Krafteinleitung (z.B. Klemmen)
	innere Kräfte ausnutzen: elastische Verformung; Rückstellkräfte des Materials

Wirkprinzipien rotatorische Lagerung

äußere Lagerung	z.B. Skateboardrollen
innere Lagerung	z.B. IGUS-Lager

5.1.7 Prinzipkombinationen

Mögliche Kombinationen der einzelnen Lösungsprinzipien im morphologischen Kasten:

Momentübertragung zwischen Bauteilen	Positionierung der Bauteile	Spielfreiheit zwischen Bauteilen
Schweißen	mittels Schraube	Stoffschluss Schweißen
Kleben	mittels Piezo	Stoffschluss Kleben
Löten	mittels Erwärmung	Reibschluss Klemmen
Verzahnung	mittels Lehre	Formschluss Vorspannung
4-Kant	von Hand	Formschluss Spaltauffüllen
Polygon	mit Präzisionsfolien stufenweise Abstand einstellen (definiertes Spaltauffüllen)	
Passfeder		
Verstiften		
axiales Klemmen (Flansch)		
radiales Klemmen: Spannsatz		
Kegelpressverband		
Backenfutter		
Schalenkupplung		
Aufschrupfen		

Der zeitliche Ablauf der Fertigung kann variiert werden. Z.B. kann eine genaue Spiegelwelle in zwei Arten hergestellt werden: fest eingespannte, präzise ausgerichtete Aufnahmen werden mit der Welle verbunden, wobei in der Verbindung die Toleranzen der Welle ausgeglichen werden (z.B. mittels Langlöcher / Schrauben oder durch Spaltauffüllen / Kleben). Es ist aber auch möglich, die Spiegelwelle zu fügen und anschließend die späteren Auflageflächen mechanisch nachzuarbeiten, um die gewünschte Präzision zu erhalten.

5.1.8 Konzeptphase

In der Konzeptphase wurde eine Vielzahl möglicher Kombinationen aus dem oben genannten morphologischen Kasten in Entwürfe umgesetzt und im 3D-CAD modelliert. Dabei ergaben sich zusätzliche Fragestellungen zum Materialaufwand, möglichen Fertigungsverfahren und Montagebedingungen, die in der darauffolgenden Konzeptbewertung mit eingeflossen sind. Auf die technischen Details der einzelnen Konzepte und Entwürfe soll hier nicht näher eingegangen werden.

5.1.9 Bewertung der Konzepte

Mittels einer gewichteten Punktebewertung wurden die Konzepte miteinander verglichen. Dabei lag der Fokus der Bewertung je auf der Verbindung der Wellen mit einem präzisen Verbindungsstück (Fertigungstechnik, Produktion) und der eigentlichen Baustellenmontage. Alle Konzepte der Verbindungsstelle zwischen Welle und Verbindungsstück lassen sich prinzipiell mit denen der Baustellenmontage kombinieren, so dass man hinsichtlich beider Bedingungen die als gut bewerteten Konzepte miteinander verknüpft.

Es stellen sich in beiden Detailbewertungen jeweils mehrere gute Lösungen heraus, die zukünftig je in einen Prototyp münden werden. Mit Hilfe der aus der Prototypenphase gewonnenen Erfahrungen ist dann eine Grundlage für die Konzeptentscheidung und weitere Detailoptimierung vorhanden.

Die Ergebnisse dieser Konzeptstudie mit Bewertung der verschiedenen Lösungsansätze geben den aktuellen Stand der Entwicklung zum Ende des Projektzeitraums wieder.

5.2 AP2 Inline Qualitätskontrolle

In der Fertigung werden je zwei 2 m lange Spiegel auf einem Primärspiegelsegment elastisch gebogen und mit Kleber in der gewünschten Form fixiert. Die Genauigkeit, mit der die tatsächliche Form nachher mit der Sollform übereinstimmt, entscheidet mit über die Abbildungsgenauigkeit des Primärspiegels. Das Ziel ist es, mit einem Prüfstand die Formtreue zu messen und Qualitätsrichtlinien für die Produktion der Primärspiegel zu identifizieren.

Ein Teststand zur Überprüfung der Qualität der aus der Fertigung kommenden Primärspiegel sollte aufgebaut und getestet werden. Zunächst wurde eine Prüfmethode ausgewählt, in einem Teststand umgesetzt und mit diesem Teststand in Stichproben die Qualität einzelner Spiegel geprüft.

Langfristiges Ziel ist eine Inline-Qualitätskontrolle in der Fertigung, die von jedem Spiegel nach der Fertigung durchlaufen wird und Ausschuss auszufiltern vermag. Dazu ist jedoch zum einen eine schnelle und einfache Bedienung des Prüfstands notwendig, um eine Verlangsamung des Fertigungsprozesses zu vermeiden. Zusätzlich sollte der Prüfstand robust genug sein, damit er im Falle einer Vor-Ort-Fertigung zukünftiger Anlagen im Ausland auch abgebaut, transportiert und wieder aufgebaut werden kann, ohne dabei an Genauigkeit zu verlieren.

Dabei sollen nicht nur die Methode getestet und verbessert sowie quantitativ auf ihre Aussagekraft geprüft werden, sondern es sollen auch für die Fertigung der Primärspiegel erste Maßzahlen zu erreichbaren und maximal erlaubten Toleranzen gewonnen werden. Mit dieser Rückkopplung an die Fertigung kann diese analysiert und ggf. ihre Genauigkeit erhöht werden.

5.2.1 Beschreibung des Prüfstands

Der Prüfstand besteht aus einem Gestell zur Aufnahme eines 4 m langen Primärspiegelsegments und einem Oberteil, welches das Muster und die Kameras enthält. Die Kameras werden über USB-Anschluss mit einem PC verbunden, auf dem die hierfür programmierte Messsoftware installiert ist.

Das Muster, schwarze Punkte auf weißem Hintergrund, hängt horizontal über dem Spiegel. Längs entlang der Mitte des Musters sind sechs Löcher, durch die die oberhalb befestigten USB-Kameras nach unten hindurch sehen können. Auf den Kamerabildern ist daher das durch die Form der Primärspiegel verzerrte Spiegelbild des Musters zu sehen.



Abbildung 11:
Prüfstand zum
Messen der
Fertigungsqualität

Die Füße des Gestells sind höhenverstellbar. Jede Kamera kann dreiaxsig ausgerichtet und fixiert werden. Das Muster wird über Drahtseile über dem Gestell abgespannt.

5.2.2 Vorbereitung

Das Gestell wird zunächst gründlich nivelliert und die Kameras ausgerichtet. Bei der Nivellierung werden zunächst die beiden Lager für den Primärspiegel mit den vier höhenverstellbaren Füßen auf eine Höhe gebracht. Etwas aufwändiger ist es, anschließend das mit dem Gestell verspannte Muster darüber mit den Spannschlössern genau horizontal auszunivellieren. Im dritten Schritt werden die Kameras einzeln dreiaxsig ausgerichtet. Dabei wird beachtet, dass nicht nur die optische Achse senkrecht steht, sondern dass auch das rechteckige Bild der Kameras parallel zu den Mustern ausgerichtet wird.

Das 4 m lange Primärspiegelsegment wird an den beiden Verbindungsflanschen drehbar im Gestell des Prüfstandes gelagert. Die Vorderseite bzw. Spiegelfläche wird nach oben gedreht.

5.2.3 Messmethode

Die Position jedes Bildpunktes kann berechnet werden, wenn der Prüfstand gut nivelliert worden ist und alle Abmessungen im Prüfstand bekannt sind.

Die Bilder der Kameras werden nacheinander aufgenommen und zusammen ausgewertet. Die realen Primärspiegel weichen von der idealen Form ab. Daher sind auch die Abstände der Bildpunkte nicht mehr regelmäßig. Nun kann aus der Position jedes Bildpunktes die zugehörige Oberflächennormale eines Punktes auf dem Spiegel als Ist-Normale berechnet werden, die im allgemeinen von der Soll-Normalen abweicht. Letztere spannt mit der Längsrichtung sowie der Querrichtung des Spiegels jeweils eine Ebene auf, und die Projektion der Ist-Normalen in diese Ebenen ergibt die Winkelabweichungen in Quer- und Längsrichtung vom Sollwert.

Aus der Verteilung der gemessenen Winkelabweichungen in Längsrichtung können z.B. Informationen über die Durchbiegung der Primärspiegelwelle auf Grund ihres Eigengewichts ausgewertet werden. Diese Winkelkomponente der Oberflächennormalen spielt hier jedoch nur einer untergeordnete Rolle.

Da der Spiegel bei der Fertigung in Querrichtung gebogen wird, lässt sich aus der Verteilung der Winkelabweichungen vom Sollwert in Querrichtung die Fertigungsqualität des Primärspiegels auswerten und damit ist sie das entscheidende Zwischenergebnis dieser Messmethode.

Die Standardabweichung dieser Verteilung gilt als Indikator für die Abbildungsgenauigkeit. Es ist für die Fertigung eine wichtige Rückmeldung, welche Standardabweichung bei der Produktion im Schnitt erzielt wird und welche Abweichungen von diesem Schnitt tolerabel sind. Nach Messungen an einer Stichprobe geeigneter Anzahl soll ein Schwellenwert definiert werden, der bei einer Inline-Qualitätskontrolle in der Produktion als Ausschusskriterium dienen kann.

Neben der Standardabweichung dient die Verteilung aber auch als Karte auf dem Spiegel. Es lassen sich Regionen größerer Abweichungen identifizieren und daraus sowohl Fertigungsfehler einzelner Spiegel – wie zum Beispiel lose Klebestellen – als auch systematische Schwachstellen der verwendeten Fertigungsmethode.

5.2.4 Vermeidung systematischer Messfehler

Das Messergebnis kann durch eine Reihe systematischer Messungenauigkeiten verfälscht werden. Einige davon können in der Auswertung herausgerechnet werden, anderen müssen jedoch durch sorgfältiges Ausrichten oder Ausmessen vorab so weit wie möglich reduziert werden.

Distanz

Die Distanz zwischen Kamera, Muster und Spiegel muss möglichst genau gemessen werden. Eine Abweichung vom angenommenen Wert hier lässt den gemessenen Spiegel bei der Auswertung mit einer anderen Brennweite erscheinen. Da die Sollwerte durch die Sollbrennweite vorgegeben werden, führt auch dies zu einem zu hohen Ergebnis der Standardabweichung.

Objektivverzerrung

Bei der Berechnung der Oberflächennormalen aus den Positionen der Punkte im Bild muss auch die Objektivverzerrung korrigiert werden.

Verkipfung der Kameras oder des Musters

Eine Verkipfung des Musters ändert den Abstand der Punkte auf dem Bild gleichmäßig und täuscht dadurch eine veränderte Krümmung bzw. Brennweite des Spiegels vor.

Eine Verkipfung der Kameras wirkt sich ähnlich aus wie eine Verkipfung des Spiegels. Sie verschiebt das Bild und alle Oberflächennormalen gleichmäßig und verfälscht den Betrag. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass sich die Verkipfungen von Kamera und Spiegel im Winkel gegenseitig aufheben. Dies führt zu einer projektiven Verzerrung des Bildes, genau wie eine Verkipfung des Musters alleine, die sich wie eine Änderung der Spiegelbrennweite auswirkt und ansonsten bei der Auswertung nicht auffallen würde.

Aus diesem Grund muss die Verkipfung der Kameras und des Musters im Vorfeld so sorgfältig wie möglich durch Ausrichten und Nivellieren des Teststandes vermieden werden. Ist die Kamera genau ausgerichtet, so kann eine Spiegelverkipfung bei der Auswertung identifiziert und rechnerisch korrigiert werden.

5.2.5 Korrektur systematischer Messfehler

Verkipfung des Spiegels

Die Verkipfung des Spiegels in Querrichtung führt zu einer Verschiebung des Bildes. Gleichzeitig werden alle Oberflächennormalen und damit auch ihr Mittelwert gleichmäßig verschoben, wodurch sich die Standardabweichung erhöht. Die Korrektur geschieht durch Subtraktion des Mittelwerts von allen Werten.

Eine Verkippung in Längsrichtung verschiebt das Bild ebenfalls und führt zum selben Effekt bei den Winkelabweichungen in Längsrichtung. Auf die Auswertung hat sie also keinen Effekt.

Zwängung des Spiegels

Der Spiegel muss frei gelagert, aber in seiner Position gehalten werden. Das ist ein Widerspruch. Er muss in der Position gehalten werden, damit eine wiederholgenaue Messung möglich ist. Jedoch darf er nicht gezwängt werden, da dies die Form des Spiegels und daher das Messergebnis verfälscht.

Daher wird der Spiegel im Teststand zunächst frei eingehängt, durch Kontrolle mit einer Wasserwaage und mit dem Live-Bild der Kameras möglichst genau horizontal gedreht und dann vorsichtig von unten an vier Stellen mit höhenverstellbaren Moosgummis in seiner Position stabilisiert. Es darf von unten keine Kraft auf den Spiegel ausgeübt werden. Eine geringfügige Verkippung kann bei der Auswertung korrigiert werden, eine Zwängung jedoch nicht.

5.2.6 Stichproben

Im Jahr 2009 wurden jeweils ein linearer Fresnel-Kollektor in Masdar (Abu Dhabi, VAE) und in Freiburg-Hochdorf errichtet. Die Primärspiegelwellen hierfür wurden im Juli 2009 gefertigt. Aus dieser Produktion wurden am 21.7. und 27.7.2009 insgesamt 10 Primärspiegelwellen ausgewählt und im Prüfstand gemessen.

5.2.7 Auswertung

Aus den gemessenen Verteilungen der Winkelabweichungen vom Sollwert in Querrichtung ergab sich für die gemessene Stichprobe eine gemeinsame mittlere Standardabweichung von 1,99 mrad, wobei die einzelnen Spiegel der Stichproben Standardabweichungen zwischen 1,77 mrad und 2,22 mrad aufwiesen. Die Standardabweichung der Standardabweichungen lag bei 0,167 mrad.

5.2.8 Interpretation

Bei der gemessenen Stichprobe waren keine großen Ausreißer dabei. Eine starke Streuung der Ergebnisse von Spiegel zu Spiegel konnte nicht festgestellt werden. Ausgehend von dieser recht kleinen Stichprobe könnte ein Ausschusskriterium bei 3 mrad gesetzt werden. Jeder Spiegel mit einer größeren Standardabweichung sollte gezielt auf Defekte, wie z.B. lose Klebestellen, untersucht werden.

Es empfiehlt sich allerdings, in Zukunft eine größere Stichprobe zu messen und den Schwellenwert dann anzupassen. Ebenfalls sollten Spiegel mit Defekten vor der Entsorgung gemessen werden, um die Auswirkungen der Defekte auf das Bild, die Brennlinie und das Prüfergebnis kennenzulernen. So ist es u.U. sogar möglich, anhand eines Prüfergebnisses auch die Art eines Defekts zu identifizieren, was für den nächsten Schritt der Einbindung als Inline-Qualitätskontrolle erstrebenswert ist.

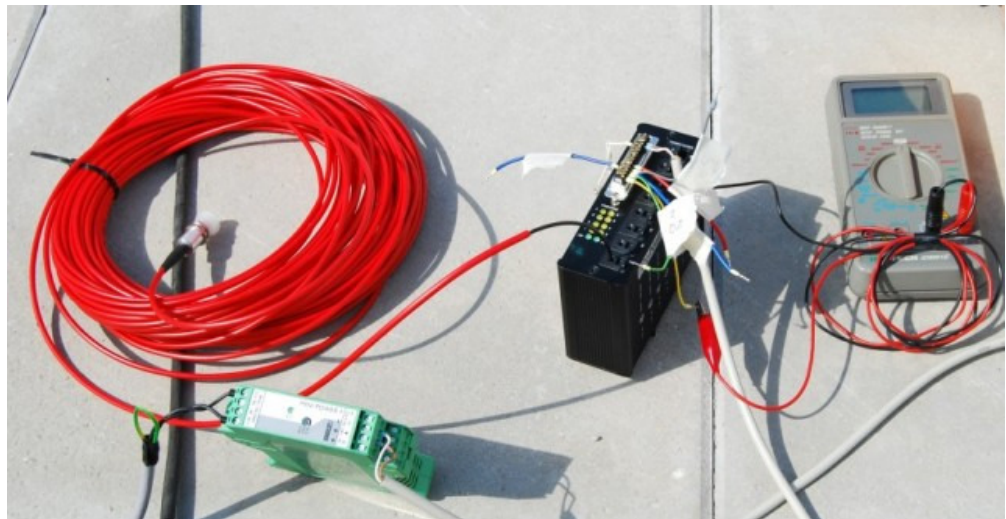
5.3 AP3 Solarsensoren

Die Solarsensoren an der Außenseite des Receivers werden zur Kalibrierung der Primärspiegelantriebe eingesetzt. Ein Ziel dieses Projekts war die Untersuchung und Weiterentwicklung der Solarsensoren, da in der Vergangenheit gelegentlich Solarsensoren ausgefallen waren. Als mögliche Ausfallgründe waren zu hohe Temperaturbelastungen, z.B. wenn mehrere Brennlinsen gleichzeitig auf einem Sensor stehen, oder Feuchte in Betracht gezogen worden.

So wurden die Solarsensoren des neuen Kollektors in Freiburg-Hochdorf zur Kontrolle mit Temperaturfühlern ausgestattet, damit die Funktionalität der Sensoren unter realen Einsatzbedingungen mit Regen sowie mit hohen Temperaturen bei konzentrierter Bestrahlung überwacht werden konnte.

Zusätzlich wurden Lichtwellenleiter mit Linsenköpfen zur Einkopplung des Lichts als Alternativkonzept zu den bisherigen Solarsensoren montiert. Die Lichtwellenleiter werden vom Receiver direkt in den Schaltschrank geführt und der Messwertumformer befindet sich im Schaltschrank. Beide Sensorvarianten wurden parallel betrieben und zur Kalibrierung verwendet.

Abbildung 12:
Lichtwellenleiter-
system, bestehend
aus Linsenkopf,
Lichtwellenleiter,
Messumformer und
Spannungsversorgu
ng



Bei der Installation der Lichtwellenleiter muss auf den Öffnungswinkel der LWL-Optik geachtet werden. Die verwendeten Lichtwellenleiter haben einen Öffnungswinkel von ca. 90 °. Wenn der Lichteintritt horizontal auf Receiverhöhe montiert wird, befinden sich die äußeren Spiegelreihen – also in diesem Fall Reihe 1 und 11 – im Randbereich des Sichtfelds der Optik. Wenn die Sonne nun noch in einem deutlich von Null verschiedenen

Longitudinalwinkel steht, befindet sich der Brennlinsenreflex der äußeren Reihen nicht mehr im Sichtfeld.

Laut Hersteller ist es jedoch möglich, auch eine Optik mit größerem Sichtfeld herzustellen. Dies ist im Falle einer Integration dieses Konzepts notwendig.

Abbildung 13:
Signale an den
Positionen 1 und 2
im Vergleich,
untergrundbereinigt

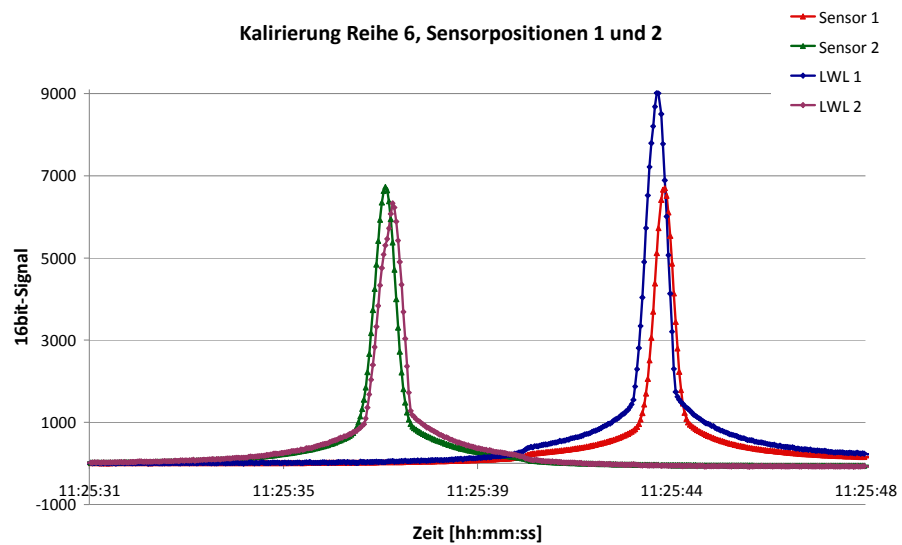
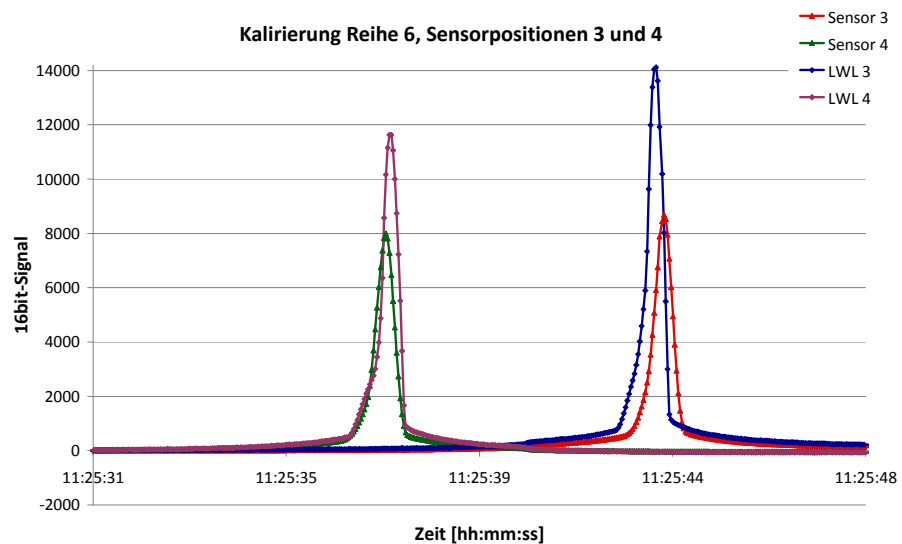


Abbildung 14:
Signale an den
Positionen 3 und 4
im Vergleich,
untergrundbereinigt



Die temperaturüberwachten Solarsensoren sind seit ihrer Installation im Einsatz und funktionsfähig. Bei der Auswertung der Messdaten wurden Temperaturbelastungen bis 95 °C an den Sensoren im Betrieb gefunden.

Zwar ist eine Anzahl von vier Sensoren keine ausreichend große Stichprobe, um zuverlässige Aussagen treffen zu können. Der Bewitterungstest kann als Erfolg gewertet werden, da das System offensichtlich robust genug war, die regnerischen Freiburger Wetterbedingungen sowie die konzentrierte Bestrahlung und zeitweise hohe Temperaturbelastung im Betrieb zu überstehen. Temperaturen bis knapp 100 °C im Betrieb sind dennoch ein Hinweis darauf, Elektronik so weit wie möglich aus diesem Bereich herauszunehmen.

Ein Vorteil der Lichtwellenleiter gegenüber den bisherigen Solarsensoren ist die Wartungsfreundlichkeit. Es gibt keine elektronischen Bauteile am Receiver, der in über vier Metern Höhe schwer zugänglich und neben dem Wetter auch konzentrierter Bestrahlung ausgesetzt ist. Als Nachteil gilt allerdings, dass die Lichtwellenleiter bei der Montage empfindlicher sind, denn sie dürfen nicht geknickt werden. Augenblicklich ist die Lösung mit Lichtwellenleitern und optoelektronischen Messumformern noch kostspieliger als die bisherigen Solarsensoren, jedoch bestehen gute Aussichten, dass diese Technologie in großen Stückzahlen zu ähnlichen oder sogar geringeren Kosten bezogen werden kann. Falls sich bestätigt, dass sich durch dieses Konzept die Wartungsfreundlichkeit und Ausfallsicherheit erhöhen lässt, wären Mehrkosten in einem gewissen Rahmen gerechtfertigt.

5.4 AP4 Optimierung der Steuerung

Bereits im letzten von der DBU geförderten Forschungsprojekt wurden Antriebe der Firma Aris und der Firma Seefrid getestet. Seither wurden an den bisherigen Kollektoren die Motoren von Aris mit nur geringfügigen Änderungen eingesetzt. Schwachpunkte des Aris-Antriebs sind seine Dichtigkeit (Antriebe sind bereits ausgefallen wegen eingedrungenem Wasser) sowie die aufwändige Verkabelung.

Während jeder einzelne Aris-Motor selbst mit einer 230 V-Leitung direkt vom Schaltschrank aus angesteuert wird, werden als Neigungssensoren geeichte Potentiometer benötigt, die bislang ebenfalls stets einzeln mit dem Schaltschrank verbunden wurden. Dadurch mussten bislang für jede Antriebsreihe 22 Leitungen vom Schaltschrank aus verlegt werden.

Als erster Schritt zur Verringerung des Materialaufwands wurde nun eine Umstellung der Potentiometer auf CAN-Bus vorgenommen. Auf diese Weise hängen alle elf Potentiometer an einem CAN-Bus. Es können sogar mehrere Antriebsreihen über einen CAN-Bus ausgelesen werden. Auch Temperatursensoren und die CAN-Box der Solarsensoren können an denselben Bus gehängt werden.

Neben der Umstellung auf CAN-Bus wurden in diesem Projekt nun alternative CAN-Bus-fähige Steuerungen von Seefrid und Dunker getestet. Die Steuerung ist derzeit im Schaltschrank integriert. Die Alternative ist eine externe Steuerung in Antriebsnähe (wahlweise direkt an jedem einzelnen Antrieb oder aber an jeder Antriebsreihe gebündelt). Damit könnten die Antriebe über einen 24V-Kabelbaum mit Spannung versorgt und eine Menge Kabelweg eingespart werden.

Zudem wurde als Alternative zum derzeit verwendeten Potentiometer als Neigungssensor ein Magnetstreifen getestet, der zwar eine gröbere Auflösung besitzt als das Hohlwellenpotentiometer, die aber durch Montage auf entsprechend größerem Durchmesser kompensiert werden kann und dann erhebliches Einsparpotenzial birgt.

5.4.1 Testaufbau zur Winkelauflösung und Wiederholgenauigkeit

Die Steuerung wurde zunächst in einem kleinen Stand getestet, wobei die Winkelauflösung, sowie die Ziel- und die Wiederholgenauigkeit beim direkten Ansteuern eines Neigungswinkels mit einem Neigungssensor geprüft wurde.

Teststand

Zur Verfügung standen zwei Motorsteuerungen: die BGE 3508 von Dunker und eine für die PSE entwickelte Steuerung der Firma Seefrid. Beide Steuerungen wurden am selben Teststand angeschlossen.

Im Teststand ist ein mit 24 Volt Spannung angeschlossener bürstenbehafteter Motor mit einer Welle verbunden. Diese Welle bewegt eine Scheibe, auf die das hier von uns erstmals eingesetzte Magnetband geklebt ist. Unterhalb des Magnetbandes befindet sich der Positionssensor PMIS3 der Firma POSIMAG. Dieser Positionssensor wird von beiden Steuerungen verwendet.

Tabelle 1: Kenndaten von Magnetband und Positionssensor

Magn. Teilungsperiode	5 mm
Auflösung	25 µm
Max. Impulsfreq.	10 kHz
Signale	A/B mit Referenzpuls Z

Tabelle 1 fasst die wichtigsten Eigenschaften des eingesetzten Magnetbandes und des Positionssensors zusammen.

Ein optischer Drehgeber (TR-Electronic TR-ECE-TI-DGB-0101 vom Typ CEH58M), der direkt an die Welle geschlossen ist, dient als Referenz für die winkelgenaue Positionierung. Der Drehgeber misst 8192 Schritte (Ticks) pro Umdrehung. Da der Drehgeber linear ist, kann man den Winkel genau berechnen. Ein Drehgeber-Tick entspricht also ca. 0,044 °. Die Umrechnung von Drehgeber-Ticks in Grad erfolgt daher wie folgt:

$$f(x) = x \cdot \frac{360}{8192}$$

Gleichung 1

Die Steuerungen verwenden den Positionssensor und arbeiten mit jeweils wiederum mit einer eigenen Auflösung. Auch hier wird von Ticks gesprochen, die aber nicht mit den Drehgeber-Ticks verwechselt werden sollten. Aus diesem Grund werden die Angaben des Drehgebers im Folgenden als Winkel in Grad angegeben und die Bezeichnung Ticks für die

interne Auflösung von Positionssensor-Ticks der eingesetzten Steuerung verwendet. Die Positionierung über die Steuerung erfolgt also in Ticks.

Durchführung

Insgesamt wurden zwei Tests mit jeder Steuerung durchgeführt. Der erste Test überprüft die Ziel- und Wiederholgenauigkeit. Der zweite Test überprüft zum einen die Linearität des Bandes und der Steuerung, und zum anderen versucht er auch herauszufinden, welcher der kleinste fahrbare Weg ist.

Da das Magnetband eine kleine Lücke aufweist, innerhalb der der Positionssensor stehenbleibt, kann man keine volle Umdrehung fahren. Das stellt jedoch für diese Messungen kein Problem dar, da der Drehgeber als Referenz dient. Für den Test wurde der größtmögliche Winkelbereich von ca. 320 ° genutzt.

Beim ersten Test zur Ziel- und Wiederholgenauigkeit wird stets eine vordefinierte Abfolge von n Zielpositionen x_i angefahren, wobei $x_i < x_j$ für $i < j$ gilt. Der Test fängt bei x_1 an, fährt bis x_2 und hält dort an. Dabei werden Daten gesammelt. Danach fährt der Test zur Position x_3 , usw. Wenn die Position x_n erreicht wird, fährt der Test zur Position x_{n-1} , dann x_{n-2} , usw. bis x_1 erreicht wird. Dieser Zyklus wird insgesamt 50 Mal wiederholt.

Bei jedem Stopp der Steuerung, d.h. wenn eine Zielposition erreicht wurde, werden folgende Daten gesammelt:

- Zielposition (in Ticks)
- Tatsächliche Position (in Ticks), an der die Steuerung angehalten hat
- Referenzwinkel (Drehgeber-Ticks)
- Dauer des Vorgangs

Mit diesem Test kann nicht nur die Wiederholgenauigkeit bestimmt werden, sondern auch die Zielgenauigkeit, insbesondere wenn dabei die Drehrichtung beachtet wird. Hierfür wird die Veränderung der Zielgenauigkeit betrachtet, wenn von links oder von rechts an die Position x_k herangefahren wird. Für die Tests (sowohl beim Dunker-Controller als auch beim Seefrid-Controller) wurden $n = 9$ Zielpositionen gewählt: 1000, 2300, 4000, 6970, 8900, 12000, 13000, 15600 und 17000 Ticks. Die Positionen wurden zufällig gewählt. Der Fahrweg zwischen Position 1000 und 17000 entspricht ca. 290 °.

Der zweite Test dient der Untersuchung der Linearität und des kleinsten fahrbaren Weges und ist im Grunde genauso aufgebaut wie der erste Test. Die gesammelten Daten zu jeder Position sind ebenfalls dieselben. Ein Unterschied liegt darin, dass beim zweiten Test wesentlich mehr Zwischenpositionen angefahren wurden, die alle den gleichen Abstand voneinander haben. Da für diesen Test die Daten in eine Richtung vollkommen genügen, wird als zweiter Unterschied der Rückweg (von x_n zu x_1) nicht mehr gefahren.

Mit diesem höher aufgelösten Test soll die Linearität bzw. deren Abweichung bestimmt werden. Außerdem wird damit ein Einsatz der Steuerung im Kollektor simuliert, wofür die Steuerung in sehr kleinen Schritten fahren können muss ($\leq 0,1^\circ$). Dies wird beim Test simuliert, indem der Abstand zwischen den Zielpositionen sehr gering gewählt wird. Beim ersten Durchlauf wurde ein Abstand von 5 Ticks gewählt, was etwa $0,087^\circ$ entspricht. Die Seefrid-Steuerung konnte sogar noch kleinere Schritte fahren, die Dunker-Steuerung hatte jedoch bei 5 Ticks zu viele Abweichungen, weshalb der Abstand für den zweiten Durchlauf auf 50 Ticks (ca. $0,88^\circ$) vergrößert wurde.

5.4.2 Auswertung

Ziel- und Wiederholgenauigkeit

Abbildung 15 zeigt zwei Grafiken, die die Ziel- und Wiederholgenauigkeit der Steuerungen zeigt. Die X-Achse stellt die laufende Nummer der Versuche dar, die Y-Achse entspricht dem Referenzwinkel beim n . Versuch, der mit dem Referenzsensor (Drehgeber) mit Gleichung 1 auf Seite 38 bestimmt wurde.

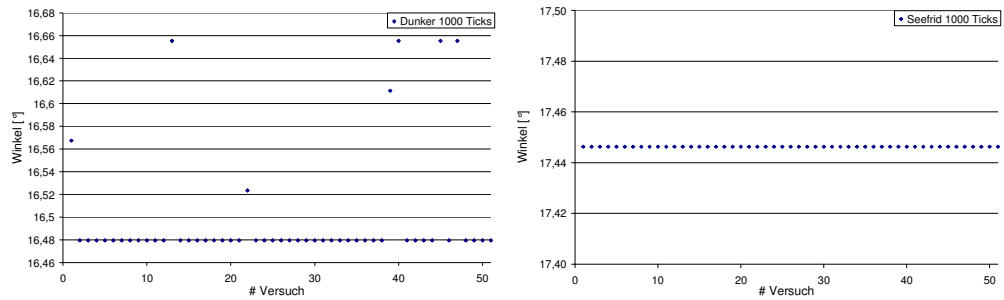
Abbildung 15 links zeigt die Ziel- und Wiederholgenauigkeit der Dunkersteuerung bei Ansteuerung einer Position von 1000 Ticks. Innerhalb aller Versuche war der gemessene kleinste Winkel 16.4795° , der größte Winkel 16.6553° . Also gibt es eine maximale Abweichung von 0.1758° Grad. In der Abbildung sieht man ebenfalls, dass die Genauigkeit i.A. sehr gut ist, denn es gibt nur 5 große Ausreißer.

Abbildung 16 links zeigt dasselbe für die Position von 6970 Ticks. Hier wurden wesentlich mehr Abweichungen beobachtet. Das liegt auch daran, dass diese Position zweimal angefahren wird, einmal von links und einmal von rechts. Der kleinste gemessene Winkel betrug 115.4443° , der größte 115.7080° , bei einer maximalen Abweichung von 0.2637° .

In Abbildung 15 und Abbildung 16 rechts sind die Ergebnisse der Seefridsteuerung. Bei Position 1000 landeten alle Versuche auf dem

gleichen gemessenen Referenzwinkel von 17.4463° . Das zeigt, dass die Seefridsteuerung eine hervorragende Ziel- und Wiederholgenauigkeit besitzt.

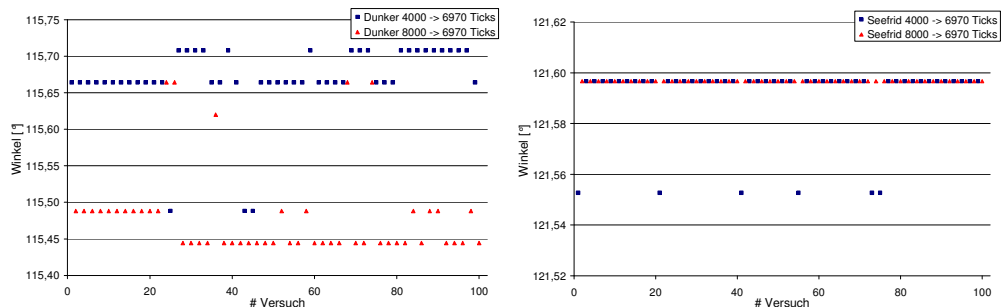
Abbildung 15:
Wiederholgenauigkeit beim Ansteuern der Winkelposition „1000 Ticks“, links mit der Dunker- und rechts mit der Seefrid-Steuerung



Bei der Position 6970 gibt es dagegen auch mit der Seefridsteuerung ein paar Abweichungen (sechs insgesamt). Die gemessenen Abweichungen haben stets denselben Wert: der kleinste Winkel beträgt 121.5527° , der größte 121.5967° . Somit beträgt die maximale Abweichung gerade 0.0439° , was genau einem Drehgeber-Tick entspricht. Da dieses Verhalten nur bei Position 6970 zu beobachten ist, kann es daran liegen, dass diese Position so nah bei einem Schrittwechsel des Drehgebers lag, dass manchmal der Drehgeber einen Schritt zu wenig zählte. Nicht nur die Zielgenauigkeit, sondern auch die Wiederholgenauigkeit der Seefridsteuerung hat bei diesem Test hervorragend abgeschnitten.

In Abbildung 16 wurde unterschieden, ob eine Position von links oder von rechts angefahren worden war. Die Abbildung zeigt für beide Steuerungen exemplarisch die Zielposition 6970.

Abbildung 16:
Wiederholgenauigkeit bei „6970 Ticks“, links mit Dunker- und rechts mit Seefrid-Steuerung, wobei unterschieden wird, aus welcher Richtung die Position angefahren wird.



Die X-Achse stellt die Anzahl der Versuche dar, die Y-Achse entspricht dem gemessenen Referenzwinkel beim n . Versuch. Abbildung 16 links zeigt den Fall der Dunkersteuerung. Die blauen Quadrate zeigen die Genauigkeit,

wenn man von Position 4000 aus bis zur Position 6970 fährt. Die roten Dreiecke zeigen die Genauigkeit, wenn man von Position 8900 aus bis zu Position 6970 fährt. Genauso wie bei Abbildung 15 kann man hier mehrere Schwankungen sehen. Die Schwankungen sind groß, manchmal größer als 0.2° und damit zu groß für den Einsatz in einem Fresnel-Kollektor.

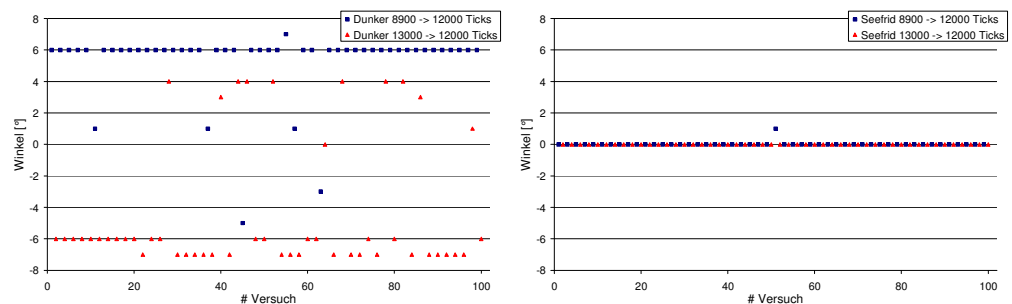
Abbildung 16 rechts zeigt die Ergebnisse mit der Seefridsteuerung. Von Position 4000 aus sieht man sehr geringe Ausweichungen, die maximal 0.0439° betragen. Wie in Abbildung 15 sieht man nur wenige Schwankungen, die dann stets genau einen Drehgeber-Tick ausmachen. Die roten Dreiecke zeigen den Fall, wenn man von Position 8900 aus fährt. Hier sieht man gar keine Abweichung. Auch diese Untersuchung zeigt, dass die Ziel- und Wiederholgenauigkeit der Seefridsteuerung hervorragend ist.

Abweichung der Zielgenauigkeit

Bislang wurde die Zielgenauigkeit bzgl. des Referenzsensors untersucht. In diesem Abschnitt wird nun die Untersuchung der Zielgenauigkeit bzgl. ihrer eigenen Positionseinheiten vorgestellt. Damit sollen mögliche Ursachen für die Schwankungen der Zielgenauigkeit festgestellt werden können.

Abbildung 17 zeigt die interne Abweichung in Ticks bei der Zielposition 12000. Die X-Achse stellt die Anzahl der Versuche dar, die Y-Achse entspricht der Abweichung zur Zielposition in Ticks.

Abbildung 17:
Interne Abweichung
der angesteuerten
von den erreichten
Positionen in Ticks,
wobei
unterschieden wird,
aus welcher
Richtung die
Position angefahren
wird.



Die linke Grafik zeigt den Fall der Dunkersteuerung. Hier konnten wiederum ähnliche Schwankungen wie bei den anderen behandelten Fällen mit der Dunker-Steuerung beobachtet werden. Die Abweichungen sind recht groß und schwanken zwischen -8 und +8 Ticks. Da der Positionssensor für eine ganze Umdrehung ca. 21000 Ticks misst, entspricht diese maximale Abweichung einem Winkelbereich von etwa 0.27° .

Ein Problem für die Ziel- und Wiederholgenauigkeit der Dunkersteuerung ist, dass diese innerhalb ihrer Zielposition große Schwankungen zulässt. Eine

bessere Einstellung der PID-Regler könnte da vermutlich helfen, allerdings ist eine solche Einstellung recht kompliziert, denn es stehen viele Parameter zur Verfügung, die teilweise schlecht oder gar nicht dokumentiert sind.

Abbildung 17 rechts zeigt den Fall der Seefridsteuerung. Wie bei den anderen Tests auch ist diese Steuerung sehr genau. Bei 100 Versuchen gab es nur eine einzige Abweichung um einen Tick. Das ist auch der Grund, warum die Seefridsteuerung stets sehr genau gewesen ist.

Linearität

Mit dem zweiten Test haben wir die Linearität der Steuerung im Teststand untersucht. Mittels einer linearen Interpolation konnte man den erwarteten Winkel bei Position x berechnen und auf diese Weise die Abweichungen aufgezeichnet.

Abbildung 18:
Abweichungen von
der Linearität

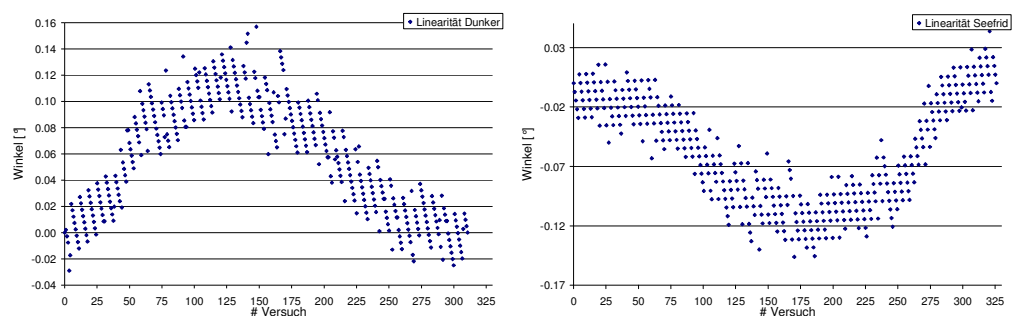


Abbildung 18 zeigt die Abweichung der Linearität des Teststands. Die X-Achse stellt den gemessenen Referenzwinkel, die Y-Achse entspricht der Abweichung (in Grad) zum erwarteten Winkel. Der erwartete Winkel lässt sich mittels linearer Interpolation berechnen. Die linke Grafik zeigt den Fall der Dunkersteuerung, die rechte zeigt den Fall der Seefridsteuerung. Auch hier sieht man, dass die Abweichungen bei der Seefridsteuerung geringer sind.

5.4.3 Fazit

Die Seefridsteuerung verfügt über eine hervorragende Ziel- und Wiederholgenauigkeit. Die Ziel- und Wiederholgenauigkeit der Dunkersteuerung hängt u.a. von der Einstellung der PID-Regler für Position und Geschwindigkeit ab, so wie von den eingestellten Rampen. Das Problem ist, dass die vielen einzustellenden Parameter voneinander abhängen und dabei zum Teil schlecht oder gar nicht dokumentiert sind, so dass eine optimale Konfiguration der Steuerung sehr schwierig ist.

5.4.4 Feldtest

Dann wurde das Magnetband anstelle des Potentiometers und die Seefridsteuerung mit dem Seefridantrieb im neuen Fresnelkollektor in Reihe 1 anstelle des Aris-Antriebs eingesetzt und gemeinsam mit den anderen 10 Aris-Antrieben im Betrieb getestet. Hierbei zeigte sich noch eine Schwachstelle des Magnetbands und der Seefrid-Steuerung in seiner jetzigen Ausführung: der Magnetstreifen zur Winkelmessung besitzt keine Referenz-Positionen und die Seefrid-Steuerung noch keine dazugehörige Homing-Funktion. Das bedeutet, dass mit dem Magnetstreifen zwar Neigungsänderungen genau erfasst werden, aber der Absolutwert unbekannt bleibt. Daher muss der Antrieb jedesmal bei morgendlicher Inbetriebnahme des Kollektors zunächst kalibriert werden. Laut Hersteller Seefried ist dieses Problem allerdings lösbar, sollten wir in Zukunft diese Antriebe bestellen wollen. Bezüglich der Nachführgenauigkeit konnten keine Unterschiede zwischen den beiden Antrieben festgestellt werden.

5.5 AP5 Direktverdampfung

In diesem umfangreichsten AP des Projektes sollte die Direktverdampfung im Fresnel-Kollektor erprobt, Systemkomponenten für die Dampfabscheidung oder Teilentspannung getestet und Regelstrategien zur Dampfeinspeisung in ein bestehendes Dampfnetz erarbeitet werden.

Der alte Prototyp des Fresnel-Kollektors in Freiburg wurde wegen des Umzugs der PSE-Werkstatt im Winter 2008/2009 abgebaut. Da ein Demonstrationskollektor am Firmenstandort jedoch insbesondere für Weiterentwicklungen eine sinnvolle Testumgebung darstellt, war der Neubau eines Fresnel-Kollektors für Frühjahr/Sommer 2009 geplant worden. Ein Umzug des alten Kollektors zum Standort der neuen PSE-Werkstatt kam nicht in Frage, da das Konzept weiterentwickelt worden war und neue Komponenten zum Einsatz kommen sollten.

Durch den geplanten Neubau ergab sich die Chance, das System von vornherein zur Direktverdampfung auszulegen. Allerdings sollten Komponenten der bestehenden Anlage auch im neuen Testsystem weiterverwendet werden, wie z.B. die Pumpen und Ventile, das Ausgleichsgefäß und ein Teil der Edelstahlverrohrung.

5.5.1 Systemkonzept

Zunächst wurde im Rahmen einer Diplomarbeit [Alk08] für die neue Testanlage zur Dampferzeugung mit einem Fresnel-Kollektor ein Konzept entworfen und vorausgelegt. Bei der Auswahl eines geeigneten Konzepts wurde schnell klar, dass zunächst grundlegend unterschieden werden musste zwischen einem Konzept mit kontinuierlicher Einspeisung von Frischwasser bzw. zurückgeführtem Kondensat und einem System mit diskontinuierlicher Einspeisung (z.B. Nachteinspeisung).

Der Hauptvorteil der diskontinuierlichen Einspeisung liegt in der einfacheren Ausführung der Einspeisung selbst, denn die Notwendigkeit der genauen Regelung eines Speisewasservolumenstroms, die bei kontinuierlicher Einspeisung von großer Bedeutung ist, fällt weg. Ausschlaggebend für die Wahl eines Konzepts waren jedoch zwei Vorteile der kontinuierlichen Einspeisung. Es wird zum einen für eine kontinuierliche Einspeisung eine wesentlich geringere Dampftrommel benötigt, wodurch sich in erster Linie die thermische Trägheit des Wasserkreislaufs und damit die Aufheizzeit vor Verdampfungsbeginn im Tagesverlauf stark verringert. Zum anderen kann die kontinuierliche Einspeisung als kundennah erachtet werden, da in vielen realen Prozessdampfanwendungen aus Kostengründen Kondensat zurückgeführt und eingespeist wird.

Abbildung 19:
Konzept für ein
System mit
kontinuierlicher
Einspeisung, Grafik
aus [Alk08]

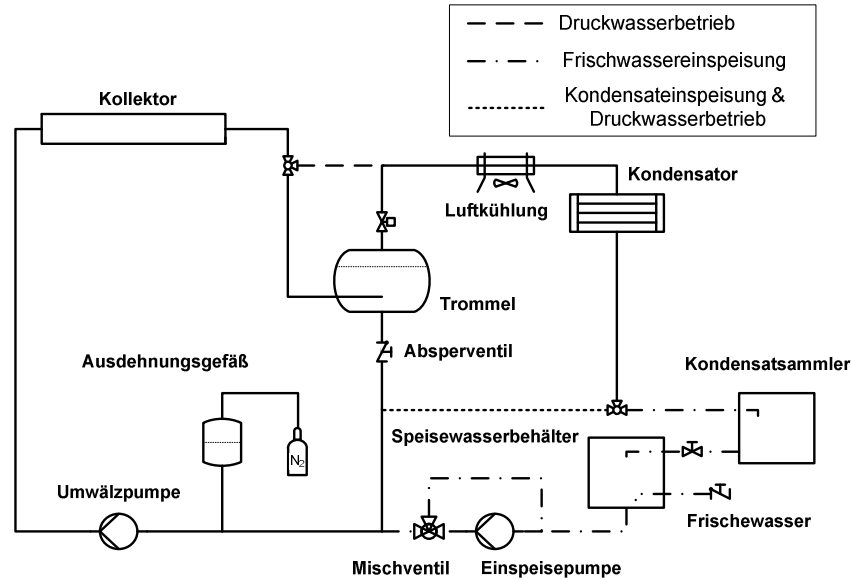


Abbildung 19 zeigt eine mögliche Variante dieses Konzepts, die eine Kondensierung, Sammlung und Rückführung des Kondensats vorsah. Dies hätte erlaubt, den Wasserverbrauch der Anlage gering zu halten und die Menge des Kondensats und damit letztlich auf einfache Weise die Dampfleistung genau zu bestimmen. Im Idealfall bei vollständiger Rückführung des Kondensats kann sogar vollständig auf eine Enthärtung und Entsalzung des Speisewassers verzichtet werden, da der Kreislauf dann geschlossen wäre.

Der nächste Schritt war die Vorauslegung der benötigten Komponenten. Gerade die Dimensionierung der Dampftrommel, die als Wasserbehälter eine große Wärmekapazität besitzt, jedoch ausreichend groß ausfallen muss, um ihre Funktion als Abscheider erfüllen zu können, ist hierbei von zentraler Bedeutung. Mit Hilfe von Ertragsabschätzungen wurde die Dampfproduktion zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten berechnet, wobei die durch die thermische Trägheit des Systems verursachte Aufheizphase in Betracht gezogen werden musste.

Abbildung 20:
Verdampfungs-
beginn in
Abhängigkeit vom
Trommelvolumen
bei
unterschiedlichen
Betriebsdrücken
und Jahreszeiten

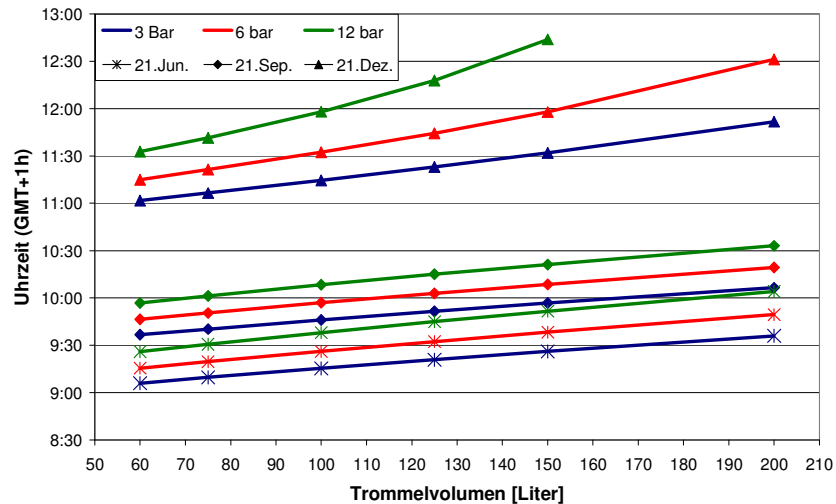


Abbildung 20 zeigt den Zusammenhang von Aufheizphase und Trommelvolumen bei verschiedenen Jahreszeiten und Betriebsdrücken mit einem 132 m²-Fresnelkollektor in Freiburg. Abbildung 21 zeigt die mögliche Dampfproduktion an einem sonnigen Sommertag mit ebendem Kollektor. Sonnenstände wurden für Freiburg am 21. Juni zugrunde gelegt, als Ausrichtung des Kollektors wurde diejenige des Dachs angenommen, die optischen Kollektoreigenschaften (IAM und η_0) wurden mittels Raytracing berechnet. Die durchaus erhebliche Differenz zwischen den Kurven zur Kondensateinspeisung und Frischwassereinspeisung entsteht durch die bei Frischwasser notwendige Vorwärmung bis zum Siedepunkt.

Abbildung 21:
berechnete
Dampfproduktion
mit einer 100l-
Trommel in
Hochdorf bei
verschiedenen
Drücken mit
Kondensat- oder
Frischwassereinspeisung

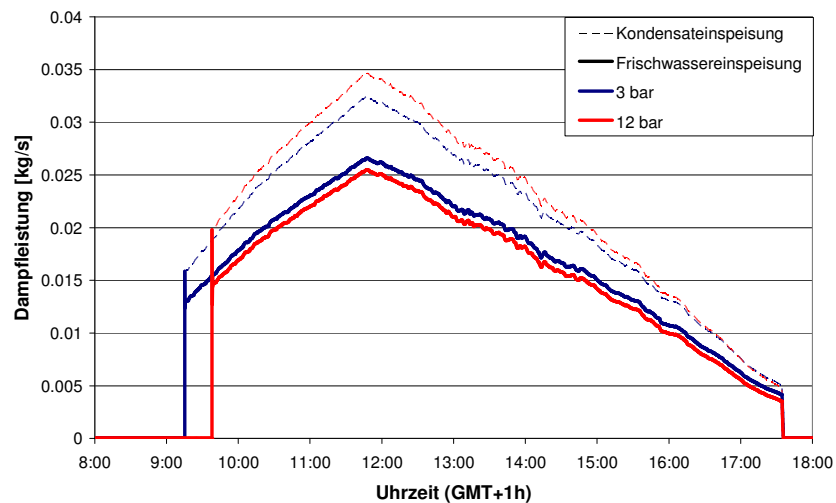


Abbildung 22 zeigt schließlich die gesamte Tagesdampfproduktion der Anlage bei verschiedenen Jahreszeiten und Betriebsdrücken in Abhängigkeit vom Trommelvolumen. Ein höherer Druck führt über die erhöhte Siedetemperatur zu einer verlängerten Aufheizphase und verringert dadurch die Tagesdampfproduktion. Das Trommelvolumen wirkt sich wegen der Wärmekapazität ebenfalls auf die Aufheizphase und darüber auf die Tagesproduktion aus. Der Effekt der Jahreszeit ist in dieser Grafik jedoch am stärksten zu sehen, da im Winter ab einem Trommelvolumen oberhalb von 175 l überhaupt kein Dampf mehr produziert werden kann.

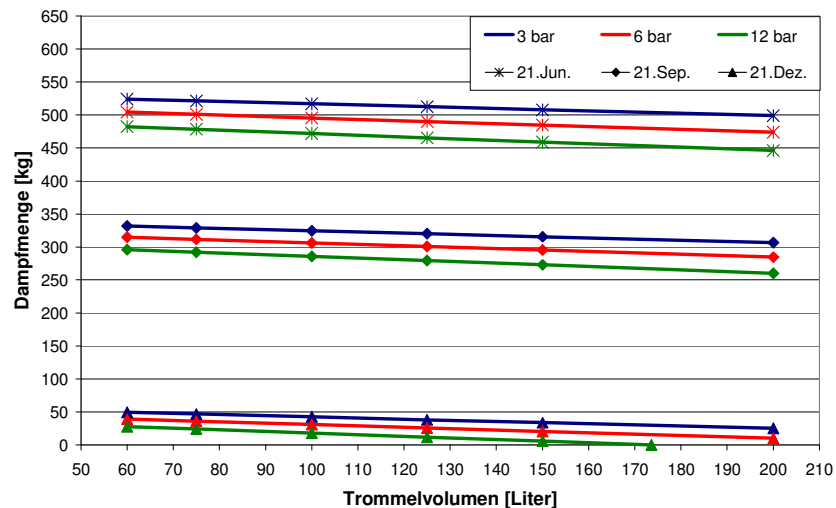


Abbildung 22:
gesamte über einen
Tag produzierbare
Dampfmenge bei
unterschiedlichen
Drücken und
Jahreszeiten

Bei diesen theoretischen Vorarbeiten wurde klar, dass die benötigten Komponenten einer Anlage, wie sie in Abbildung 19 zu sehen ist, den ursprünglich eingeplanten finanziellen Rahmen sprengen würden. Daher wurde das System reduziert, indem auf Kondensierung, Sammlung und Rückführung des Kondensats verzichtet wurde. Der Dampf sollte also abgeblasen und durch Einspeisung von Frischwasser ersetzt werden.

5.5.2 Auslegung

Verdränger

Die vielleicht größten Unbekannten bei der Direktverdampfung in einem horizontalen Fresnel-Kollektor sind die Auswirkungen der Zweiphasenströmungen auf das System im Betrieb.

Zweiphasenströmungen wurden bislang für Anwendungen in großen Kraftwerken bei Drücken deutlich über 30 bar und i.d.R. bei kleinen Rohrdurchmessern untersucht, wobei in den letzten Jahren insbesondere

durch die Untersuchungen des DLR auf der PSA im Rahmen des DISS-Projekts auch horizontale Rohre mit großen Durchmessern in Parabolrinnenkraftwerken hinzugenommen wurden. Für industrielle Prozessdampfanwendungen sind jedoch Drücke unter 30 bar interessant. Die Modelle für Strömungsformen, Wärmeübergänge, Schlupf, Benetzungshöhen etc. verlieren hier ihre Gültigkeit.

Problematisch für einen Fresnel-Kollektor könnten große Temperaturgradienten im Rohrquerschnitt, Schwingungen und starke Schwankungen im Druckabfall werden.

Ersteres tritt vor allem in Schichtströmungen auf, bei denen nur der untere Teil des Rohres mit Flüssigkeit benetzt ist. Ein großer Temperaturgradient im Querschnitt kann dazu führen, dass sich das Rohr wie eine Banane nach oben durchbiegt, wodurch zunächst das Glashüllrohr, dann aber auch die Aufhängungen zerstört werden können. Dies gilt es unbedingt zu vermeiden. Wegen der stark unterschiedlichen Dichten von Dampf und flüssigem Wasser bedeutet bereits ein Dampfmassegehalt von unter 5 % u.U. ein Dampfvolumenteil von über 90 %. Dieses Problem verschärft sich bei niedrigeren Drücken.

Schwingungen treten eher bei Schwall- und Pfropfenströmungen auf. Wie stark sie im Betrieb auftauchen und wie robust das System gegenüber Schwingungen ist, soll im Laufe des Betriebs beobachtet werden.

Große Schwankungen im Druckabfall würden eher bei längeren Kollektorsträngen mit größerem Dampfgehalt am Kollektorende erwartet. Bei der Anlage in Hochdorf wurde am Eintritt und Austritt jeweils ein Drucksensor installiert, um den Druckabfall zu beobachten.

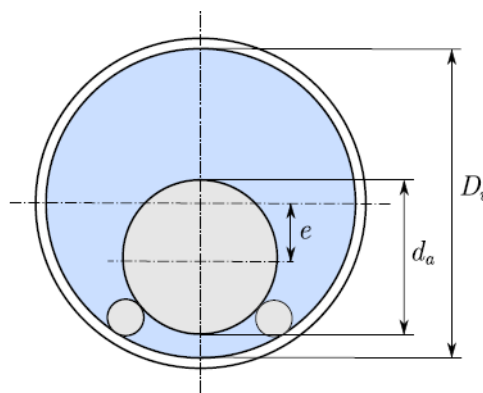
In einer Masterarbeit [Lou09] wurde das System in den gängigen Zweiphasenmodellen abgebildet, indem diese in den niedrigen Druckbereich extrapoliert wurden. Die Vorhersagen der Modelle wichen erwartungsgemäß sehr stark voneinander ab. Dennoch konnte über eine Worst-Case-Untersuchung ein Hinweis auf geeignete Strömungsgeschwindigkeiten zur Vermeidung von Schichtströmungen erarbeitet werden.

Dadurch wurde leider klar, dass bei der geplanten Anlage eine Schichtströmung nur durch eine sehr starke Pumpe mit hoher parasitärer elektrischer Leistung sowie mit hohem Volumenstrom und daraus resultierend mit sehr niedrigem Dampfgehalt am Kollektoraustritt vermieden werden könnte. Die Pumpe wäre teuer, ihr Stromverbrauch hoch und der niedrige Dampfgehalt am Austritt nachteilhaft. Darüber hinaus wären am Eintritt der Dampftrommel sehr hohe Dampfgeschwindigkeiten zu erwarten,

die durch Mitreißen von Tröpfchen den Lamellenabscheider zerstören können.

Ein Ausweg konnte in der Arbeit von Geskes [Ges97] in Form eines Verdrängers gefunden werden. Dieser besteht im Wesentlichen aus einem Zylinder im Rohr, der den zur Verfügung stehenden Querschnitt auf einen Ring verengt, dadurch die Benetzung der Rohrwand verbessert und auch bei gleich bleibendem Volumenstrom die Strömungsgeschwindigkeit im Absorber vergrößert, ohne sie jedoch am Eintritt in die Trommel zu erhöhen.

Abbildung 23:
Zylindrischer
Verdränger, die
kleinen Kreise links
und rechts unten
sind
Abstandshalter,
bzw. Füße, Grafik
aus [Lou09].



Funktionsprinzip

Die Anlage wurde so geplant, dass mit ihr sowohl ein Betrieb im Druckwasserumlauf als auch ein Betrieb mit Direktverdampfung möglich ist. Der eigentliche Kollektorkreislauf besteht aus Umwälzpumpe → Kollektor → Dampftrommel mit Abzweig für Dampf → Abzweig Magnetventil (normally closed) → Bypass Luftkühlung → Einspeisestelle → Umwälzpumpe. Wird der Kollektor in Betrieb genommen, so heizt sich dieser Kreislauf auf. Der Betriebsdruck liegt beim Aufheizen bereits deutlich über Umgebungsdruck und die Dampftrommel ist vollständig mit Wasser gefüllt.

Für den Verdampfungsbetrieb wird das Ausdehnungsgefäß mit einem Handventil abgeklemmt. Damit wird vermieden, dass beim Verdampfen das Ausdehnungsgefäß mit Wasser vollläuft. Dies führt jedoch dazu, dass der Druck beim Aufheizen steigt und gelegentlich durch Ablassen kleinerer Wassermengen über das Magnetventil entspannt werden muss.

Erreicht der Kreislauf eine Temperatur, die über 100°C aber noch unterhalb des Siedepunktes beim aktuellen Betriebsdruck liegt, so wird das Magnetventil geöffnet und ca. die Hälfte des Trommelinhalts in das Speisewasserbehältnis entleert. Dadurch sinkt der Druck auf den

Dampfdruck bei aktueller Temperatur ab und der entstehende Leerraum in der Trommel füllt sich mit Dampf.

Nun beginnt der Systemdruck und die Temperatur zusammen wieder anzusteigen, bis sich ein Überströmventil am Dampfausgang der Trommel öffnet. An diesem Überströmventil wird letztlich der Betriebsdruck und die Betriebstemperatur eingestellt. Fällt der Druck im System ab, so schließt sich das Ventil, bis der Druck die Schwelle wieder erreicht.

Das rezirkulierte Wasser kann über einen Bypass durch ein Luftkühlungsgerät geführt werden, falls Kavitation an der Pumpe auftritt. Zwischen diesem Bypass und der Umwälzpumpe steht schließlich noch die Einspeisung. An diese Position platziert hilft das kühlere Speisewasser zusätzlich bei der Kavitationsvermeidung in der Umwälzpumpe.

Wird die Anlage nach Verdampfungsbetrieb abgefahren, so muss der Dampfraum in der Trommel zügig mit flüssigem Wasser gefüllt werden. Kritisch für das System wäre ein Unterdruck, der sich bilden kann, wenn der Dampf in der halb gefüllten Trommel kondensiert und dadurch Druck und Temperatur abfallen. Daher sollte die Einspeisung des Wassers beim Abfahren zügig und unter Kontrolle vorgenommen werden.

Detailauslegung

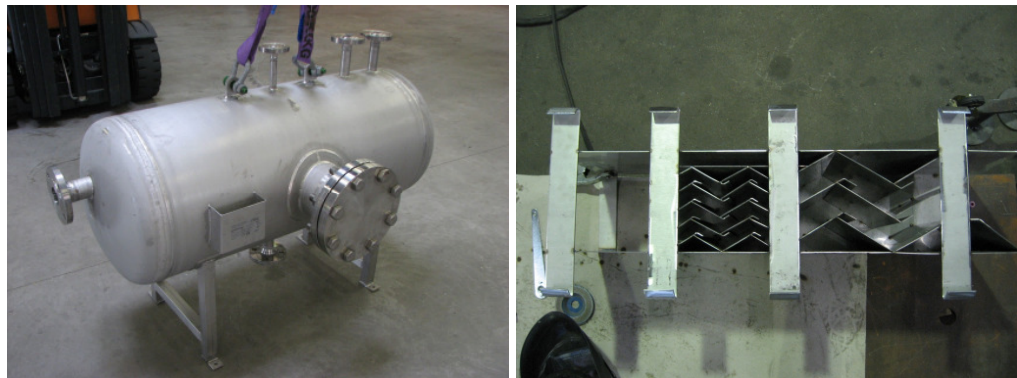
Aus der alten Anlage konnte die Umwälzpumpe, das Ausdehnungsgefäß, das Vorgefäß zum Ausdehnungsgefäß, die Füllpumpe, das Rückschlagventil, ein Drucksensor, die beiden Temperatursensoren am Kollektorein- und -ausgang, die Temperatursensoren für Umgebung und Pumpengehäuse, das Pyrheliometer, das Pyranometer, das Lüftungsgerät, zwei Druck- und zwei Temperaturanzeigen, sowie die Entlüfter und ein Teil der Edelstahlverrohrung aus der alten Pumpengruppe (V4A) verwendet werden. Die längeren, geraden Stücke der alten DN25-Edelstahl-Verrohrung wurden für den Verdränger verwendet.

Durch Verwendung von Edelstahlrohren konnte auf eine Entsalzung des Frischwassers verzichtet werden, nicht jedoch auf eine Enthärtung. Neben der Enthärtungsanlage wurden zur Einspeisung ein Speisewasserbehälter und eine Speisepumpe benötigt. Die Speisepumpe musste hierbei den Anforderungen genügen, zum einen von Umgebungsdruck auf einen variablen Betriebsdruck zwischen 2 und 16 bar fördern zu müssen und zum anderen bei einem geringen Volumenstrom von unter 130 l/h genau regelbar zu sein. Als Enthärtungsanlage wurde die JUDO BioQuell Mini der Firma JUDO Wasseraufbereitung GmbH gewählt. Die Speisepumpe ist eine Kolbenmembranpumpe. Sie wird mit einem Frequenzumrichter gesteuert, damit der Speisewassermassestrom stets dem entnommenen

Dampfmassestrom entspricht. Starke Abweichungen hier können zu einer Entleerung oder Überfüllung der Trommel führen. Hierzu wurde auch eine Messung des Dampfmassestroms benötigt, wofür ein Wirbelfrequenzmessgerät ausgewählt wurde.

Die Dampftrommel fungiert in erster Linie als Abscheider. Hier wurde die Trommel selbst, innen ein Lamellenabscheider, dazu eine Füllstands-, Temperatur- und Druckmessung benötigt. Die Trommel ist aus 6 mm starkem V4A-Edelstahl geschweißt und hat einen Volumeninhalt von ca. 230 l, wobei sie im Verdampfungsbetrieb nur zur Hälfte (ca. 115 l) mit flüssigem Wasser gefüllt ist. Eine Füllstandssonde wird verwendet, die den Füllstand in mm oder relativ zur Gesamthöhe auszugeben vermag. Da der Querschnitt der Trommel ein Kreis ist, musste eine Eichung auf Liter an der Trommel später selbst vorgenommen werden. Der Lamellenabscheider wurde ebenfalls aus Edelstahlblech gebogen und geschweißt (siehe Abbildung 24). Die Abscheidung geschieht über Umlenkungen des Dampfstroms und Prallbleche an den Umlenkungen. Der Eingang ist in einem der Klöpperböden der liegenden Trommel, der Dampfausgang ist am anderen Ende oben, der Wasserausgang für die Rezirkulation dementsprechend unten.

Abbildung 24:
Dampftrommel
(links) mit
Lamellenabscheider
(rechts).



Als Verdränger wurde in das Schott-Absorberrohr ein DN25-Edelstahlrohr eingesetzt. Damit dieses Rohr nicht durchströmt werden kann, wurde es vorne und hinten geschlossen. Mit Rundstangen (10mm Durchmesser) als Füße und Abstandhalter wurde es von der Rohrwand abgehalten. Zur Vermeidung von Wandern oder Aufschwimmen wurde das Rohr in regelmäßigen Abständen angebohrt, damit es sich mit Wasser füllen und die Luft entweichen kann, ohne dass der Wasserinhalt jedoch an der Strömung teilnimmt.

Da die Druckverluste im Zweiphasenbereich höher erwartet werden als im einphasig flüssigen Bereich, und da die Umwälzpumpe etwas

unterdimensioniert ist, wurde die Verbindung von Kollektorausstritt und Dampftrommel mit einem größeren Rohrdurchmesser (DN 50) und mit weiten 90 °-Bögen ausgeführt. Das Zweiphasengemisch wird nun mit nur geringem Gefälle, auf möglichst kurzem Wege aus dem Absorberrohr in die Dampftrommel geführt. Die Dampftrommel wurde bewusst hoch (ca. 3 m) aufgestellt. Zwar hat dies den Vorteil, dass die Dampfphase besser vom Absorber in die Trommel transportiert werden kann, denn ein großer Höhenunterschied verbunden kleinen Krümmungsradien in den 90 °-Bögen birgt die Gefahr, dass sich die Dampfphase insbesondere bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten von der Strömung abtrennt und oben im Absorber sammelt. Doch hat die Höhe der Dampftrommel primär den Zweck, Kavitation in der Umwälzpumpe zu vermeiden.

Der NPSH-Wert einer Pumpe gibt an, wie tief die Pumpe unterhalb einer Stelle mit Umgebungsdruck liegen sollte, damit auf der Saugseite keine Kavitation entsteht. Dabei wird allerdings 20 °C kühles Wasser angenommen. In unserem Fall liegt die Dampftrommel im Verdampfungsbetrieb genau auf dem Dampfdruckniveau, das bei 20 °C ca. 990 mbar unter Umgebungsdruck liegt. Daher müsste der Höhenunterschied zwischen Trommel und Pumpe streng genommen gegenüber dem NPSH-Wert um zusätzliche 10 m erhöht werden, damit der geostatische Druck diese Differenz ausgleichen kann.

Dies war bei den gegebenen bauseitigen Möglichkeiten schlicht nicht möglich. Daher wurde bewusst das Risiko einer Teilkavitation in Kauf genommen und die Trommel „wenigstens“ auf 3 m Höhe gesetzt.

Abbildung 25:
Dampftrommel auf
Gestell in 3 m
Höhe.



Zur Ausdehnungskompensation wurden Flexschläuche, Fixpunkte und Schienengleiter genutzt.

Die Dampftrommel ist über ein Magnetventil (normally closed) mit dem Speisewasserbehälter verbunden, so dass sie bei Verdampfungsbeginn zügig zur Hälfte entleert werden kann. Am Dampfausgang befindet sich ein manuell im Bereich 2 – 17 bar verstellbares Überströmventil, an dem der Betriebsdruck mit einer Schraube eingestellt werden kann.

Drucksensoren wurden am Ein- und Ausgang des Absorberrohrs, an der Dampftrommel sowie auf Höhe der Umwälzpumpe auf der Saugseite platziert. Temperatursensoren (Pt100) wurden ebenfalls am Ein- und Ausgang des Absorberrohrs, an der Dampftrommel sowie auf Höhe der Umwälzpumpe auf der Saugseite nach der Einspeisestelle platziert. Zusätzlich wird die Temperatur der Umgebung gemessen, sowie die Temperatur im Pumpengehäuse und an den vier Solarsensoren.

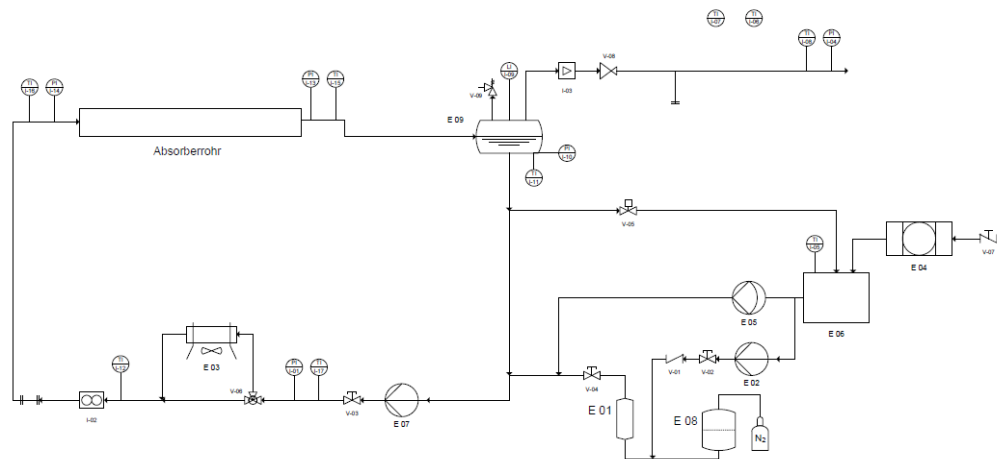
Für die vielen Sensoren wurde die Messwerterfassung (Agilent) der alten Anlage übernommen, jedoch um eine Multiplexer- und eine Aktoren-Karte erweitert. Über die Aktorenkarte wird analog (0-10 V) der Frequenzumrichter der Speisepumpe und das Dreiwegeventil. Über den digitalen Ausgang der

Karte wird das Magnetventil geschaltet, sowie die Speisepumpe an- und ausgeschaltet.

5.5.3 Aufbau

Im Frühjahr und Sommer 2009 wurde diese Testanlage (Schema siehe Abbildung 26) dann auf dem Dach der neuen PSE-Werkstatt in Freiburg-Hochdorf errichtet. Hierzu wurde zunächst eigens das Dach zum Schutz der Dachhaut mit Schutzmatte und Betonplatten auf den Laufwegen und der Stellfläche der Pumpengruppe versehen. Eine Außentreppe wurde angebaut, damit die Anlage für Besucher und Betreiber zugänglich ist.

Abbildung 26:
Anlagenschema der
Demonstrations-
anlage zur
Direktverdampfung
in Freiburg-Hochdorf



Als schwierig bei der Installation der Anlage erwies sich die Kompensation der thermischen Längenausdehnung der Verrohrung. Zunächst wurden Angularkompensatoren verwendet, mit denen die Anlage im September 2009 in Betrieb genommen werden konnte. Die Kompensatoren hielten den hohen Betriebsdrücken jedoch nicht stand und mussten ausgetauscht werden. Hierzu musste die Anlage noch einmal stillgelegt werden. Es wurden daraufhin im Frühjahr 2010 Welschläuche eingebaut. Bis dahin konnten keine Tests bei Drücken über 3 bar durchgeführt werden.

5.5.4 Betriebserfahrungen und Messergebnisse

Abbildung 27:
Dampfparameter
bei Dampferzeugung
am
19.10.2009.

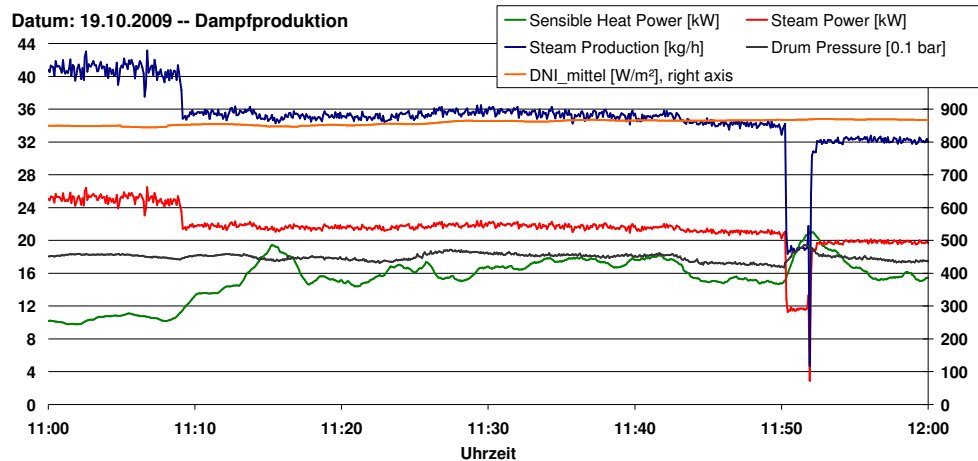
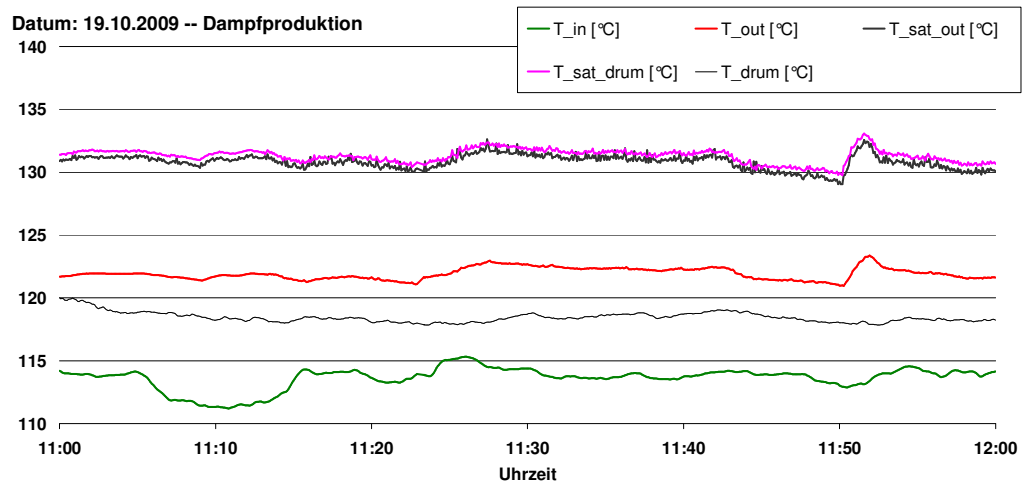


Abbildung 28:
Temperaturen im
System bei
Dampferzeugung
am 19.10.2009.



Am 19.10.2010 wurde die erste Messung mit Direktverdampfung durchgeführt. Messergebnisse sind in Abbildung 27 und Abbildung 28 zu sehen. Aus den Betriebserfahrungen in Hochdorf konnten eine Vielzahl von Erfahrungen gewonnen werden, allerdings wurden auch neue Fragen aufgeworfen. Im Folgenden sollen die wesentlichen Erkenntnisse und offenen Fragen beschrieben werden.

Gleichmäßige Dampfabgabe

Bei den gefahrenen Verdampfungstests war es möglich (siehe Abbildung 27), eine gleichmäßige Dampfproduktion über längere Zeiträume zu

ermöglichen. Hierfür musste das System jedoch laufend beobachtet werden, da sowohl die Einspeisung von Frischwasser als auch die Einstellung des Betriebsdrucks am Überströmventil gelegentlichen Eingriff seitens des Operators bedarf.

Wärmedämmung

Aus Kostengründen wurde in Hochdorf auf eine Isolierung der Rohrleitungen zunächst verzichtet. Die daraus resultierenden Wärmeverluste in der Verrohrung führen im Verdampfungsbetrieb zu einer Absenkung der Eingangstemperatur am Kollektor. Daher wird ein Teil der Kollektorstrecke dafür benötigt, das Wasser erst wieder auf Siedetemperatur zu heizen. Dieser Teil steht damit für die Dampferzeugung nicht zur Verfügung, wodurch sich die Dampfleistung des Kollektors reduziert. Der Effekt hängt von der Differenz zwischen Umgebungstemperatur und Verdampfungstemperatur ab und betrug bei den in Abbildung 27 zu sehenden Messungen am 19.10.2009 etwa 16 kW Vorwärmleistung. Mit Wärmeisolierung an den Rohren hätte demnach 75% mehr Dampf produziert werden können.

Eine Optimierung der Anlage auf Effizienz in der Dampferzeugung war für die Untersuchungen in diesem Projekt zwar nicht notwendig. Eine Nachrüstung der Wärmedämmung wird dennoch empfohlen, da durch die dann höheren Dampfproduktionen nicht nur die Messdaten an Qualität (Signal-zu-Rausch-Verhältnis) gewinnen, sondern insbesondere da deutlich geringere Wärmeverluste im System die Messperiode sowohl im Tagesverlauf (verringerte Aufheizzeit) als auch im Jahresverlauf (Messungen im Spätherbst und Winter möglich) erheblich erweitern würden.

Trommel dämpft kurzzeitige Transienten

Die Dampftrommel vermag kurzzeitige Transienten zu dämpfen. Physikalisch wird dies durch eine negative Rückkopplung erklärbar.

Eine Schwankung der Dampfproduktion im Kollektor, etwa durch einen Wolkendurchgang, führt dazu, dass der Dampfmassenstrom, der der Trommel am Dampfausgang entnommen wird, nicht mit dem der Trommel vom Kollektor zugeführten Dampfmassenstrom übereinstimmt. Es kommt zu einer Druckschwankung und darüber zu einer ebensolchen Schwankung der Sattdampf Temperatur. Die thermische Trägheit der Trommel mit ihrem Wasserinhalt wirkt einer solchen Temperaturschwankung entgegen und kompensiert diese.

Ist die Sattdampf Temperatur also plötzlich kühler als die Trommel mit ihrem Wasserinhalt, so produziert die Trommel kurzzeitig den „fehlenden“ Dampf

nach. Der gleiche Effekt funktioniert auch umgekehrt, wenn die Sattdampf Temperatur ansteigt und ein Teil des Dampfes an der kühleren Trommel auskondensiert. Dieser Effekt wird jedoch erheblich abgeschwächt durch den beobachteten Effekt einer Temperaturschichtung in der Trommel.

Temperaturschichtung in der Trommel

Durch Messung der Temperatur im unteren Teil der Trommel und gleichzeitiger Messung des Drucks in der Trommel ist über einen Vergleich der aus dem Druck berechneten Sattdampf Temperatur mit der gemessenen Temperatur ein Rückschluss auf eine Temperaturschichtung möglich. Die Messspitze des Temperatursensors in der Trommel befindet sich ca. 10 cm oberhalb des Trommelbodens und damit bei halb gefüllter Trommel deutlich unterhalb der Wasseroberfläche. Einer Temperaturschichtung kann insbesondere bei den bisherigen niedrigen Masseströmen im Testbetrieb in der Trommel erwartet werden. Ein Hinweis darauf ist nicht nur die Differenz zwischen den gemessenen Temperaturen am Kollektorausgang und in der Trommel, sondern eben auch die Differenz der berechneten Sattdampf Temperatur zur gemessenen Temperatur. Beides ist in Abbildung 28 gut zu sehen. Die gemessene Trommeltemperatur liegt etwa 4 °C unterhalb der Kollektorausgangstemperatur und etwa 13 °C unterhalb der berechneten Dampf Temperatur.

Schwierigkeiten bei der Ermittlung von Leistung und Wirkungsgrad

Die momentane Kollektorleistung ist bei Dampfbetrieb unmöglich zu ermitteln gewesen. Dies hat gleich mehrere Gründe. Zum einen kann die Verdampfungsleistung nicht direkt im Kollektor gemessen werden. Der Dampf wird der Trommel über ein Ventil entnommen, das seinerseits eine Hysterese besitzt. Ein Dampfaustausch zwischen Trommel und Kollektor ist in beide Richtungen möglich, der Schlupf ist nicht konstant. Wenn etwa bei einem Wolkendurchgang die Dampfproduktion im Absorberrohr abreißt und das Dampf volumen zusammenbricht, so kann auch Dampf aus der Trommel zurückgesogen werden.

Der zweite Grund ist der unbekanntes Temperaturunterschied zwischen Dampf und flüssigem Wasser. Im Gleichgewicht ist diese Differenz zwar Null, aber ein Gleichgewicht muss keineswegs vorliegen und die Messdaten an den Drucksensoren am Kollektorausgang und in der Trommel weisen auf eine deutlich höhere Dampf Temperatur als die an den betreffenden Stellen gemessene Wassertemperatur hin. Dies ist sehr gut in Abbildung 28 zu sehen. Hier zeigen die graue und die rosa Kurve die aus dem gemessenen Druck berechneten Sattdampf Temperaturen an, welche über den betrachteten Zeitraum an beiden Stellen durchgehend und übereinstimmend

über 130 °C lagen. Die gemessene Temperatur am Kollektorausgang liegt etwa 9 °C tiefer.

Die Nicht-Übereinstimmung könnte ein Hinweis auf eine Temperaturdifferenz zwischen Dampf und Flüssigphase sein, oder aber auch ein Hinweis auf einen systematischen Fehler in der Temperaturmessung, etwa aufgrund eines Wärmeaustauschs zwischen Tauchhülse und (nicht isoliertem) Rohr. Dies wird Untersuchungsgegenstand künftiger Messungen sein müssen.

Ein weiteres Problem stellt die unbekannte Dampffuchte dar, denn Wassertröpfchen im Dampf können die Vortexmessung beeinträchtigen. Da das Dampfrohr zwischen Trommel und Vortexgerät nicht wärmegeklämt ist, kondensiert ein Teil des Dampfes auf dem Weg zum Messgerät aus. Dadurch wird der Dampf feuchter und verliert an Qualität. Die Tröpfchen beeinträchtigen die Messung. Während der gesamten Messperiode 2010 konnten starke Schwankungen im Vortexsignal beobachtet werden.

Dampfqualität unbekannt

Die Restfeuchte des abgeschiedenen Dampfes ist unbekannt. Eine mögliche Abhilfe hierfür könnte neben der nachzurüstenden Wärmedämmung ein Drosselkalorimeter bieten. Durch eine Kombination aus Druck- und Temperatursensor kann unter bestimmten Umständen die Enthalpie des Dampfes bestimmt werden. Die Methode ist kostengünstig, funktioniert aber nur bei geringen Restfeuchten. Hierfür muss der Dampf durch eine Entspannung überhitzt werden, was nur gelingt, wenn die Restfeuchte gering ist und eine ausreichende Druckdifferenz zur Entspannung vorliegt. Im dann überhitzten, einphasigen Zustand besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Enthalpie und gemessenen Werten für Temperatur und Druck. Aus dieser Enthalpie lässt sich die Restfeuchte vor der Entspannung zurückrechnen.

Umwälzpumpe underdimensioniert

Einige der zuvor beschriebenen Effekte können mit einer stärkeren Umwälzpumpe durch Variation des Volumenstroms untersucht werden. Aus Kostengründen wurde die Pumpe aus dem alten System übernommen. Mit maximal 13,6 Litern pro Stunde pro m² Aperturfläche ist diese Pumpe jedoch sehr schwach und wurde bei fast allen Versuchen ungedrosselt gefahren.

Eine stärkere Umwälzpumpe mit Frequenzumrichter würde hier Abhilfe schaffen. Allerdings sind solche Pumpen insbesondere wegen der hohen Temperatur- und NPSH-Wert-Anforderungen sehr hochwertig.

Interessant wäre etwa die Untersuchung der Temperaturschichtung in der Trommel bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Auch könnte untersucht werden, ob sich andere Strömungsformen spürbar auf die Anlage auswirken.

Das Hauptproblem stellt jedoch die Kavitation bei niedrigen Betriebsdrücken (unter 6 bar) dar, dennoch bis runter auf 2 bar betrieben, die hörbar aufgetreten ist. Es steht zu befürchten, dass die Pumpe diese Belastungen nicht mehr lange mitmachen wird. Beobachtbar ist bei Auftreten der Kavitation auch ein weiterer Rückgang des ohnehin niedrigen Volumenstroms.

Ablagerungen in den Rohren

Als Speisewasser für die Anlage wurde Leitungswasser enthärtet. Die Enthärtungsanlage funktionierte jedoch bisweilen fehlerhaft. Im Speisewasser konnten stichprobenhaft mittels Teststreifen erhöhte Wasserhärte nachgewiesen werden. Die Erhöhung wird durch die Dampfentnahme bewirkt. Der Kalkgehalt konzentriert sich auf. Das Gerät wurde zwar anschließend gewartet, jedoch sind Ablagerungen in den Rohren bereits beobachtbar.

Mögliche Leistungsverluste hieraus sollten untersucht werden und der Härtegrad strenger kontrolliert werden. Eine Kalkschicht im Absorberrohr senkt den Wärmeübergang auf das Wasser drastisch, erhöht dadurch die Außentemperatur am Absorberrohr und damit die Wärmeverluste im Betrieb.

6 Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung

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

- In AP 1 wurde das Konzept einer spielfreien Verbindung entwickelt.
- In AP2 wurde eine Qualitätskontrolle für die Primärspiegelfertigung erfolgreich getestet. Die Testergebnisse für die Primärspiegelqualität sind zufriedenstellend.
- In AP3 wurde das Lichtwellenleiterkonzept erfolgreich getestet. Mit nur wenigen Verbesserungswünschen kann dieses System zukünftig alternativ eingesetzt werden und verspricht Vorteile hinsichtlich Wartung und Temperaturbelastbarkeit. Temperaturmessungen am bestehenden Testsystem verbessern die Einschätzung solcher Belastungen.
- In AP4 konnte die Funktionalität des neuen Antriebs nachgewiesen werden. Konkrete Nachbesserungswünsche an den Hersteller wurden identifiziert.
- Ebenfalls in AP4 wurden Weiterentwicklungen der Steuerung und der Sensorik vorgenommen.
- In AP5 wurde ein Testsystem zur Direktverdampfung aufgebaut. Erste wichtige Betriebserfahrungen mit Dampf konnten gesammelt werden.

7 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

7.1 Marktpotenzial von Prozessdampf als häufige Form industrieller Prozesswärme

Ein häufig verwendeter Wärmeträger in industriellen Prozessen ist Dampf. Trockener Dampf eignet sich aufgrund des gegenüber flüssigem Wasser deutlich niedrigeren Wärmeübergangs sehr gut für den Wärmetransport über längere Leitungswege. Nasser Dampf mit seinem im Vergleich zu flüssigem Wasser höheren Wärmeübergang und der bei Kondensation gleichbleibenden Temperatur bietet Vorteile bei der Wärmeübertragung.

Obwohl es schwierig ist, verlässliche Zahlen aus der Industrie zu erhalten, wird der Anteil der industriellen Anwender, die Dampf als Wärmeträger nutzen auf ca. 50% geschätzt. Daher bietet eine auf diese potenziellen Nutzer solarer Prozesswärme zugeschnittene Lösung mit abgesenkten Investitionskosten die Chance, den Kundenkreis erheblich zu erweitern. Allein für die EU25-Länder würde sich damit aus der Schätzung in Abschnitt 4.2 ein Potenzial für solare Direktverdampfung in der Industrie mit einer Leistung von 50-63 GW_{th} bzw. mit einer Kollektorfläche von 70-90 Mio m² ergeben. Darüber hinaus ist der Zielmarkt dieser Technologie weit größer als derjenige der EU25-Staaten, denn insbesondere Länder im Sonnengürtel der Erde bieten die Möglichkeit geringer solarer Wärmegeheimungskosten.

Dampf kann im Fresnel-Kollektor der Firma PSE AG/Industrial Solar GmbH direkt erzeugt werden. Gegenüber einem herkömmlichen Zweikreisprinzip (Thermoölkreis und Wasser-/Dampfkreis), wie er beispielsweise in den Parabolrinnenkraftwerken in USA und Spanien eingesetzt wird, muss bei der Direktverdampfung nur noch ein Wasser-/Dampfkreis den Prozess durchlaufen. Die Anschaffungskosten und Leistungsverluste zum Zweikreisprinzip gehöriger Komponenten wie dem Wärmetauscher entfallen ebenso wie die Nachteile durch den Thermoöleinsatz (Wirkungsgradbegrenzung und Umweltbelastung).

Mit dem solar erzeugten Direktdampf bieten sich der Industrial Solar GmbH zahlreiche Anwendungsfelder. Zu den vielen Industriezweigen, in denen Prozessdampf verwendet wird, zählen die Papier-, Textil oder Lebensmittelindustrie. Ebenfalls benötigt wird Prozessdampf in Krankenhäusern, Wäschereien und in der chemischen Industrie. Zum einen gibt es also einen großen Bedarf an Prozessdampf in einer Vielzahl von Industrieprozessen. Zum anderen kann aufgrund des dreimal besseren Wärmeübergangs von Dampf an Wasser (k-Wert in W/m²K bei erzwungener Konvektion) gegenüber einem Wasser-Wasser-System die entsprechende Wärmetauscherfläche eines Zweikreissystems eingespart werden.

Zur Erschließung dieses Marktes hat sich die Firma PSE AG die Erforschung der Direktverdampfung an ihren Fresnel-Kollektoren als Ziel gesetzt. Eine Untersuchung der solaren Direktverdampfung im Fresnel-Kollektor fand im Rahmen dieses Projektes seit 2009 an der zu diesem Zweck gebauten Versuchsanlage der PSE AG in Freiburg-Hochdorf statt. In diesem DBU-geförderten Projekt wurden die Herausforderungen im Betrieb erforscht. Aufgrund des Prototypenstatus der gewählten Anlagenkonfiguration wurden auch die eingesetzten Komponenten auf ihre Funktionsweise und Eignung getestet.

7.2 Ökologische Verbesserung laufender industrieller Prozesse

Zum jetzigen Zeitpunkt wird Prozesswärme in der Industrie nahezu ausnahmslos durch Verbrennung fossiler Brennstoffe erzeugt. Wenn also die industrielle Prozesswärme in den EU25-Ländern rund ein Fünftel (siehe Abschnitt 4.2) des Endenergieverbrauchs verursacht, dann zeichnet diese damit auch geschätzt für rund ein Fünftel der CO₂-Emissionen verantwortlich.

Für Prozesswärme nutzende industrielle Betriebe ist die Neuanschaffung einer kompletten Anlage mit Nutzung regenerativer Energien i.d.R. indiskutabel teuer. Wenn allerdings bei Nutzung der vorhandenen Anlage der Treibstoffverbrauch teilweise oder ganz solar ersetzt werden kann, ohne dass dafür ein Eingriff in den laufenden Prozess notwendig wird, so sinken die Investitionskosten für den Betrieb erheblich so dass eine Fuel-Saver-Variante mit Hybridbetrieb unter Nutzung der bereits vorhandenen Dampfnetze wirtschaftlich darstellbar wird. Hybridsysteme, die sowohl fossile Energien als auch Solarenergie nutzen, bieten auf diese Weise eine ökologische Entlastung.

Da ein direktverdampfender solarer Prozesswärmekollektor den Dampf auch in ein bestehendes Dampfnetz einspeisen kann, ohne dass dafür der Prozess lange unterbrochen werden muss, kann durch die Nachrüstung eines Kollektors der Treibstoffverbrauch und damit CO₂-Ausstoss industrieller Betriebe unter deutlich reduzierten Investitionskosten gesenkt werden.

8 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

1. Die Vorhabensergebnisse wurden regelmäßig in internationalen Fachgremien diskutiert.
 - European solar thermal technology platform ESTTP (www.esttp.org).
2. Veröffentlichungen auf nationalen und internationalen Kongressen:
 - Zahler et al., *Direct Steam Production in a Linear Concentrating Fresnel Collector*, 4th European Solar Thermal Energy Conference, München, 25.-26. Mai 2009
 - Berger et al., *Industrial Solar Fresnel Process Heat Collectors for Industrial Applications and Solar Cooling*, Solar Paces, 15th International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies, Berlin, 15.-18. September, 2009
 - Berger et al., *Demonstration of Direct Steam Generation in a Industrial Solar Linear Fresnel Collector*, Solar Paces, 16th International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies, Perpignan, Frankreich, 21.-24. September, 2010

9 Fazit

Mit dem Fresnel-Kollektor der PSE AG / Industrial Solar GmbH konnte erstmals Dampf direkt erzeugt werden. Hierfür wurde eine Testanlage aufgebaut, an der seit Fertigstellung Messungen bei unterschiedlichen Systemdrücken durchgeführt werden. Wichtige Komponenten wie Dampfabscheider oder Verdränger wurden hierfür entwickelt und im Einsatz erfolgreich getestet.

Auch weitere Schlüsselkomponenten konnten in diesem Projekt weiterentwickelt werden. Lichtwellenleiter wurden als alternative Sensoren zur Kalibrierung der Antriebe erfolgreich getestet. Nachdem bereits die Messtechnik am Kollektor auf CAN-Bus umgestellt worden war, wurde in diesem Projekt eine CAN-Bus-basierte Antriebssteuerung, sowie ein Magnetband als kostengünstige Alternative zur Positionsbestimmung im Einsatz am Prototyp getestet. Dabei konnte sich die Technologie bewähren und gleichzeitig Verbesserungspotenzial identifiziert werden.

Für die Produktion der Primärspiegel wurde eine Qualitätskontrolle getestet und erstmals bei der Produktion zweier Kollektoren eingesetzt. Die erzielte Qualität der Primärspiegel erfüllte unsere hohen Erwartungen.

Wenngleich inzwischen der Fresnel-Kollektor der PSE AG durch die Industrial Solar GmbH kommerziell angeboten wird, besteht nun auch Aussicht darauf, in Zukunft direktverdampfende Kollektoren anbieten zu können, die ihren Dampf in Dampfnetze einspeisen können. Auf diese Weise ist eine Erweiterung des Kundenkreises möglich. Die Tests sollen fortgeführt werden. Die getestete Qualitätskontrolle für die Primärspiegel soll in die Fertigung integriert werden.

Das Hauptziel dieses Vorhabens war die technische Machbarkeit unter Beweis zu stellen. Dieses Ziel ist voll und ganz erreicht, so dass wir mit dem Ergebnis zufrieden sind.

10 Literaturverzeichnis

- [Alk08] Alketib, Q.: *Auslegung von Systemkomponenten zur solaren Direktdampferzeugung mit einem linear konzentrierenden Fresnel-Kollektor*. Technische Universität Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik, Diplomarbeit, 2008.
- [Ges97] Geskes, P.: *Zweiphasenströmung in Ringkanälen solarer Dampferzeugerrohre*. Fortschritt-Berichte VDI (Reihe 7 Nr. 347), Düsseldorf, 1997.
- [Lou09] Louw, J.W.: *Solare Direktverdampfung von Wasser im horizontalen Absorberrohr eines linearen Fresnel-Kollektors*. Hochschule Offenburg, Fachbereich Maschinenbau, Studiengang Mechanical Design and Engineering, Masterarbeit, 2009.
- [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.