

AccaDueO

Theorie und Experiment zur Strömungsverteilung in einem Harfenabsorber

Stephan von Rotz^a, Felix Flückiger^a, Ueli Frei^a
Leo Engeler^b, Basso Salerno^b

- a. Institut für Solartechnik SPF, HSR Hochschule für Technik Rapperswil,
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil
b. Firma Salerno Engeler GmbH, Schwengiweg 12, CH-4438 Langenbruck

Zusammenfassung

Die Strömungsverteilung in einem Harfenabsorber mit 60 Absorberstreifen wird bei einem Durchsatz von 20-40 l/h/m² gemessen und mit einem theoretischen Modell verglichen. Die Strömungsgeschwindigkeit wird aufgrund der Temperaturspreizung der Absorberstreifen bestimmt. Die Messungen ergeben drei Befunde: Bei mehrheitlich laminarer Strömung in den Sammelrohren ergibt sich eine Strömungsverteilung, welche gut mit dem theoretischen Modell übereinstimmt. Bei mehrheitlich turbulenter Strömung ist die Verteilung ausgeglichener, als das Modell voraussagt. In der Übergangsphase zirkuliert das Fluid in verschiedenen Abschnitten des Kollektors chaotisch. Der Einfluss auf den Kollektorwirkungsgrad ist gering. Auf die Betriebssicherheit der Anlage konnte während der gesamten Messphase kein negativer Effekt festgestellt werden.

Für eine definitive Empfehlung, Anlagen mit ähnlicher Feldverschaltung zu realisieren, ist die vorliegende Untersuchung nicht ausreichend. Weiterführende Arbeiten an vergleichbaren Anlagen werden dringend empfohlen.

Inhalt

Zielsetzung	2
Beschrieb der Solaranlage	2
Beschrieb der Messanlage	4
Experiment zur Strömungsverteilung	5
Theoretisches Modell	10
Interpretation der Temperaturmesswerte	12
Infrarotaufnahmen	15
Schlussfolgerungen	16
Referenz	16

Zielsetzung

Die Strömungsverteilung in Harfenabsorbern hat einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und die Betriebssicherheit einer Solaranlage. Eine umfangreiche Literaturstudie hat gezeigt, dass der aktuelle Wissensstand zum Thema Strömungsverteilung in Harfenabsorbern sehr dürftig ist [1]. Trotzdem werden von verschiedenen Herstellern solche Anlagen realisiert. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, die Problematik in der Praxis zu beurteilen und die Berechnungsmethode zu überprüfen.

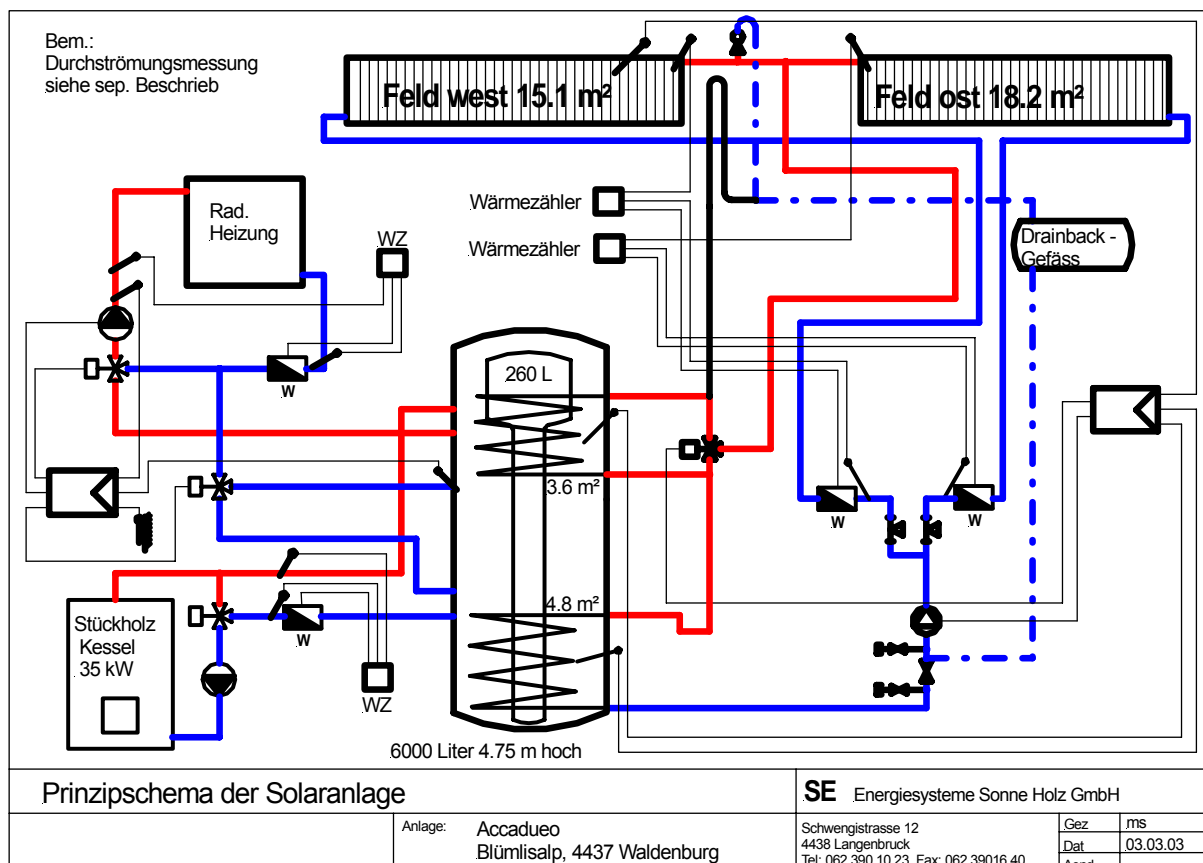
Anlagebeschreibung

Funktionsprinzip

Die Anlage funktioniert nach dem „Drainback-Prinzip“; ohne aktive Pumpe bleibt der Kollektor leer. Sobald der Absorber $> 4\text{ K}$ zum Speicher unten aufweist, schaltet die Pumpe ein. Das Medium wird direkt aus dem Drainback-Gefäß angesaugt und in die Kollektoren gepumpt. Die Luft im Kollektor wird ins Drainback-Gefäß gedrückt. Die beiden Kollektorfelder werden parallel, mit derselben Umwälzpumpe betrieben.

Sinkt die Warmwassertemperatur unter den Sollwert ab, wird der Durchsatz im Kollektorkreis reduziert und der obere Wärmetauscher wird ebenfalls durchströmt. Dank dem reduzierten Durchsatz im Kollektorkreis, steigt die Kollektortemperatur an und ermöglicht die unmittelbare Bereitstellung von Brauchwarmwasser.

Prinzipschema:



Komponenten

Kollektorfeld

Orientierung:	35° West, Anstellwinkel: 30°
Abmessungen:	Feld West: 2 m * 8.15 m Absorberfläche 15.1 m ² , 68 Absorberstreifen parallel verschaltet Feld Ost: 2.8 m * 7.3 m Absorberfläche: 18.2 m ² , 60 Absorberstreifen parallel verschaltet
Absorber:	Absorberstreifen aus Kupfer mit Schwarzchrom-Beschichtung Rohrdurchmesser: aussen 8 mm, innen 7 mm
Verschaltung:	Alle Streifen vertikal parallel geschaltet an Sammelrohren mit Durchmesser 35/32mm
Aufbau:	Sammelkasten durchgehend ohne Zwischenunterteilungen, Aufbau und Dämmung mit branchenüblicher Technik und Materialien.

Kombispeicher

Inhalt:	6000 Liter
Einbauten:	Wassererwärmer mit einem Inhalt von 275 Liter
Wärmetauscher:	Wärmetauscher Solar: oben: 4.8 m ² , unten: 2 * 3.6m ² (Doppelwendel), Schichtlanze für Heizungsrücklauf
Dämmung:	untere Hälfte: 20 cm Glaswollmatten Obere Hälfte: >25cm Cellulosefaser

Solarkreislauf

System:	Drainback
Medium:	Wasser ohne Zusätze
Leitungen:	Kupfer Aussendurchmesser: 22 mm, 28 mm, 35 mm
Pumpe:	konventionelle Heizungspumpe
Drainback-Gefäß:	Spezialanfertigung, 65 Liter

Steuerung Solarkreislauf

Temperaturdifferenzsteuerung mit Drehzahlregelung für zwei Register (mit Umschaltventil)

Schaltkriterien: Delta T ein = 4 K, aus = 2 K

Maximalbegrenzung: wenn T-Speicher > 80 °C , dann Pumpe aus

Messanlage

Die Messdaten-Erfassung erfolgte mit zwei voneinander völlig unabhängigen Systemen.

Messgeräte für Durchfluss- und Strahlungsmessung

Wärmezähler: Enercal F2 Firma GWF 6002 Luzern
Datenkommunikation: M-Bus-Zentrale DR 60
Software: GWF-Read für M-Bus Testversion
Betreuung: durch SE Solar vor Ort

Messung der Temperaturen im Kollektor Feld ost

Sensoren: Pt100-Folienfühler von Minco (ca. 10 x 10 mm) mit 4-Leiteranschluss
Logger: Agilent 34970a mit 3 Modulen 34901a
PC: SPF-33 , Win98, HP Benchlink, PcAnywhere
Betreuung: durch SPF (via Modem)

Zur Erfassung der Fin-Temperaturen wurden im Kollektor 20 Sensoren sinnvoll auf die ganze Kollektorbreite verteilt. Da die 7 vorhandenen Glashalteprofile z.T. Absorberstreifen abschatten, wurden die betreffenden Temperatursensoren auf den benachbarten Fin platziert.

Weitere 4 Sensoren waren auf dem Sammelrohr unten (kalte Seite, Kollektoreintritt) angebracht, sowie ein letzter auf dem Sammelrohr oben (heisse Seite, Kollektoraustritt). Die Platzierung der Sensoren ist aus den nachfolgenden Tabellen ersichtlich :

Absorberstreifen :

Kanal	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Fin-Nr	59	58	57	55	52	50	46	41	36	31	26	21	17	13	10	7	5	3	2	1
	west																			ost

Sammelrohre:

Kanal	25	24	23	22	21
Fin-Nr	60-59	60-59	41-40	21-20	2-1
Sammelrohr heiss	x				
Sammelrohr kalt		x	x	x	x
	west				ost

Als Sensoren kamen Pt100-Folienfühler zum Einsatz. Sie wurden mit Klammern in Omega-Form aus rostfreiem Stahl auf die Absorberrohre aufgeklemmt, respektive mit Draht auf das Sammelrohr gebunden. Bei allen Sensoren wurde die Wärmeübertragung mit Wärmeleitpaste optimiert.

Die Kabel gelangten durch in die Kollektorrückwand gebohrte Löcher unter das Hausdach und zum Datenlogger. Dessen Aufzeichnungen speicherte der angeschlossene PC, der via Modem von Ferne bedient und ausgelesen werden konnte.

Experiment

Ausgewertete Messdaten

Insgesamt wurden vom 12. Juni bis zum 17. November 2003 Messungen durchgeführt. Für die vom SPF erfassten Temperaturen (Vorlauftemperaturen von 20 Absorberstreifen, Rücklauftemperatur Kollektorfeld an vier Stellen, Vorlauftemperatur Kollektorfeld) besteht eine lückenlose Datenbasis von 160 Tagen.

Die Messungen des Durchsatzes und der Einstrahlung durch die Firma Salerno Engeler umfassen neun Tage, wovon zwei Tage ohne Bewölkung. An einem dieser beiden Tage wurden die Daten in Ein-Minuten-Schritten erfasst. Die vorliegende Analyse stützt sich auf den 17.9.2003, von 9:00-13:00 Uhr. In dieser Zeit liegen von 2 Stunden 56 Minuten Einstrahlungs- und Durchflussdaten vor. Aufgrund der Messungen, die das SPF durchführte, kann der untersuchte Zeitabschnitt als typisch angesehen werden.

Folgende Daten werden betrachtet (alle Zeiten in Sommerzeit):

- Temperaturdifferenzen: 17.09.2002, 9:00-13:00 ohne 11:05-11:25
- Einstrahlung/Durchsatz: 17.09.2002, 9:45-13:00 ohne 11:05-11:25
- Durchsatz: 270 ± 13 l/h
- Einstrahlung: von 292 (9:45) bis 783 (13:00) W/m^2

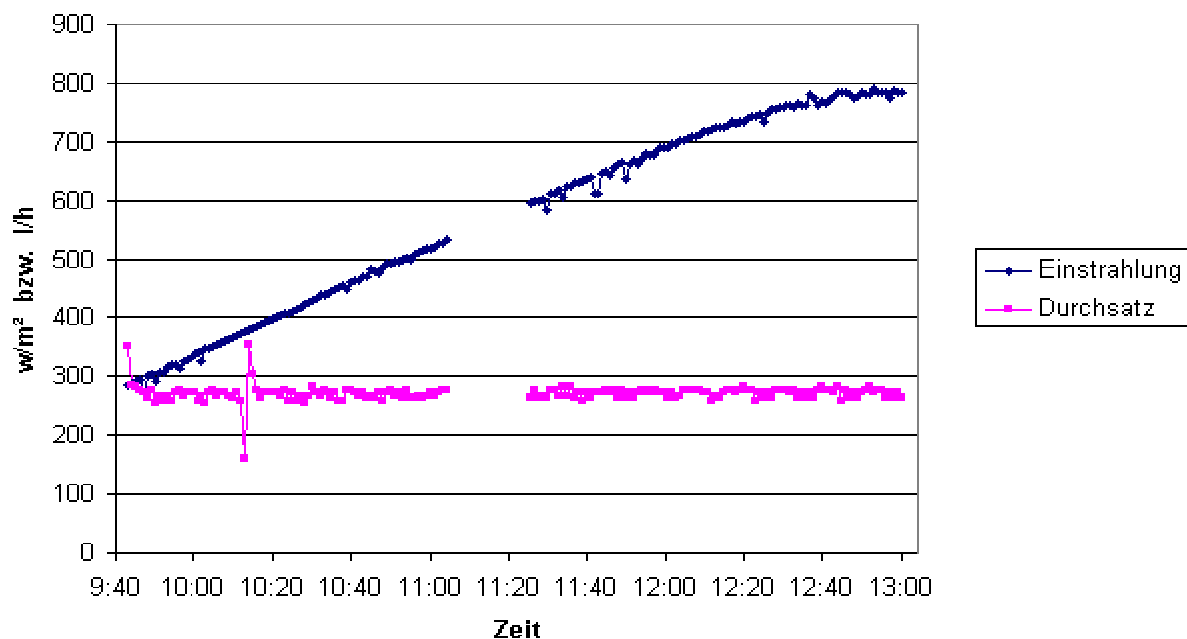


Abb. 1: Messdaten von Einstrahlung und Durchsatz am 17.9.2002.
Zwischen 11:05 und 11:25 fehlen die Daten.

Messpunkt und Abgrenzung der Kollektorabschnitte:

1. Zeile: Absorberstreifen-Nummer
2. Zeile: Temperaturmessung Sammelrohr (Rücklauf, kalt)
3. Zeile: Temperaturmessung Sammelrohr (Vorlauf, heiss)
4. Zeile: Temperaturmessung Absorberstreifen (Vorlauf)
5. Zeile: abschattende Kollektorelemente

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Mit (x) markierte Stellen : Diese Absorberstreifen wurden während der Morgenstunden wegen der Glashalterungsstege teilweise beschattet, was zu Artefakten (Zeltstruktur) in der Strömungsverteilung führte. An anderer Stelle (Absorberstreifen Nr. 55) werden diese Effekte aufgrund der Interpolation der beiden benachbarten Messpunkte etwas verdeckt.

Messungen

Die Grafiken zeigen den relativen Durchsatz der einzelnen Absorberstreifen (Durchschnitt = 1). Der Durchsatz wird folgendermassen berechnet: Die Vorlauf-Temperaturen der nicht-gemessenen Rohre werden linear interpoliert, ebenso die Rücklauf-Temperaturen im Sammelrohr. Somit erhält man die Temperaturspreizung für jedes einzelne Rohr.

$$\Delta Q = \Delta T_i \cdot \rho \cdot c_p \cdot D_i = \text{const} \rightarrow D_i \sim 1/\Delta T_i$$

Daraus wird der Durchsatz als Kehrwert errechnet und normiert. Folgende Annahmen werden getroffen:

- ΔQ ist konstant (gilt aufgrund der Abschattungen nicht für alle Absorberstreifen)
- $\rho \cdot c_p$ ist konstant (zwischen 20 und 60°C variiert der Wert nur um 1.3%)
- alle Rohre werden in derselben Richtung durchströmt

Die dritte Annahmen ist im Übergangsbereich laminar-turbulent nicht erfüllt. Die Temperaturspreizung ist in einzelnen Absorberstreifen zeitweise negativ oder kann (rein zufällig) nahe bei Null liegen. In diesen Fällen resultiert mit der beschriebenen Methode ein sehr grosser Durchsatz, was aufgrund der kleinen Druckdifferenzen im Absorber nicht realistisch ist. Um dennoch ein halbwegs quantitatives Bild der Strömungsverteilung geben zu können, wurden alle Durchsätze, welche dem Betrag nach das 5-fache des Durchschnitts überschreiten, abgeschnitten (siehe Grafiken auf Seite 8).

Um aus den Temperaturmessungen auf die tatsächlichen Durchsätze der einzelnen Absorberstreifen schliessen zu können, wäre ein erheblicher rechnerischer Aufwand vonnöten.

Beschreibung der Beobachtungen

Aufgrund der Abschattung der Absorberstreifen 1, 16, 31 und 46 zwischen 9:00 – 10:00 Uhr haben diese ein tieferes ΔT , was (in diesem Fall fälschlicherweise) als höherer Durchsatz interpretiert wird. Dass das Maximum bei Fin 17 und nicht 16 ist, hängt damit zusammen, dass Fin 17 gemessen wurde, und der Wert bei 16 durch eine lineare Temperatur-Interpolation zwischen Fin 13 und 17 errechnet wurde. Tatsächlich müsste das lokale Maximum des Durchsatzes (also das Minimum der Temperaturspreizung) bei Fin 16 liegen.

Über eine knappe Stunde ist dieser Zustand stabil. Rück- und Vorlauftemperaturen steigen von 13/18°C auf 31/38°C, dann auf 38/45°C.

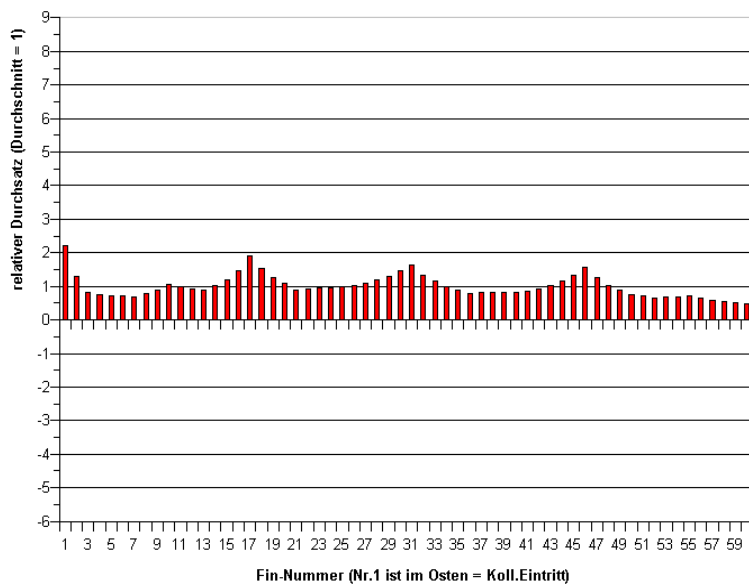


Abb. 2: Strömungsverteilung um 9:00

Übergang ins Chaos:

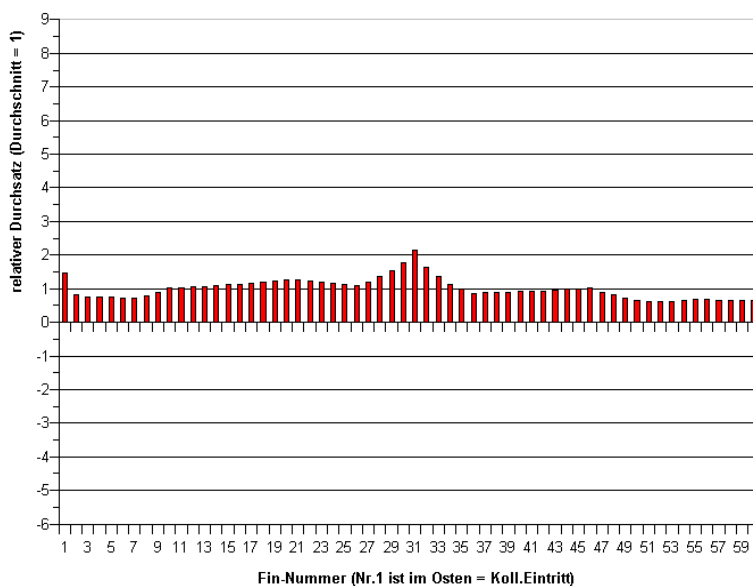
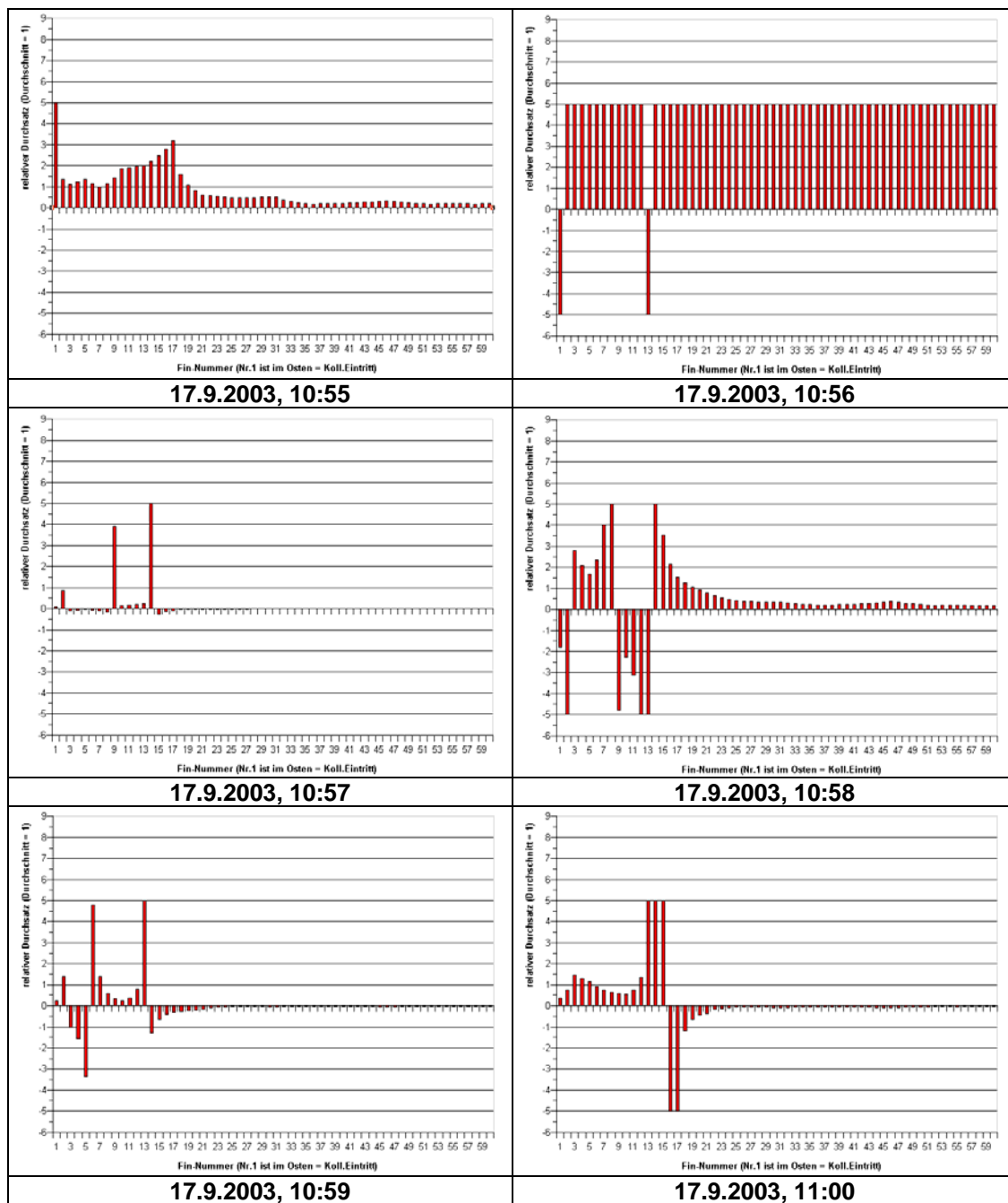


Abb. 3: Aus dieser Strömungsverteilung von 10:45 Uhr entwickelt sich in wenigen Minuten eine vollkommen unkontrollierte Situation.

Die folgenden Grafiken zeigen die Situation von 10:55 – 11:00 Uhr in Minutenschritten:



In der Minute 10:56 (Grafik oben rechts) ist aufgrund einer internen Zirkulation die Temperaturspreizung in allen Absorberstreifen praktisch Null, was in der Auswertung als hoher Durchsatz erscheint. Die darauffolgende Grafik zeigt gerade das Gegenteil: Die Temperaturdifferenz-Werte sind sehr gross, der Durchsatz entsprechend klein. Beide Extreme sind aber als Artefakte der Berechnungsmethode zu verstehen und dürfen nicht quantitativ, wohl aber qualitativ verstanden werden.

Das unkontrollierte Verhalten zeigt sich mehrheitlich auf der Hälfte des Kollektoreintritts. Die Hälfte auf der Seite des Vorlaufes verhält sich homogener.

Dieses unkontrollierte Verhalten dauert etwa eine Stunde. Die Vorlauftemperatur erreicht nun 61°C, was in mehr als der Hälfte des Sammelrohres zu einer Reynoldszahl von über 2300 führt. In wenigen Minuten stabilisiert sich darauf die Strömungsverteilung.

Übergang zur Regelmässigkeit

Nach einer Stunde mit chaotischen Betriebsverhältnissen, steigen die Vor-/Rücklauftemperaturen von 38/45°C auf 46/63°C und somit steigen die Reynoldszahlen beim Kollektorein-/austritt (also in den Sammelrohren) von 4350/4950 auf 5040/6610. Dies bedeutet, dass an diesen Stellen immer eine turbulente Strömung herrscht. Entscheidend ist aber, wie die Strömungsart innerhalb der Sammelrohre zu- bzw. abnimmt (Die Strömungsart in den Absorberstreifen ist praktisch immer laminar. Bei mittlerer Durchströmung und 20/80°C beträgt die Reynoldszahl 225/630.)

Sobald die Strömung in den Sammelrohren im mittleren Teil des Kollektors (Absorberstreifen 20-40) auch turbulent wird, stabilisiert sich die Strömungsverteilung.

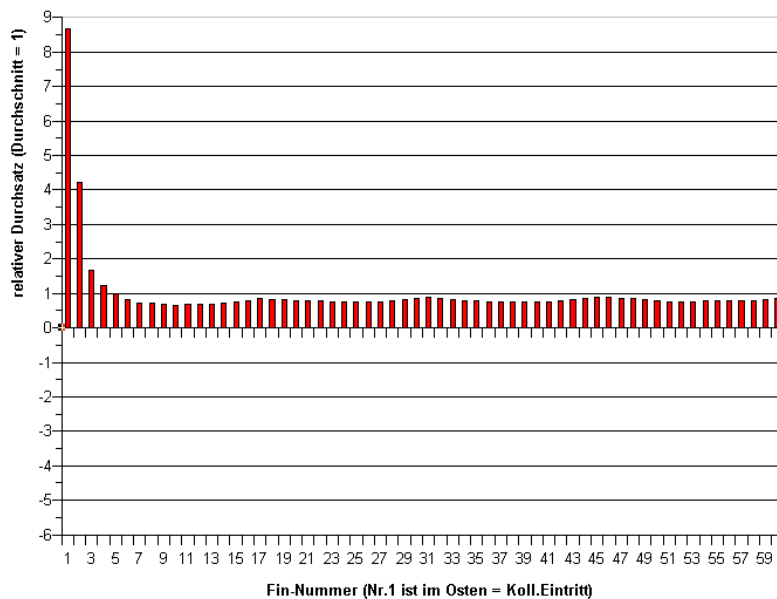


Abb. 4: Strömungsverteilung um 11:48 Uhr.

Nach weiteren Minuten bildet sich eine vollkommene Gleichverteilung der Durchströmung aus, welche über Stunden unverändert bleibt: Rücklauf > 51°C, Vorlauf > 72°C

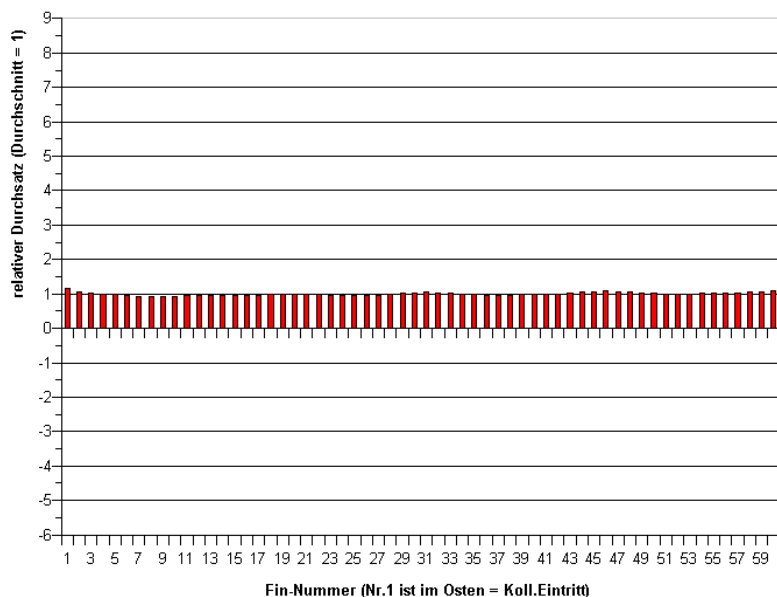


Abb. 5: Strömungsverteilung um 12:08 Uhr.

Theoretisches Modell

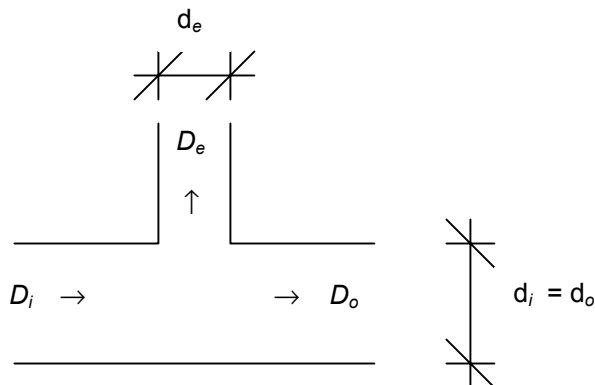
Die Durchströmungsverteilung eines Harfenabsorbers kann nicht durch eine einfache Formel ausgedrückt werden, sondern muss mit Hilfe eines approximativen Verfahrens ermittelt werden. Dabei wird folgende Grundidee verwendet: Die Durchflussmengen der einzelnen Rohre sind so zu wählen, dass sich die Druckverluste (in Längsrohren, T-Stücken und Sammelrohren) ausgleichen und sich ein stationärer Zustand einstellt. D.h. die Druckverluste sind auf allen möglichen Wegen von Kollektoreintritt bis -austritt immer gleich gross.

Mathematisch ausgedrückt entspricht ein Harfenabsorber mit z.B. 10 parallelen Rohren einem Gleichungssystem mit 9 Unbekannten. Überdies besitzen all diese Gleichungen aufgrund diverser physikalischer Phänomene eine hohe Komplexität:

- Stufe im Druckverlustverlauf beim Übergang laminar – turbulent
- Wirbelbildung bei den Verzweigungen, bzw. Einmündungen
- spezielle Geometrie der T-Stücke (Formfaktoren)
- unterschiedliche Erwärmung aufgrund unterschiedlicher Durchflussmengen
- Thermosiphon-Effekt bei kleinen Durchsatzmengen

Bei der Behandlung der T-Stücke führen der Energie- und Massenerhaltungssatz direkt zum Ziel: Die gesamte Energie (kinetische und thermische Energie) und der Massenstrom des Fluids bleiben bei jedem T-Stück erhalten. Dies bedeutet formal ausgedrückt:

$$\frac{1}{2} \rho \cdot w_i^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot w_o^2 + \frac{1}{2} \rho \cdot w_e^2 + \Delta p \quad \text{mit} \quad w_x = \frac{D_x}{\frac{\pi}{4} \cdot d_x^2} \quad \text{und} \quad D_i = D_o + D_e$$



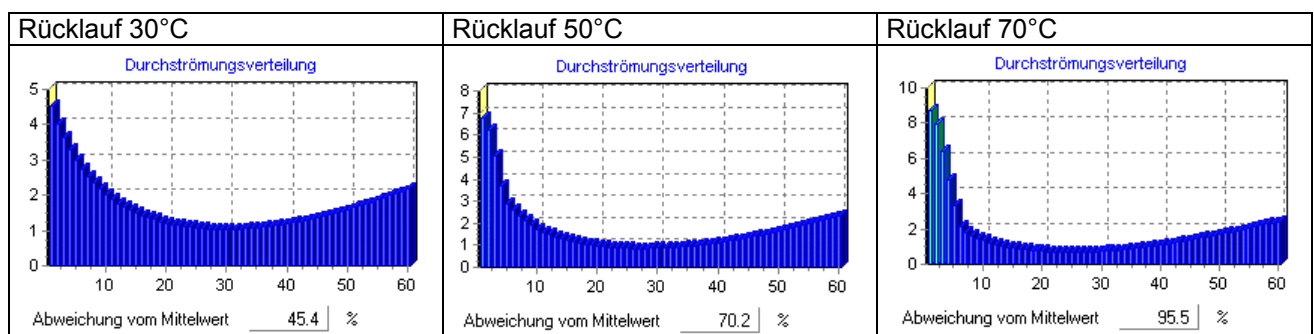
Dabei steht der Index „i“ für „incoming“, „o“ für „outgoing“ und „e“ für „exchanged“. w ist die Fliessgeschwindigkeit, ρ die Dichte, D_x ($x=i,o,e$) für den Durchsatz und d_x für den Innendurchmesser des betreffenden Rohres. Der Term Δp ist notwendig, da die Energieerhaltung allein aufgrund der kinetischen Energie nicht erfüllt werden kann. Es entstehen zwangsläufig Wirbel, welche die geordnete Form der kinetischen Energie in ungeordnete Wärmeenergie ΔQ umwandeln und zu einem kleinen Anstieg der Fluidtemperatur führen. Über einen Zeitabschnitt Δt ergibt sich aufgrund des Druckverlustes eine Wärmezunahme von: $\Delta Q = \Delta p \cdot D \cdot \Delta t$. Ohne diese Verwirbelungen genauer beschreiben zu können, kann der resultierende Druckverlust auf diese Weise präzise berechnet werden.

Geometrie des T-Stückes

Der oben ermittelte Druckverlust der Verwirbelung Δp ist aber nur die untere Grenze (" Δp_{min} ") des möglichen Druckverlustes. Das Fluid kann aber auch stärker "abgebremst" werden. Je nach dem, wie stark die Längsrohre in das Sammelrohr hineinragen, können zusätzliche Druckverluste entstehen. Die Stärke dieser Wirbel wird mit dem sog. Formfaktor ζ_2 beschrieben. Die Werte für ζ_2 bewegen sich zwischen 0 und 2 (siehe z.B. Willi Bohl, "Technische Strömungslehre", Seite 135). Bei der Berücksichtigung dieses Terms in Absorber-Master wird der Verwirbelungs-Druckverlust folgendermassen berechnet: $\Delta p_{Wirbel} = \Delta p_{min} \cdot (1 + \zeta_2)$. Die Wirbelverluste können also bis zum 3-fachen der Minimalwirbel anwachsen. Werte unter dem 1.5-fachen sind nur möglich, wenn ein fließender Übergang zwischen den Rohren vorliegt.

Bei der Berechnung der Strömungsverteilung wurde ein Wert von $\zeta_2 = 0.5$ verwendet (siehe W. Bohl, „Technische Strömungslehre“, 1991, S. 135). Dies entspricht einer Verarbeitung, bei der die Längsrohre nicht in das Sammelrohr hineinragen.

Daraus ergibt sich für einen Durchsatz von 22.1 l/h/m^2 (270 l/h) und eine Einstrahlung von 400 W/m^2 und verschiedene Rücklauftemperaturen die folgenden Verteilungen (die Abschätzung einzelner Absorberstreifen wurde in den Berechnungen nicht berücksichtigt):



Die Charakteristik der „durchhängenden“ Sehne entspricht im laminaren Fall gut den Beobachtungen, wenngleich kein quantitativer Vergleich möglich ist (dafür ist die Messanordnung mit zu vielen Störfaktoren behaftet). Bei höheren Temperaturen wird ein Ausgleichen der Strömungsverteilung erkennbar (Darstellung bei 70°C), wobei dieses nicht für die ersten paar Rohre beim Kollektoreintritt gilt und auch nicht so ausgeprägt ist, wie dies im Experiment beobachtet werden konnte (Abb. 5).

Die Stabilität der Berechnung im Übergangsbereich ist darauf zurückzuführen, dass die Reynoldszahl zwischen 1160 und 2320 kontinuierlich von laminar auf turbulent wechselt, was durch teilweise turbulente Abrisse bei laminarer Strömung bereits in früheren, unabhängigen Versuchen gezeigt werden konnte. Zudem werden eine Reihe von mathematischen Methoden verwendet, um die Konvergenz der Iteration zu verbessern.

Verfeinerungen des Modells

Eine mögliche Verfeinerung des theoretischen Modells besteht darin, nicht die mittlere Fließgeschwindigkeit im Sammelrohr zur Berechnung der Energie-Impulserhaltung zu verwenden, sondern die radial abhängige Fließgeschwindigkeit „am Ort“ der Fluidverzweigung, also bei der Mündungsstelle der Absorberstreifen. Im vorliegenden Fall dürfte dies eine recht deutliche Veränderung der Situation mit sich bringen, da beim betrachteten Kollektor die Fließgeschwindigkeit in den Absorberstreifen beim Kollektorein-/austritt drei mal kleiner ist als im Sammelrohr.

Diese Erweiterung des Modells erfordert aber einen erheblichen Aufwand, der unter den gegebenen Bedingungen nicht erbracht werden konnte.

Interpretation der Temperaturmesswerte

Da für die Zeit vom 12.6. bis zum 15.9.2002 keine Durchflussmessdaten sowie vom 4.7. bis 24.8.2002 keine Strahlungsdaten vorhanden sind, wurde der Versuch unternommen, allein aus den Temperaturmessdaten den jeweiligen Betriebszustand herauszulesen. Einerseits ging es dabei um die Einschaltdauer der Solarkreispumpe. Andererseits stellt sich die Frage, wie gross der zeitliche Anteil mit stabilen Strömungsverhältnissen war.

Die Ein- und Ausschaltpunkte der Pumpe konnten einigermaßen deutlich anhand der Temperaturdifferenz zwischen dem Kollektoraustritt und den vier gemittelten Kollektoreintrittswerten ermittelt werden.

Schwieriger gestaltete sich die Entscheidung, wann die Strömungsverhältnisse stabil waren. Die klarste Aussage (da gut übereinstimmend mit einer visuellen Beurteilung) lieferte die rechnerische Überwachung der Änderung $W_{(Fy,t)}$ der relativen Temperaturverteilung über alle Absorberstreifen, d.h. eine Art "diskrete Ableitung" der auf 1 normierten Absorberstreifen-Temperaturen :

$$W_{(Fy,t)} = \frac{\vartheta_{(Fy,t)} \sum_{n=1}^{20} \vartheta_{(Fn,t-1)}}{\sum_{n=1}^{20} \vartheta_{(Fn,t)} \vartheta_{(Fy,t-1)}}$$

Wird für einen stabilen Betrieb vorausgesetzt, dass $W_{(Fy,t)} \leq 0.05$ sein soll (bei einem minimalen $d\vartheta_{Koll}$ von 5°C), so ergeben sich folgende prozentuale Zeitanteile :

Pumpe	Strömungsverteilung	Zeitanteil [%]
aus	-	72.9
ein	Instabil	8.2
ein	Stabil	18.9
Summe = 100% (1550 h)		

Versuchshalber wurde die Strömungsverteilung auch anhand der Spreizung der einzelnen Absorbertemperaturen beurteilt :

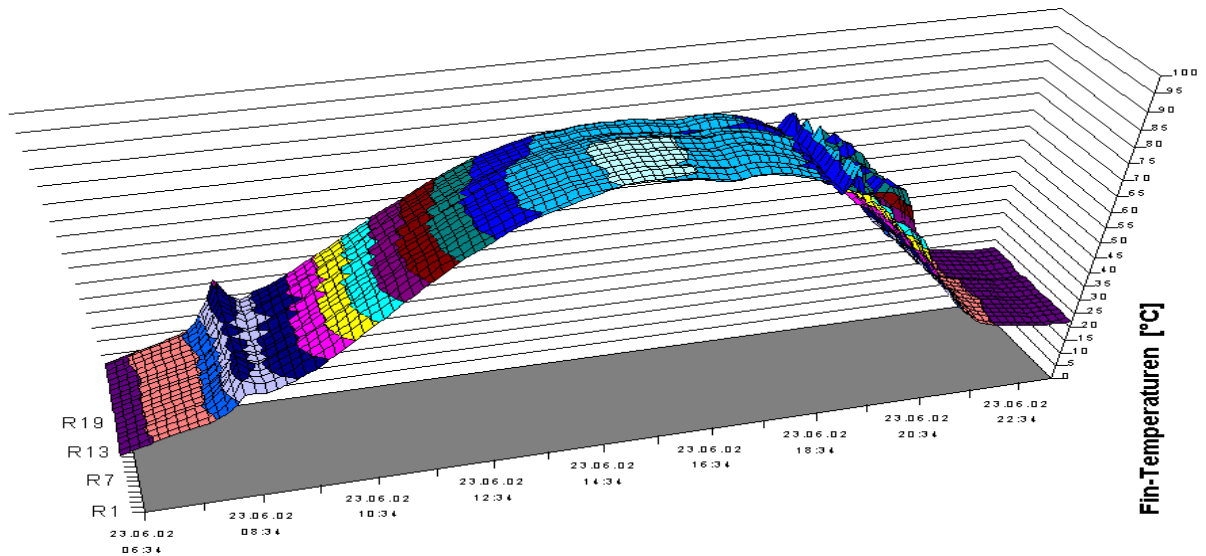
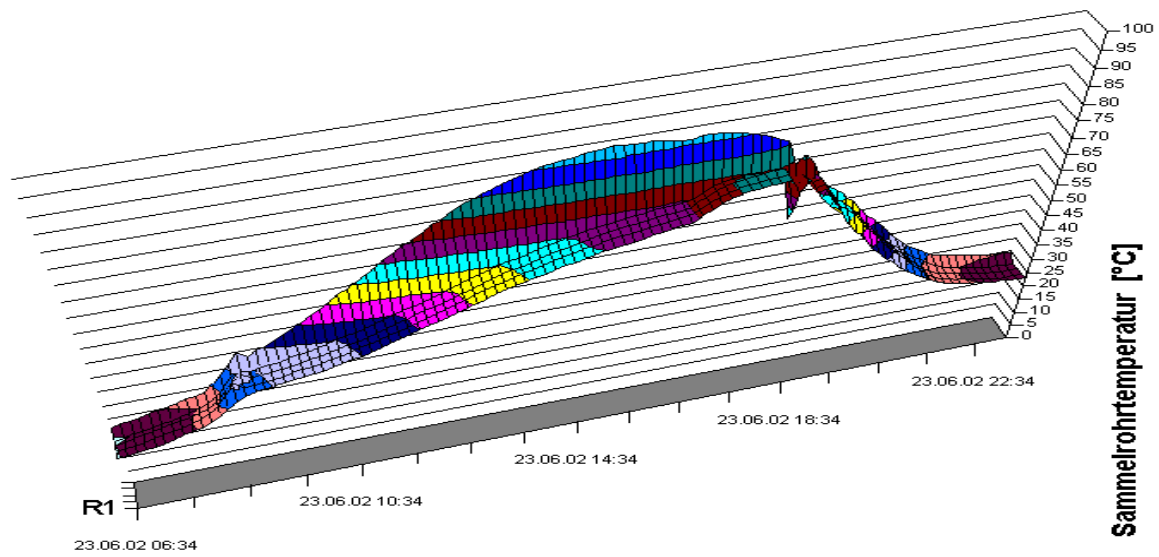
$$V_{(Fy,t)} = \text{Max}_{(F1...20,t)} - \text{Min}_{(F1...20,t)} \leq 7^{\circ}\text{C}$$

Daraus ergeben sich günstigere Zeitanteile :

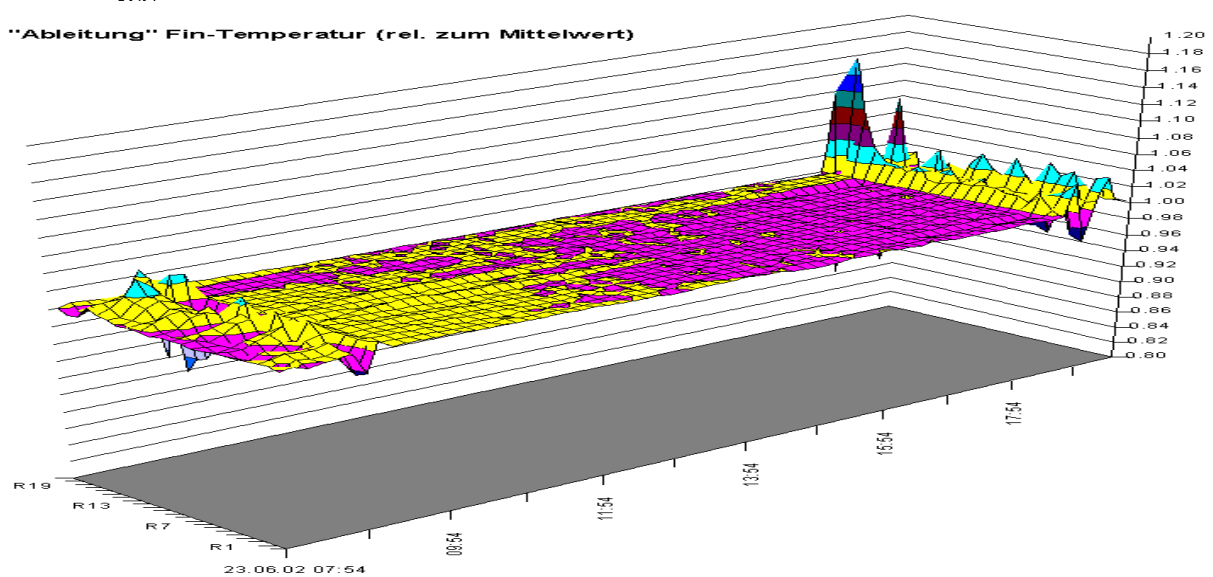
Pumpe	Strömungsverteilung	Zeitanteil [%]
aus	-	72.9
ein	Instabil	5.3
ein	Stabil	21.8
Summe = 100% (1550 h)		

Der zeitliche Anteil mit instabiler Strömungsverteilung scheint in jedem Fall relativ gross zu sein. Die Beurteilung, wann die Strömungsverteilung stabil war oder nicht, bleibt aber aufgrund der beschränkten Messdatenbasis schwierig.

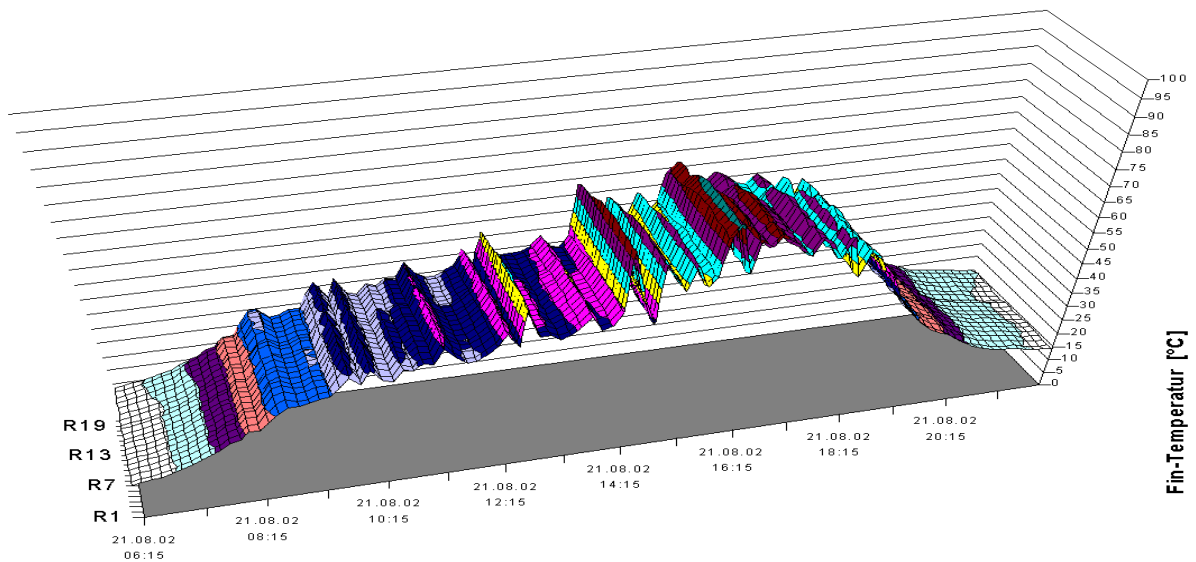
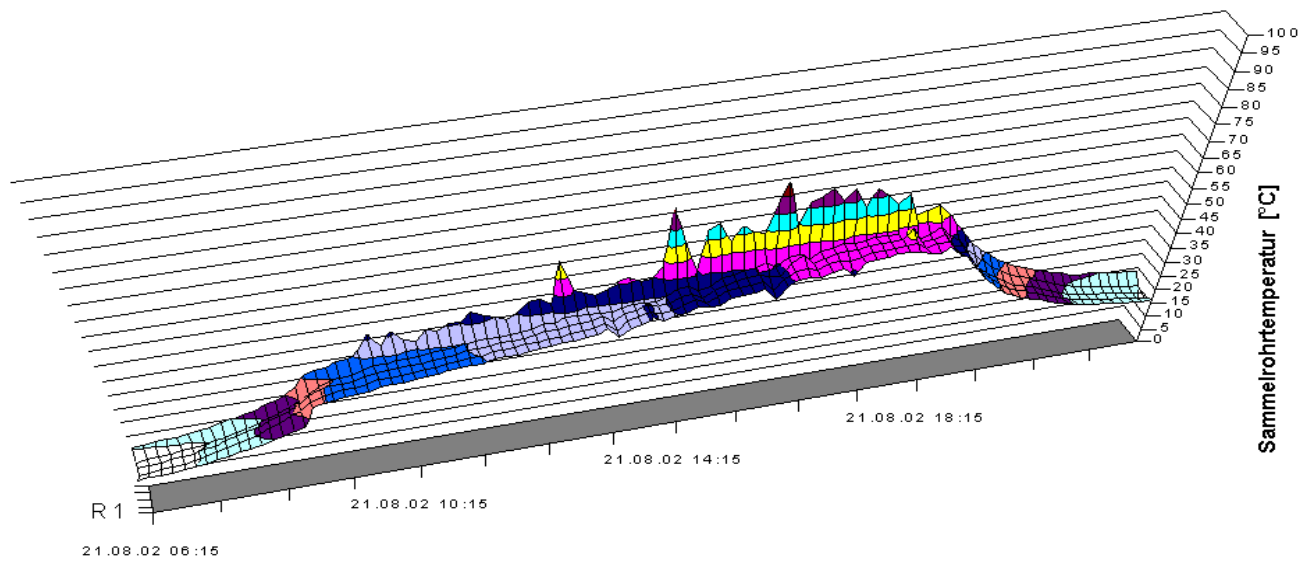
Messwerte vom 23.6.2002 , ein "stabiler" Tag :



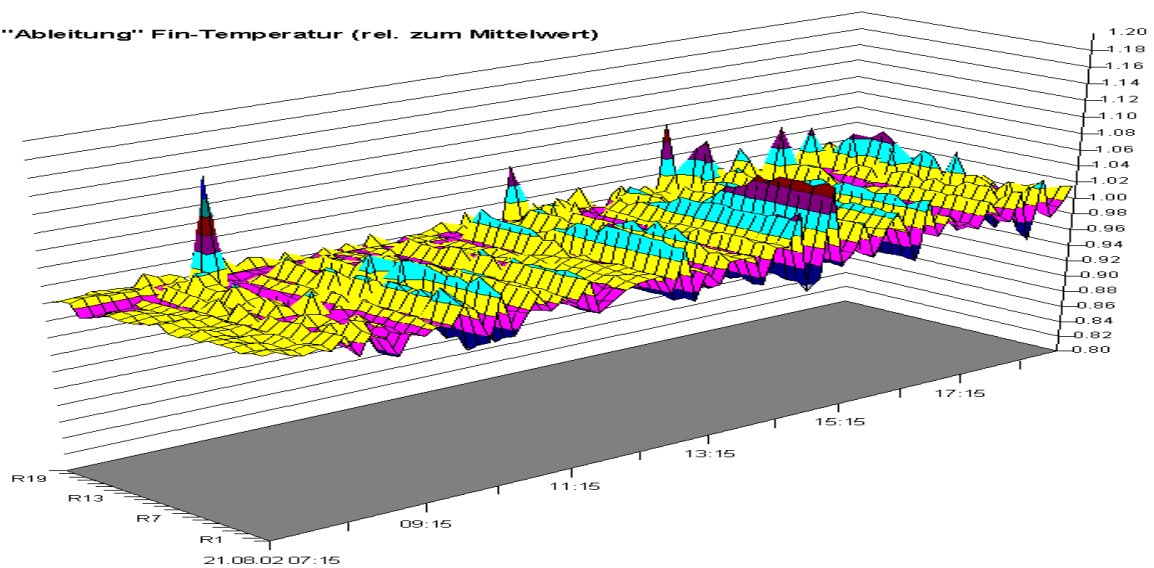
"Ableitung" Fin-Temperatur (rel. zum Mittelwert)



Messwerte vom 21.8.2002 , ein "instabiler" Tag :



"Ableitung" Fin-Temperatur (rel. zum Mittelwert)



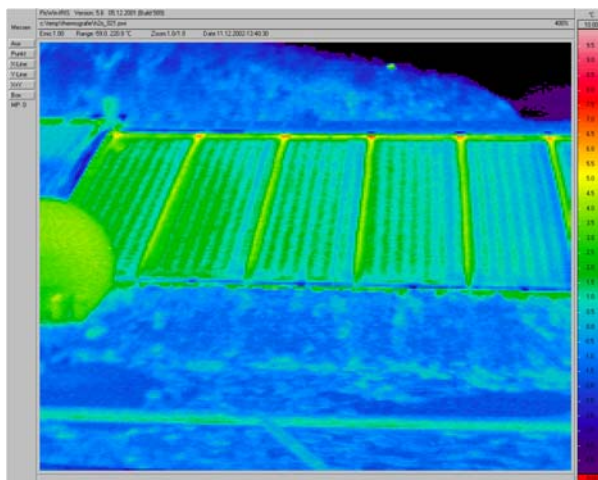
Infrarotaufnahmen

Um die ungleichmässige Temperaturverteilung im Kollektor optisch sichtbar zu machen, erfolgten Aufnahmen mit einer Infrarotkamera (NEC, TH3101 MR, 8-13 μm). Zunächst wurde der Kollektor mit montierten Abdeckgläsern aufgenommen. Eine weitere Serie von Aufnahmen erfolgte nach dem Entfernen der Scheiben.

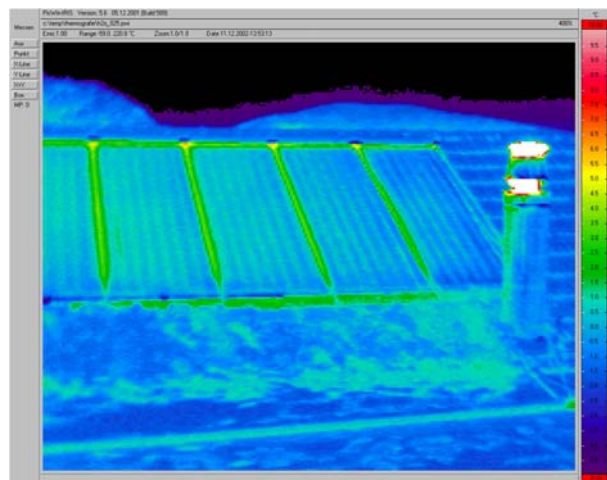
Die herrschenden Bedingungen waren:

Wetter : Himmel klar bis neblig, kaum Sonne, Ostwind
Umgebungstemperatur : ca. $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$
Absorbertemperatur : ca. $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$

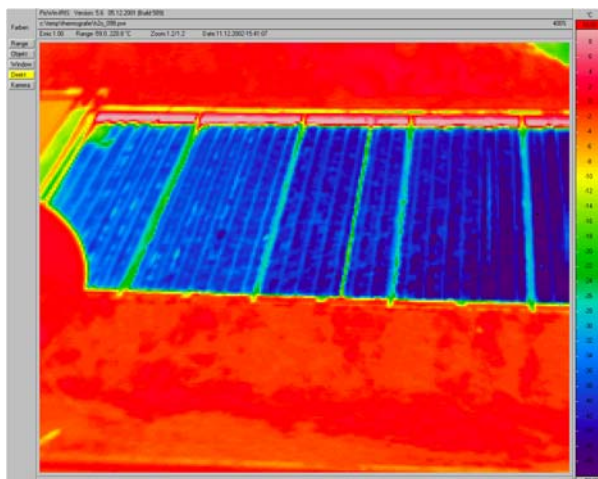
Die nachfolgenden Bilder zeigen die Ost- und die Westhälfte des Kollektors, je einmal mit und einmal ohne Scheiben.



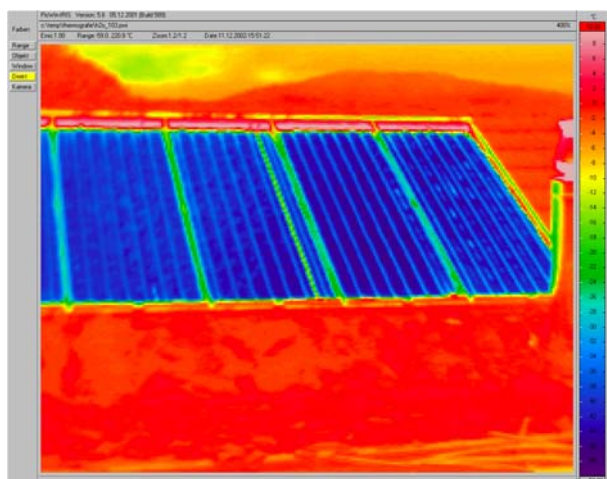
westliche Hälfte mit Abdeckscheibe



östliche Hälfte mit Abdeckscheibe



westliche Hälfte ohne Abdeckscheibe



östliche Hälfte ohne Abdeckscheibe

Eine Ungleichmässigkeit in der Temperaturverteilung ist kaum zu erkennen. Bei aufgesetzten Glasscheiben sind die Unterschiede zu klein, um durch die Scheibe hindurch erkennbar zu sein. Bei demontierten Scheiben hingegen ist wegen des tiefen Emissionsgrades der Absorberbeschichtung nicht die eigentliche Absorbertemperatur, sondern vorwiegend die gespiegelte tiefe Temperatur des Himmels zu sehen.

Diese Resultate sind keineswegs überraschend und wurden auch im Voraus so prognostiziert. Deutlichere Unterschiede wären erkennbar, wenn z.B. der Absorber mit einer Farbe gestrichen würde (höherer Emissionsgrad, aber Kollektor anschliessend nicht mehr brauchbar), oder wenn der Kollektor auf möglichst hohe Temperatur aufgeheizt wird (ist aber kein realer Betriebszustand). Beide Massnahmen machen somit kaum Sinn.

Schlussbemerkung

Die eingesetzte Berechnungsmethode wurde ursprünglich für Kollektoren mit maximal 20 parallel durchströmten Absorberstreifen ausgelegt. Für die Berechnungen von Feldern mit bis zu 60 und mehr parallel durchströmten Feldern wurden die vorhandenen Modelle (nicht im Rahmen dieses Projekts!) angepasst und erweitert. Die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ist nur qualitativ und nur bei laminarer Strömung akzeptabel. Unter allen anderen Bedingungen, also im Übergangsbereich laminar-turbulent und im turbulenten Bereich ist die Übereinstimmung ungenügend. Ohne eine weitere Verfeinerung der Modelle und eine umfangreiche Validierung, ist das vorhandene Berechnungsprogramm, für Kollektoren mit einer grossen Anzahl an parallel verschalteten Absorberstreifen, nicht brauchbar.

Dank der langen Messreihe der Absorbertemperaturen, können zumindest statistische Überlegungen zur Funktionsweise des gesamten Kollektorfelds gemacht werden. Die Resultate sind auf den ersten Blick wenig positiv. Je nach den gesetzten Kriterien beträgt der Anteil an instabiler Betriebsweise zwischen 20 und 30 % der „produktiven“ Betriebszeit des Kollektorfelds. Allerdings konnten in diesen instabilen Phasen keine kritischen Betriebszustände, welche die Betriebssicherheit der Anlage in Frage stellen würde, festgestellt werden.

Entgegen den ursprünglichen Befürchtungen, aufgrund der im Vorfeld durchgeführten Berechnungen, ist die Parallelschaltung von 60 Absorberstreifen machbar. Allerdings wurde bereits bei der Anlagenplanung darauf geachtet, dass die einzelnen Absorberstreifen exakt dieselbe Länge aufweisen und im Bereich der Sammelrohre identisch ausgeführt sind. Ziel dieser Bemühungen war, dass die einzelnen Absorberstreifen möglichst denselben Druckverlust aufweisen.

Für eine definitive Empfehlung, Anlagen mit ähnlicher Feldverschaltung zu realisieren, ist die vorliegende Untersuchung nicht ausreichend. Weiterführende Arbeiten an vergleichbaren Anlagen werden - vor einer Multiplikation des Anlagekonzepts - dringend empfohlen.

Die Erfahrungen im Rahmen dieses Projekts haben zudem klar aufgezeigt, dass die weitere Entwicklung des Programms bzw. dessen Validierung nur durch geeignete Experimente im Labor möglich ist. Die bisher durchgeführten Validierungsarbeiten wurden nur an sehr einfachen Geometrien durchgeführt und sind nicht ausreichend. Erst im Anschluss an erfolgreiche Laboruntersuchungen sollte die Anwendung des Programms durch Messungen an realen Anlagen überprüft werden.

Referenz

Wang X.A. and Wu L.G. (1990) Analysis and performance of flat plate solar collector arrays, Solar Energy 45(2), 71-78