

Collector coefficient identification and uncertainty calculation by the “Weighted least square method WLS” for steady state and quasi dynamic collector tests

Manfred Georg Kratzenberg¹, Hans Georg Beyer², Sergio Colle¹, Dirk Petzoldt¹

¹ LABSOLAR, Departamento de Engenharia Mecanica, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-001 Florianopolis-SC, Brasilien

Tel.: 0055 48 3319379 Fax: 0055 48 2317615

E-Mail: manfred@labsolar.ufsc.br

² Fachbereich Elektrotechnik, Hochschule Magdeburg-Stendal

E-Mail: Hans-Georg.Beyer@Elektrotechnik.HS-Magdeburg.de

A fundamental pre-requisite for the characterization and quantification of thermal solar collectors is the test for the determination of the coefficients of the efficiency curve of those collectors. There are two different test procedures given by EN 12975, the steady state collector test (**SST**) and the quasi dynamic collector test (**QDT**). The dynamic test has the advantage, that it is possible to execute more collector tests with the same test equipment in the same time than the steady state collector test. On the other hand the dynamic test requires a somewhat more demanding effort for the coefficients extraction. The objective of the present work is the discussion of the test procedures in view of the uncertainty of the determination of the collector coefficients. The methodology for the verification of real confidence limit and the **WLS** (weighted least square method) regression method applied in the trend-setting dynamic collector test is also presented in this paper.

Bestimmung der Kollektorparameter und ihrer Unsicherheiten über die Methode der gewichteten Fehlerquadrate für den statischen und den quasi-dynamischen Kollektortest

Manfred Georg Kratzenberg¹, Hans Georg Beyer², Sergio Colle¹, Dirk Petzoldt^{1,2}

¹ LABSOLAR, Departamento de Engenharia Mecanica, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-001 Florianopolis-SC, Brasilien

Tel.: 0055 48 3319379 Fax: 0055 48 2317615

E-Mail: manfred@labsolar.ufsc.br

² Fachbereich Elektrotechnik, Hochschule Magdeburg-Stendal

E-Mail: Hans-Georg.Beyer@Elektrotechnik.HS-Magdeburg.de

1. Einleitung

Eine fundamentale Grundvoraussetzung für die Charakterisierung von Solarkollektoren ist der Test zur Bestimmung der Kollektorkoeffizienten. Die möglichen Prüfverfahren werden unter anderem durch die Euronorm EN 12975 [1] und die ISO Norm ISO 9806 [2] vorgegeben. Zur Bestimmung der Kollektorkoeffizienten und damit der Wärmeleistung, werden von der EN 12975 zwei verschiedene Prüfverfahren vorgegeben. Dabei handelt es sich um das „Prüfverfahren unter stationären Bedingungen“ **SST** (steady state collector test) und das „Prüfverfahren unter quasi-dynamischen Bedingungen“ **QDT** (quasi dynamic collector test).

Bei beiden Prüfverfahren werden der gleiche Testaufbau und die gleichen Messgeräte verwendet, allerdings ist das Ermitteln der Koeffizienten beim **QDT** aufwendiger. Momentan wird bei den verschiedenen Testinstituten hauptsächlich der **SST** durchgeführt. Wie bei [4] beschrieben, ist die Anzahl der nutzbaren Teststunden beim Einsatz des **QDT** etwa fünfmal höher als beim **SST**. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die Kollektorauslauftemperatur (bei variabler

Einstrahlung) bei diesem Test variieren darf [1]. Der Vergleich von **SST** und **QDT** wurde bereits durchgeführt [9], allerdings wurden keine Aussagen über die Unsicherheiten gemacht. Im Folgenden sollen die Unsicherheiten der ermittelten Koeffizientensätze, insbesondere für das **QDT** Verfahren, verglichen werden. Dazu wird ein Verfahren eingesetzt, das die Messunsicherheiten explizit berücksichtigen kann. Dieses Verfahren wird mit dem üblicherweise verwendeten Regressionsverfahren auf Basis der kleinsten Fehlerquadrate verglichen.

2. Regressionsverfahren zur Bestimmung der Kollektorparameter im quasi dynamischen Meßverfahren QDT (quasi dynamic test)

Die Euronorm gibt für den **QDT** die Multilineare Regression **MLR** an. Dabei wird der Kollektorwirkungsgrad über ein sechsparametriges Modell abgebildet (1). Die sechs Variablen des Modells werden aus den gemessenen Größen ermittelt. Aus der Regression können die sechs Kollektorkoeffizienten ermittelt werden. Bei der hier durchgeführten Minimierung der „Summe der Fehlerquadrate“ gehen alle Wertepaare aus der Messung und dem Modell gleichgewichtig ein. Da die Unsicherheiten der primären Messwerte (Einstrahlung, Durchfluss, Temperaturen) in die Berechnung des Wirkungsgrades eingehen, bietet sich die Nutzung eines Verfahrens an, welches eine entsprechende Gewichtung bei der Ermittlung des Gesamtfehlermaßes berücksichtigt. Zum Beispiel zeigen Pyranometer durch ihren hohen Offset von etwa 10 W/m^2 im unteren Messbereich einen höheren relativen Messfehler als im oberen an. Die **WLS-Methode** (weighed least Square) lässt somit Messpunkte bei tiefen Einstrahlungen mit weniger Gewichtung in den Regressionsprozess eingehen. In [5], [6] und [7] wurde bereits dokumentiert, dass die **MLR-Regression**, die auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate basiert, für den **SST** nicht ausreichend ist um die Kollektorkoeffizienten mit Ihren Unsicherheiten richtig anzugeben. In diesen Beiträgen wird die Regressionsmethode **WLS** für den **SST** mit Ihren Vorteilen vorgestellt.

Im Folgenden haben wir den Vergleich der **LS** (least Square) und der **WLS**-Regressionsmethode für den **QDT** gegenübergestellt.

3. Das Gewichtete Regressionsverfahren angewendet auf den QDT

Die **WLS- Methode** ist eine gewichtete Regressionsmethode.

Die Methode hat gegenüber der **LS-Methode** folgende grundlegende Vorteile:

- Der Koeffizientenfehler wird auf Grund der Messfehler der Sensoren ermittelt
- Der Messfehler der Sensoren darf in verschiedenen Messbereichen unterschiedlich sein
- Die stochastische Verteilung der Fehlerwerte braucht nicht normalverteilt sein
- Messfehler dürfen miteinander schwach korreliert sein

Wie bei der Methode der minimalen Fehlerquadrate (**LS**), wird bei der **WLS-Methode** die Abhängigkeit der „Quadrate der Abweichung zwischen Modell (1) und Messung (2)“ von den zu bestimmenden Koeffizienten ermittelt. Dafür werden zunächst mit den Meßwerten der Sensoren die Variablen zur Bestimmung des Kollektormodells (1) ausgerechnet.

$$\eta_c = \frac{\eta_0^* \cdot G_b}{G} + \frac{\eta_0^* \cdot b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) G_b}{G} + \frac{\eta_0^* \cdot IAM_{G_d} \cdot G_d}{G} + k_1 \cdot \frac{\Delta T}{G} + k_2 \cdot \frac{(\Delta T)^2}{G} + \frac{k_3}{G} \cdot \frac{dT_m}{dt} \quad (1)$$

optische Eigenschaften
Wärmeverlustr Eigenschaften
Wärmekapazität p.

Variablen 1 - 7 :

$$1: G_b / G = X_{1[i]}; \quad 2: IA_{G_b} / G = X_{2[i]}; \quad 3: G_d / G = X_{3[i]}; \quad 6: \Delta T / G = X_{4[i]};$$

$$5: \Delta T^2 / G = X_{5[i]}; \quad 6: \partial T_m / (\partial t \cdot G) = X_{6[i]}; \quad 7: \eta_{me} = \frac{\overbrace{\dot{Q}_m}^{\text{Kollektorleistung}}}{\underbrace{G \cdot A}_{\text{Sonnenleistung}}} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{G \cdot A} = \eta_{me[i]}$$

G_d : diffuse Strahlung [W/m^2]; G_b : direkte Strahlung [W/m^2]; $G_b = G - G_d$

T_m : mittlere Kollektortemperatur = $T_m = (T_{in} + T_{out}) / 2$ [$^{\circ}\text{C}$]; $\Delta T = T_m - T_a$

T_a : Umgebungstemperatur; θ : Einstrahlungswinkel

Koeffizientensatz erhalten aus der Regression a_1, \dots, a_6 :

$\eta_0^* = a_1$: Konversationsfaktor [-],

$\eta_0^* \cdot b_0 = a_2$: (b_0 : Faktor zur Bestimmung des Einstrahlungswinkelmodifikators für die direkte Strahlung [-]),

$\eta_0^* \cdot IAM_{G_d} = a_3$: (IAM_{G_d} : Einstrahlungswinkelmodifikator für diffuse Strahlung [-])

$k_1 = a_4$: Wärmeverlustrkoeffizient [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$], negativ

$k_2 = a_5$: Wärmeverlustrkoeffizient [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$], negativ

$k_3 = a_6$: Wärmekapazitätskoeffizient [$\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})$],

Die individuellen Fehlerquadrate als Funktion des Koeffizientensatzes $a_1 \dots a_6$ (1) sind über Gleichung (2) bestimmt.

$$(\text{erro}[i])^2 = \left(\eta_{me}[i] - \eta_{mo}[i] \right)^2 = \left(\eta_{me}[i] - \eta_{c}[i] f(X_{1[i]} \dots X_{6[i]}; a_1 \dots a_6) \right)^2 \quad (2)$$

Im nächsten Schritt werden die Unsicherheiten für die zu jedem Zeitpunkt ermittelten **erro** – Werte errechnet. Dazu werden mit der Messunsicherheiten der Sensoren die Messunsicherheit jeder Variablen ermittelt $U_{\eta_{me}}$; $U_{x_1} \dots U_{x_6}$ und mit diesen wird dann die kombinierte Unsicherheit über (3) berechnet.

$$(u_{\text{erro}[i]})^2 = \left(\frac{\partial(\text{erro}[i])}{\partial(\eta_{m}[i])} \cdot U_{\eta_{m}[i]} \right)^2 + \sum_{k=1}^6 \left(\frac{\partial(\text{erro}[i])}{\partial X_{k[i]}} \cdot U_{x_k[i]} \right)^2 \quad (3)$$

$U_{X_{1[j],1}} \dots U_{X_{6[j],6}}$ = Unsicherheiten Variable 1 - 6; $U_{\eta_{me}[i]}$ = Unsicherheit Variable 7

Nach der Bestimmung der quadratischen Quotienten (1), (2) der **erro**- und U_{erro} -Werte, [3] wird eine neue Bewertungsfunktion aufgestellt.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\text{erro}[i])^2}{(U_{\text{erro}}[i])^2} \quad (4)$$

Iterativ werden über ein Rechenprogramm die Kollektorkoeffizienten so variiert, dass die Summe der χ^2 -Werte minimiert wird. Wenn die Messunsicherheit U_{erro} zu einem Zeitpunkt sehr groß ist, geht der Einfluß dieses Messfehlers auf das Regressionsresultat zurück.

4. Interpretation der Ergebnisse

Stellen wir die Wirkungsgradmesswerte den Wirkungsgradrechenwerten gegenüber, ist zu ersehen, dass sich während des gesamten Versuchs keine besonders hohe Differenz **erro** ergibt. In Tabelle1 sind die Koeffizienten zu ersehen, die mit der **LS**- und der **WLS-Regressionmethode** ermittelt worden sind. Für die **WLS-Methode** sind auch die Unsicherheiten für einen Vertrauensbereich von 95% nach dem in [4] vorgestellten Verfahren ausgerechnet worden. Die sich durch die Unsicherheit ergebenden maximal und minimal möglichen Koeffizientenwerte sind ebenfalls in der Tabelle zu ersehen.

Aus Tabelle 1 ist zu ersehen, dass die über die **WLS-Methode** ermittelten Kollektorkoeffizienten sich innerhalb des Unsicherheitsbereiches der über die **LS-Methode** bestimmten Koeffizienten befinden. Die Ergebnisse der beiden Methoden sind daher vergleichbar. Da die ersten 30 Messpunkte bei klarem Himmel aufgenommen wurden, kann man davon ausgehen, dass das optische Verhalten (bestimmt durch die Koeffizienten η_0 , b_0 und M_{diff}) des Kollektors sehr zuverlässig ermittelt wurde. Dies kann man auch an die kleinen prozentualen Unsicherheiten dieser Parameter ersehen (Tabelle 1). Der Koeffizient der Wärmekapazität C_{eff} kann nur mit sehr hohen Unsicherheiten ermittelt werden (Tabelle 1). In Bild 1 sind die Resultate der **LS-Methode** in Form einer normierten Wirkungsgradkennlinie dargestellt.

| | LS | | | WLS | | |
|-------------|---------|--------|--------|------|--------|------|
| | Min. | Koef. | Max. | Min. | Koef. | Max. |
| η_0 | 0.710 | 0.716 | 0.722 | | 0.713 | |
| b_0 | 0.119 | 0.144 | 0.170 | | 0.130 | |
| I_{AMdfu} | 0.827 | 0.868 | 0.908 | | 0.898 | |
| k_1 | -6.445 | -5.890 | -5.335 | | -6.110 | |
| k_2 | -0.049 | -0.038 | -0.027 | | -0.035 | |
| C_{eff} | -3821.2 | -636.0 | 2549.1 | | -612.1 | |

Tabelle 1: Koeffizienten des Kollektors mit Messunsicherheiten im Vertrauensbereich von 95%

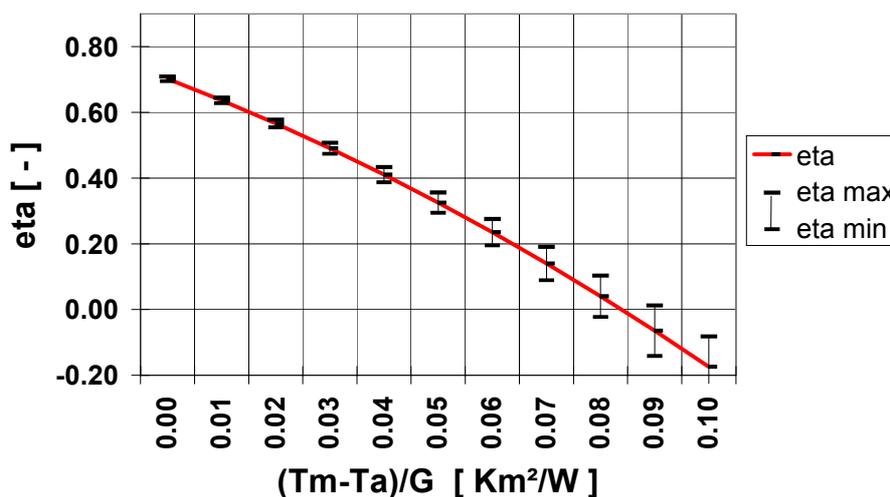


Bild 1: Normierte Wirkungsgradkurve η mit Angabe der 95% Unsicherheit.

5. Schlussfolgerungen

Der quasi dynamische (**QDT**) sowie der statische Kollektortest (**SST**) werden unter OUTDOOR-Bedingungen durchgeführt. Messtechnisch gesehen, sind die beiden Tests dadurch nicht „wiederholbar“, da nie die gleichen Wetterkonstellationen auftreten. Insbesondere bei Verwendung eines Verfahrens auf der Basis gewichteter Fehlerquadrate können die Unsicherheiten der ermittelten Kollektorkoeffizienten sowie der Kollektorwirkungsgradkennlinie angegeben werden. Eine Überprüfung dieser Unsicherheitsangaben erfordert noch die Analyse mehrere vollständiger Messperioden.

Das gewichtete Regressionsverfahren ermittelt geringfügig unterschiedliche Koeffizienten als das ungewichtete Verfahren. Diese Methode sollte, wie beschrieben das prinzipiell genauere Verfahren sein. Diese Hypothese ist noch durch die Nutzung umfangreicherer Datensätze zu bestätigen.

Literaturverzeichnis

- [1] EN 12975:2000, Thermal solar systems and components-solar collector
- [2] ISO 9806, Thermal performance test for solar collectors
- [3] ABNT 1988 Coletores solares planos para líquidos - Determinação do rendimento térmico
- [4] M. Kratzenberg, H.G. Beyer, S. Colle, Setup of a test facility for the characterization of thermal collectors according to the Euronorm at the “Universidade Federal de Santa Catarina”, Proceedings: “Sum at the end of the world” Internacional solar energy congress, Valparaiso, Chile, 2002
- [5] V. Sabatelli, D. Marano, G. Braccio, V.K. Sharma, Efficiency test of solar collectors: uncertainty in the estimation of regression parameters and sensitivity analyses, Energy Conversion & Management, Vol. 42, 2002
- [6] Ch. Müller-Schöll, U. Frei, Uncertainty analyses in solar collector measurements, Proc. of the Eurosun 2000, Kopenhagen, Denmark, 2000
- [7] E. Mathioulakis, K. Voropoulos, V. Belessiotis, Assessment of uncertainty in solar collector modeling and testing, Solar Energy Vol 66, 1999
- [8] W.H. Press, Numerical Recipes, Cambridge University Press, Cambridge, 1986
- [9] S. Fischer, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, B. Peters, A. Berquist, Collector test method under quasidynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2, Proc. ISES Solar World Congress, Adelaide, Australia, 2001

