

**Dynamische Prüfung von Sonnenkollektoren unter
besonderer Berücksichtigung der
Einfallswinkelkorrektur
und der Reduzierung der Prüfdauer**

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von

Stephan Fischer

aus Essen

Hauptberichter: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne

Tag der mündlichen Prüfung: 30. September 2011

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
der Universität Stuttgart
2011

Kurzfassung

Solarthermische Anlagen gewinnen immer mehr an Verbreitung. Zu Beginn des letzten Jahrzehnts waren fast ausschließlich nur Solaranlagen zur Schwimmbadbeheizung oder zur Trinkwassererwärmung am Markt eingeführt. Heute umfassen die Systemvarianten zusätzlich auch Solaranlagen zur solarunterstützten Raumheizung, solarunterstützte Kälteerzeugung, Prozesswärme und solarthermische Kraftwerke. Unabhängig davon, welchen Einsatzzweck die Solaranlage erfüllt, immer wandelt der Kollektor die Sonneneinstrahlung in Wärme um und ist somit als Wärmeerzeuger die wichtigste Komponente innerhalb der Solaranlage.

Die Vielzahl der Anwendungsgebiete bedingt ebenfalls eine Vielzahl von unterschiedlichen Kollektorkonzepten. So unterscheiden sich z.B. Flachkollektoren, Vakuumröhrenkollektoren (direkt durchströmt oder mit Wärmerohr), CPC-Kollektoren¹, Parabolrinnenkollektoren, Fresnelkollektoren u.a. nicht nur erheblich in Geometrie und Funktionsweise sondern auch in ihrer Leistungsfähigkeit, insbesondere wenn ihr thermisches Verhalten unter schrägem Direktstrahlungseinfall und Diffusstrahlungseinfall betrachtet wird.

Für die Optimierung von Solaranlagen und die Prüfung von Sonnenkollektoren ist es erforderlich, die thermische Leistungsfähigkeit der Sonnenkollektoren mathematisch beschreiben zu können. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher mit der mathematischen Modellierung und der experimentellen Prüfung von Sonnenkollektoren. Hierfür wird, auf der Grundlage bestehender Verfahren, ein Rechenmodell und ein neues Verfahren zur thermischen Prüfung von Sonnenkollektoren vorgestellt. Mit dem Rechenmodell kann das thermische Verhalten aller gängigen Kollektoren beschrieben werden. Das Rechenmodell und das Prüfverfahren sind unter besonderer Berücksichtigung der Einfallskorrektur und der Reduzierung der Prüfdauer entwickelt worden.

Als Grundlage für die allgemeingültige Modellierung und das Prüfverfahren werden im **ersten Teil** der Arbeit die zur Charakterisierung der thermischen Leistung von Sonnenkollektoren erforderlichen Kennwerte beschrieben und diskutiert. Es wird aufgezeigt, dass einige, bislang zur Charakterisierung der thermischen Leistung verwendeten Einflussfaktoren, vernachlässigt werden können.

Die unter einem schrägen Einfallswinkel einfallende Direktstrahlung sowie die Diffusstrahlung wirken sich, je nach Kollektortyp, unterschiedlich auf die thermische Leistungsfähigkeit der Sonnenkollektoren aus. Diesem Umstand wurde durch eine neue, allgemeingültige Modellierung des Einfallwinkelkorrekturvermögens Rechnung getragen.

Im **zweiten Teil** der Arbeit wird ein modellgestütztes Prüfverfahren für Sonnenkollektoren vorgestellt. Mit diesem Prüfverfahren, in Kombination mit dem im ersten Teil vorgestellten Rechenmodell ist die detaillierte Beschreibung des thermischen Verhaltens von Sonnenkollektoren möglich. Das Verfahren wird exemplarisch auf einen Flachkollektor, einen Vakuumröhrenkollektor, einen CPC-Kollektor und einen Parabolrinnenkollektor angewandt. Durch wiederholte Prüfungen an demselben Kollektor sowie einer detaillierten Unsicherheitsanalyse wurde gezeigt, dass das Prüfverfahren zu belastbaren Ergebnissen führt.

¹ CPC: Compound Parabolic Concentrator

Im **dritten Teil** der Arbeit wird ein weiteres Rechenmodell vorgestellt. Dieses berücksichtigt den Wärmetransport zwischen Absorber und Kollektorfluid. Basierend auf diesem Rechenmodell wird ein Prüf- und Auswerteverfahren eingeführt, welches es erlaubt auch Messdaten zu verwenden bei denen der Wärmestrom vom Absorber zum Kollektorfluid umgekehrt wird. Durch die Verwendung solcher Messdaten, wie sie z.B. während einer nächtlichen Messung des Wärmeverluststroms aufgenommen werden können, reduzieren sich die notwendigen Prüfzeiten um 30% bis 50%, ohne dass die Genauigkeit der bestimmten Kennwerte abnimmt. Das Verfahren wurde exemplarisch an je einem Flachkollektor und Vakuumröhrenkollektor angewandt.

Abschließend werden die Inhalte und Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und bewertet.

Abstract

Solar thermal systems are gaining more and more market shares. At the beginning of the last decade only systems for swimming pool heating and domestic hot water heating were available on the market. Today the system variety includes additionally solar thermal systems for space heating, solar thermal cooling, process heat and solar thermal power plants. Independent of the purpose of the solar thermal system, it is always the collector that converts the solar irradiance into heat and is thus the most important component within a solar thermal system.

The high number of applications results also in a large variety of different collector concepts. The differences between flat plate collectors, evacuated tubular collectors (with or without heat pipes), CPC collectors², parabolic trough collectors, Fresnel collectors and others is not limited to geometry and working principles but include as well the thermal performance, especially when the thermal behaviour under different angles of incidence and fractions of diffuse irradiance is taken into account.

For the test of solar thermal collectors and for the optimisation of solar thermal systems a mathematical model is necessary to describe the thermal performance of the solar collector. Thus this thesis is dealing with the mathematic modelling and the experimental testing of solar thermal collectors. Based on already existing procedures a numerical model and a new procedure for the test of thermal collectors is introduced. The numerical model enables the description of the thermal behaviour for most collectors available on the market. The numerical model and the test procedure were developed paying special attention to the incidence angle modifier and the reduction of testing time.

As basis for the general numerical model and the test procedure **part one** of the thesis describes and discusses the parameters needed to characterise the thermal performance of solar thermal collectors. It is shown that some of the influencing factors on the performance used up to now can be neglected.

Depending on the collector type the incoming irradiance under a given angle of incidence as well as the diffuse irradiance show different impacts on the thermal performance of solar thermal collectors. This is taken into account by a new and general numerical model of the incidence angle modifier.

The **second part** introduces a model based test procedure for solar thermal collectors. This test procedure and the numerical model described in part one enable the detailed description of the thermal performance of solar thermal collectors. The test procedure is applied to a flat plate collector, an evacuated tubular collector, a CPC collector and a parabolic trough collector. By repeatedly testing the same collector and by conducting a detailed measurement uncertainty analysis it is shown that the procedure leads to reliable results.

The **third part** introduces an additional numerical model, taking into account the heat transfer between the absorber and the collector fluid. Based on this numerical model a test and evaluation procedure is introduced that allows the use of measured data when the heat flux

² CPC: Compound Parabolic Concentrator

from absorber to fluid is reversed for evaluation. Using such data which can be gained e.g. during heat loss measurements without solar irradiance leads to a reduction of the test duration between 30 to 50 % without a loss in accuracy. The procedure is demonstrated using a flat plate collector and an evacuated tubular collector.

Finally the content and results of the thesis are summarised and rated.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VII
Abstract	IX
Inhaltsverzeichnis	XI
Nomenklatur	XV
Lateinische Buchstaben	XV
Griechische Buchstaben	XVII
Indizes	XVIII
Abkürzungen	XIX
1. Einleitung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Literaturübersicht	3
1.2.1 Mathematische Modellierung von Sonnenkollektoren	3
1.2.2 Mathematische Modellierung der Einfallswinkelkorrektur	6
1.2.3 Thermische Prüfung von Sonnenkollektoren	7
1.3 Ziele der Arbeit	8
2. Grundlagen	11
2.1 Solarstrahlung	11
2.1.1 Entstehung und extraterrestrische Bestrahlungsstärke	11
2.1.2 Atmosphärendurchgang und spektrale Verteilung in Bodennähe	12
2.2 Physikalische Vorgänge an Sonnenkollektoren	16
2.2.1 Freie Konvektion zwischen Absorber und Gehäuse	18
2.2.2 Strahlungsaustausch zwischen Absorber und Gehäuse	20
2.2.3 Strahlungsaustausch zwischen Gehäuse und Umgebung	22
2.2.4 Freie und erzwungene Konvektion am Kollektorgehäuse	24
2.2.5 Wärmeleitung im Absorber	25
2.2.6 Erzwungene Konvektion im Strömungskanal	26
2.2.7 Relativierende Bemerkungen	27
2.3 Kollektormodell	27
2.4 Kennwertbestimmung	29
2.4.1 Multi-lineare Regression (MLR)	30
2.4.2 Iterative Kennwertbestimmung	30
2.5 Dynamische Systemsimulation	31
3. Einfallswinkelkorrektur	33
3.1 Grundlagen	34
3.2 Komponentenorientierte Betrachtung zur Einfallswinkelkorrektur	37
3.2.1 Winkelabhängiges Reflexionsvermögen von Reflektoren	37
3.2.2 Winkelabhängiges Transmissionsvermögen der transparenten Abdeckung	38
3.2.3 Winkelabhängiges Absorptionsvermögen des Absorbers	42
3.2.4 Geometrie des Kollektorgehäuses	43

3.3	Einteilung der Kollektoren gemäß ihres Einfallswinkelkorrekturvermögens in Bezug auf die direkte Bestrahlungsstärke	45
3.3.1	Einfallswinkelkorrekturvermögen isotroper Kollektoren	46
3.3.2	Einfallswinkelkorrektur für biaxiale Kollektoren	51
3.3.3	Einfallswinkelkorrektur für multiaxiale Kollektoren	55
3.4	Einfallswinkelkorrekturvermögen der diffusen Bestrahlungsstärke	58
3.4.1	Diffusstrahlungsmodelle	58
3.4.2	Bestimmung des Einfallswinkelkorrekturvermögens für die diffuse Bestrahlungsstärke	59
3.5	Messtechnische Bestimmung des Einfallswinkelkorrekturvermögens	63
3.5.1	Ausrichtung des Prüfstands	63
3.5.2	Strahlungsmessung	64
4.	Kollektormodell	67
4.1	Einfluss der langwelligen Bestrahlungsstärke auf die Kollektorleistung	67
4.2	Einfluss der Windgeschwindigkeit	70
4.3	Allgemeingültiges Kollektormodell	73
4.3.1	Maximaler Wirkungsgrad	74
4.3.2	Wärmeverluste	74
4.3.3	Einfallswinkelkorrekturvermögen für die direkte Bestrahlungsstärke	75
4.3.4	Einfallswinkelkorrekturvermögen für die diffuse Bestrahlungsstärke	76
4.3.5	Kapazitive Effekte	76
4.3.6	Gültigkeit des Modells	76
5.	Prüfverfahren	77
5.1	Variation der Randbedingungen	77
5.1.1	Variation der Eintrittstemperatur	78
5.1.2	Variation der Bestrahlungsstärke	80
5.1.3	Variation der Einfallswinkel der direkten Bestrahlungsstärke	83
5.1.4	Zusammenfassung der notwendigen Variationen der Eingangsgrößen	83
5.2	Messung und Messsequenzen	84
5.2.1	Kollektorprüfstand	84
5.2.2	Messsequenzen	85
5.2.3	Auswahl der Messsequenzen	86
5.3	Auswertung	87
5.3.1	Kennwertbestimmung	88
5.3.2	Güte der ermittelten Kollektorkennwerte	90
6.	Anwendung des Prüfverfahrens	93
6.1	Flachkollektor	93
6.1.1	Diskussion der Ergebnisse	95
6.2	Vakuumröhrenkollektor	97
6.2.1	Diskussion der Ergebnisse	101
6.3	CPC-Kollektoren	104
6.3.1	Diskussion der Ergebnisse	108
6.4	Parabolrinnenkollektoren	111

6.4.1	Diskussion der Ergebnisse	114
6.5	Verifizierungssequenz	116
6.5.1	Definition der Verifizierungssequenz	116
6.5.2	Definition der Akzeptanzkriterien	117
6.5.3	Exemplarische Anwendung der Verifizierungssequenz	118
6.6	Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	120
6.6.1	Diskussion der Ergebnisse	121
6.7	Unsicherheitsanalyse der bestimmten Kennwerte	122
7.	2-Knoten-Modell.....	127
7.1	Modellierung des 2-Knoten-Modells	128
7.2	Anwendung des 2-Knoten-Modells bei der Auswertung von Messdaten.....	129
7.2.1	Anwendung des 2-Knoten-Modells bei einem Flachkollektor.....	129
7.2.2	Anwendung des 2-Knoten-Modells bei einem Vakuumröhrenkollektor.....	133
7.3	Bewertung des 2-Knoten-Modells zur Bestimmung der Kollektorkennwerte	137
7.4	Zeitsparendes Kollektorprüfverfahren unter Verwendung des 2-Knoten-Modells	138
7.4.1	Das Verfahren	138
7.4.2	Anwendung des Verfahrens auf einen Flachkollektor.....	139
7.4.3	Anwendung des Verfahrens auf einen Vakuumröhrenkollektor	141
7.4.4	Bewertung des Verfahrens.....	143
8.	Zusammenfassung	145
8.1	Diskussion der Ergebnisse	146
8.2	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	147
9.	Literaturverzeichnis	149
10.	Anhang	155
Anhang A:	Sichtfaktoren für ausgewählte geometrische Anordnungen.....	155
Anhang B:	Diffusstrahlungsmodell nach Brunger.....	156
Anhang C:	Wolkenbilder	159
Anhang D:	Graphische Darstellung der standardisierten Eingangsdaten	161