

***Optimierung eines hocheffizienten Sonnenflachkollektors mit luftdurchströmter, transparenter Kapillarstruktur***

Von der Fakultät Energietechnik der  
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
**Roland Digel**  
aus Leonberg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. H. Bach  
Tag der mündlichen Prüfung: 22. 6. 1994

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik  
der Universität Stuttgart

I T W

1994

# Optimierung eines hocheffizienten Sonnenflachkollektors mit luftdurchströmter, transparenter Kapillarstruktur

R. D i g e l

## Kurzfassung

Das Leistungsverhalten eines luftdurchströmten Flachkollektors wurde experimentell und theoretisch bestimmt. Beim hier untersuchten Kollektor ist gegenüber herkömmlichen solaren Lufterhitzern zwischen Glasscheibe und Absorber eine transparente Kapillarstruktur angeordnet. Die Luft strömt zwischen der Glasscheibe und der Kapillarstruktur (Zustromkanal) ein, durch die Kapillaren hindurch und zwischen dem Absorber und dem Kapillarenfeld (Abstromkanal) aus. Diese Anordnung führt zu einer weitgehenden thermischen Entkopplung von Glasscheibe und Absorber. Dadurch hängt der Wirkungsgrad sehr viel stärker von der Temperatur der Eintrittsluft als von der der Austrittsluft ab. Bei Temperaturerhöhungen im Kollektor von 100 K können Wirkungsgrade von 70 Prozent erreicht werden.

Voraussetzung für hohe Wirkungsgrade ist eine möglichst gleichmäßige Durchströmung des Kapillarenfeldes. Sie wird jedoch gestört durch Auftriebskräfte der unterschiedlich warmen Luftsäulen im Zu- und Abstromkanal. Ungünstige Betriebsbedingungen wie z. B. geringe Massenstromdichte und hohe Bestrahlungsstärke können sogar dazu führen, daß in bestimmten Bereichen des Kapillarenfeldes die Luft vom Absorber in Richtung Glasscheibe zurückströmt. Treten solche Rückströmungen auf, nimmt der Wirkungsgrad stark ab.

Das thermische Verhalten dieser Kollektor - Bauart wurde an zwei Prototypen untersucht. Beide sind mit Thermoelementen an der Glasabdeckung, im Kapillarenfeld und am Absorber bestückt. Es zeigte sich, daß eine Optimierung der Spaltweite des Abstromkanals die Durchströmung des Kapillarenfeldes vergleichmäßigt und den Wirkungsgrad erhöht. Dadurch kann auf konstruktive Maßnahmen zur Vergleichmäßigung der Durchströmung, wie z. B. Einbau horizontaler Leitbleche im Abstromkanal oder Verwendung eines luftdurchströmten, porösen Absorbers als zusätzlicher Strömungswiderstand, verzichtet werden.

Zur Durchführung einer Parameterstudie wurde ein Simulationsprogramm entwickelt. Die Bedingung für Energie- und Impulserhaltung führt zu einem System von gekoppelten, partiellen Differentialgleichungen, das numerisch gelöst wird. Die Betrachtung erfolgt zweidimensional, wobei die Temperatur sowie die Durchströmung über der Kollektorbreite als konstant vorausgesetzt wird. Messungen der Temperaturverteilung am Absorber bestätigten diese Voraussetzung.

Die Vergleiche der Simulationsrechnungen mit den Messungen ergeben eine gute Übereinstimmung bezüglich der Temperaturverteilung im Kollektor und der Wirkungsgrade. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, daß die Spaltweite des Abstromkanals die Gleichmäßigkeit der Durchströmung des Kapillarenfeldes und das Leistungsverhalten des Kollektors entscheidend beeinflusst. In der Parameterstudie wurde die Spaltweite für verschiedene Kollektorlängen und unterschiedliche Betriebsbedingungen optimiert. Der Einfluß der optischen und thermophysikalischen Eigenschaften des Kapillaren-Materials sowie der reinen geometrischen Abmessungen der Kapillaren auf das Leistungsverhalten des Kollektors wird ebenfalls in der Parameterstudie dokumentiert.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzfassung.....	1
Inhaltsverzeichnis.....	2
Formelzeichen.....	5
1. Einleitung und Problemstellung.....	10
2. Literaturüberblick.....	12
3. Versuchseinrichtung.....	22
3.1 Versuchskollektoren.....	22
3.1.1 Konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten zur Vergleichmäßigung der Durchströmung.....	23
3.1.2 Beschreibung der untersuchten Kollektoren.....	25
3.2 Versuchsaufbau.....	27
3.3 Sonnensimulator.....	28
4. Meßeinrichtungen.....	33
4.1 Volumenstrom.....	33
4.2 Temperaturmeßringe.....	34
4.3 Temperaturen im Kollektorinneren.....	36
4.3.1 Absorbtemperatur.....	39
4.3.2 Temperatur an der Vorder- und Rückseite des Kapillarenfeldes.....	39
4.3.3 Temperatur in der Kapillarschicht.....	40
4.3.4 Temperatur der Glasscheibe.....	41
4.3.5 Temperaturen im Zu- und Abstromkanal.....	42
4.4 Sonstige Meßeinrichtungen.....	43
5. Versuche und Versuchsergebnisse.....	44
5.1 Strömungsgeschwindigkeit im Zustromkanal.....	46
5.2 Temperaturverteilung im Kollektor.....	47
5.2.1 Einfluß der Spaltweite des Abstromkanals.....	48
5.2.2 Einfluß der Massenstromdichte.....	54
5.2.3 Einfluß des Kollektorneigungswinkels.....	54
5.3 Wirkungsgrad - Kennlinien.....	57
5.3.1 Exergetischer Wirkungsgrad.....	60
5.4 Langzeittest bezüglich Kapillarenverschmutzung.....	62
6. Physikalische Modellierung des Kollektors.....	64
6.1 Bestimmung des Strömungsfeldes.....	64
6.1.1 Druckverlauf im Zustromkanal.....	66
6.1.2 Druckverlauf im Abstromkanal.....	69
6.1.3 Druckverlauf in den Kapillaren.....	70
6.1.4 Differentialgleichung des Strömungsfeldes.....	70
6.1.5 Druckverlauf des Kollektors.....	70

6.1.6	Haupteinflüsse auf die Durchströmung.....	76
6.2	Optische Eigenschaften der Kapillarenschicht.....	77
6.2.1	Stirnseitig auftreffende Strahlung.....	77
6.2.2	Mantelseitig auftreffende Strahlung.....	79
6.2.2.1	Brechung eines Strahls in vertikaler und horizontaler Richtung.....	80
6.2.2.2	Strahlungsverlauf in einem Rohr.....	82
6.2.2.3	Mittlere Weglänge im Kapillarenmaterial.....	83
6.2.3	Mittlere Weglänge im Kapillarenmaterial bei diffuser Strahlung.....	86
6.2.4	Einfluß der Randschichten des Kapillarenfeldes.....	90
6.2.4.1	Optische Kenngrößen der Randschichten.....	91
6.2.5	Einfluß spektraler Materialeigenschaften.....	92
6.2.6	Vergleich mit anderen Untersuchungen.....	95
6.2.7	Gesamtbetrachtung des Kollektors.....	95
6.3	Wärmetransportvorgänge.....	98
6.3.1	Wärmeübergang.....	98
6.3.1.1	Wärmeübergang an der Außenseite der transparenten Abdeckung.....	98
6.3.1.2	Wärmeübergang im Zu- und Abstromkanal.....	98
6.3.1.3	Wärmeübergang in den Kapillaren.....	101
6.3.1.4	Mittlere Temperaturdifferenz zwischen der Kapillarenwand und der strömenden Luft.....	104
6.3.2	Wärmetransport im Kapillarenfeld (in x-Richtung) quer zur Kapillarenlängsrichtung.....	105
6.3.2.1	Wärmeleitung.....	105
6.3.2.2	Wärmestrahlung.....	106
6.3.2.3	Gesamtbetrachtung.....	108
6.3.3	Wärmetransport in Kapillarenlängsrichtung.....	108
6.3.3.1	Wärmeleitung.....	108
6.3.3.2	Wärmestrahlung.....	109
6.3.4	Differentialgleichung für das Temperaturfeld im Kapillarenfeld.....	111
6.3.5	Differentialgleichung für das Temperaturfeld an der Rückseite des Kapillarenfeldes.....	113
6.3.6	Differentialgleichung für das Temperaturfeld am Absorber.....	115
6.3.7	Analytische Lösung für die stationäre Temperaturverteilung in Kapillarenlängsrichtung bei Vernachlässigung der Wärmeleitung quer zur Kapillarenlängsrichtung.....	116
6.4	Numerisches Lösungsverfahren.....	117
6.4.1	Numerische Auswertung der Differentialgleichungen für das Temperaturfeld und für das Strömungsfeld im Kollektor.....	119
7.	Vergleich der Ergebnisse von Versuchen und Simulationen.....	124
7.1	Transmission durch das Kapillarenfeld.....	124
7.2	Vergleich der berechneten und gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeit des Kapillarenfeldes.....	127
7.3	Vergleich von gemessenen und berechneten Temperaturverläufen im Kollektor im stationären Zustand bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen.....	128
7.3.1	Veränderte Soaltweiten.....	129

---



7.3.3	Veränderter Neigungswinkel .....	134
7.3.4	Veränderte Eintrittstemperatur.....	134
7.3.5	Veränderte Himmelstemperatur und Windgeschwindigkeit.....	137
7.3.6	Veränderte Anzahl an Stützstellen und Variation des Wärmeübergangskoeffizienten im Zustromkanal .....	138
7.4	Wirkungsgradkennlinien .....	139
7.5	Aufheizkurven.....	141
8.	Parameteruntersuchung.....	142
8.1	Physikalische Parameter .....	143
8.1.1	Extinktionskoeffizient für kurzwellige und langwellige Strahlung.....	143
8.1.2	Wärmeleitfähigkeit des Kapillarenmaterials .....	145
8.2	Geometrische Parameter.....	146
8.2.1	Veränderte Spaltweiten bei unterschiedlichen Kollektorstärken.....	146
8.2.2	Veränderte Kollektorstärke .....	148
8.2.3	Veränderter Kollektorneigungswinkel .....	149
8.2.4	Kapillarendurchmesser und -länge.....	150
8.3	Kennlinien und Gesamtübersicht .....	152
9.	Fehlerbetrachtung .....	156
10.	Zusammenfassung.....	160
11.	Literaturverzeichnis.....	164
Anhang	.....	171