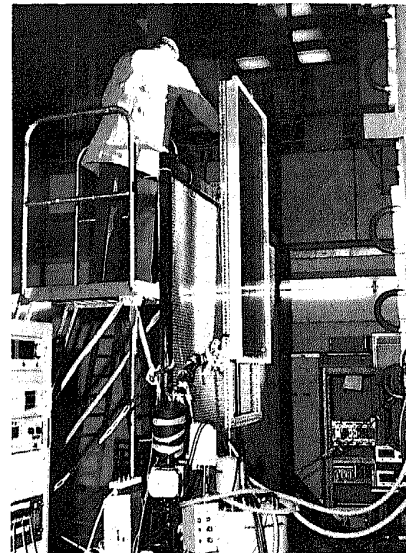


Kollektortest im Sonnensimulator

Guido von Thun*)

Sonnenkollektoren sind zwar relativ einfache Bauteile, aber wer es sich zu einfach macht, wird keine thermisch hochwertigen Kollektoren entwickeln können. Spätestens offenbaren Messungen unter exakten Laborbedingungen, was ein Kollektor leistet. Der Bericht schildert die Prüfung der thermischen Qualität eines neu entwickelten Sonnenkollektors in einem Sonnensimulator, der normalerweise Forschungsaufgaben in der Raumfahrt dient. Der Test wurde durchgeführt vom Ingenieurbüro Guido von Thun und betraf einen Kollektor der Firma Fritz Berger, Neumarkt/Opf.



Ein Sonnenkollektor der Firma Fritz Berger im Sonnensimulator

Die thermische Leistung eines Kollektors kann im wesentlichen durch die Angabe des momentanen Wirkungsgrades in Abhängigkeit der Einstrahlung, der Umgebungstemperatur und der Einlauftemperatur in den Kollektor beschrieben werden. Damit ist noch keine Aussage über die thermische Trägheit gemacht, d. h. das Verhalten des Kollektors im instationären Zustand. Da dieses Verhalten weder in Rechenpro-

grammen zur Bestimmung der Leistung gesamter Anlagen Berücksichtigung findet, noch sonstige praktische Auswirkungen hat, wird auf die Ermittlung der Zeitkonstante des Kollektors verzichtet.

In verschiedenen Untersuchungen [1, 2, 3, 4] wird nachgewiesen, daß die Leistung eines Flachkollektors im stationären Zustand ausreichend genau durch die Beziehung

$$\frac{q_u}{A_a} = I_t (\tau\alpha)_e - U_L (t_p - t_a) = \frac{\dot{m}}{A_a} c_p (t_{i,e} - t_{i,i}) \quad (1)$$

beschrieben werden kann. Aus Gründen der Bequemlichkeit und um der Notwendigkeit vorzubeugen, die durchschnittliche Platinentemperatur zu ermitteln, hat es sich als zweckmäßig erwiesen, den Parameter F_R einzuführen.

$$F_R = \frac{\text{tatsächlich nutzbare, gesammelte Energie}}{\text{mögliche gesammelte Energie, wenn die ganze Platinenfläche die Zulauftemperatur hätte}}$$

Wird dieser Faktor mit

$$\eta_g = \frac{q_u}{A_g \cdot I_t} = \frac{\text{tatsächliche gesammelte nutzbare Energie}}{\text{auf den Kollektor eingestrahlte Energie}} \quad (2)$$

in obige Gleichung eingesetzt, ergibt sich der Wirkungsgrad eines Kollektors zu

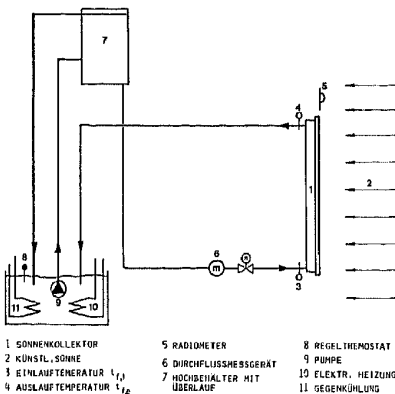
$$\eta_g = (A_a/A_g) F_R \left\{ (\tau\alpha) - U_L \frac{(t_{i,i} - t_a)}{I_t} \right\} = \frac{\dot{m} c_p (t_{i,e} - t_{i,i})}{A_g I_t} \quad (3)$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich, daß die Funktion

$$\eta_g = f \left(\frac{t_{i,i} - t_a}{I_t} \right) \text{ als Graph dargestellt eine Gerade ist, mit der Neigung}$$

$$A_a/A_g \cdot F_R \cdot U_L$$

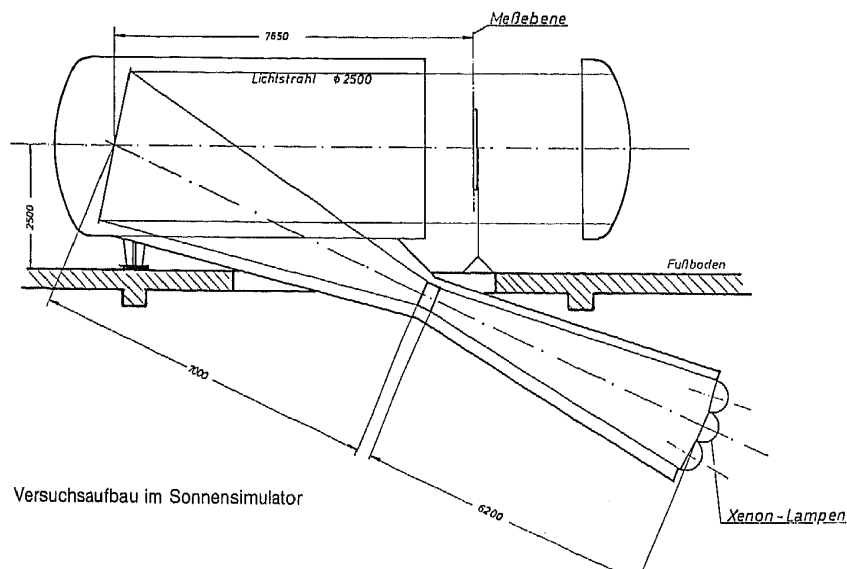
und dem Schnittpunkt auf der Y-Achse bei $(\tau\alpha)_e$.



Entsprechend dieser Schemazeichnung wurde der Kollektor in die Meßebeine des Simulators gebracht und an einen Wasserkreislauf angeschlossen.

Verwendete Formelzeichen

- A_a lichtdurchlässige Frontfläche des Kollektors
- A_g Bruttokollektorfläche
- c_p spez. Wärmekapazität des Wärmeträgers
- I_t Sonneneinstrahlung auf die Kollektorfläche
- \dot{m} Massenstrom des Wärmeträgers
- q_u vom Kollektor gesammelte nutzbare Energie
- U_L Gesamtwärmedurchgangszahl des Kollektors
- t_a Umgebungstemperatur
- $t_{i,e}$ Temperatur des Wärmeträgers beim Verlassen des Kollektors
- $t_{i,i}$ Temperatur des Wärmeträgers beim Eintritt in den Kollektor
- t_p durchschnittliche Kollektorplatinentemperatur
- α Absorptionskoeffizient ohne Wärmeübergangszahl
- ε Emissionszahl
- $(\alpha\varepsilon)_e$ effektives Produkt aus der Absorptionszahl der Platine und der Transmissivität der Abdeckscheibe



Versuchsaufbau im Sonnensimulator

*) Ingenieur-Büro Guido von Thun, Postfach 160364, 8500 Nürnberg

Da die Wärmedurchgangszahl des Kollektors U_i keine Konstante, sondern eine Funktion der Temperatur und der Umgebungsbedingungen ist, ist die Wirkungsgradkurve in Wirklichkeit keine Gerade.

Aus Gleichung 3 ergeben sich die Werte, die gemessen werden müssen. Aus Gründen der Genauigkeit werden jedoch alle Werte, die Auswirkungen auf die Ergebnisse haben können, zu den jeweiligen Meßzeitpunkten registriert.

Versuchsdurchführung

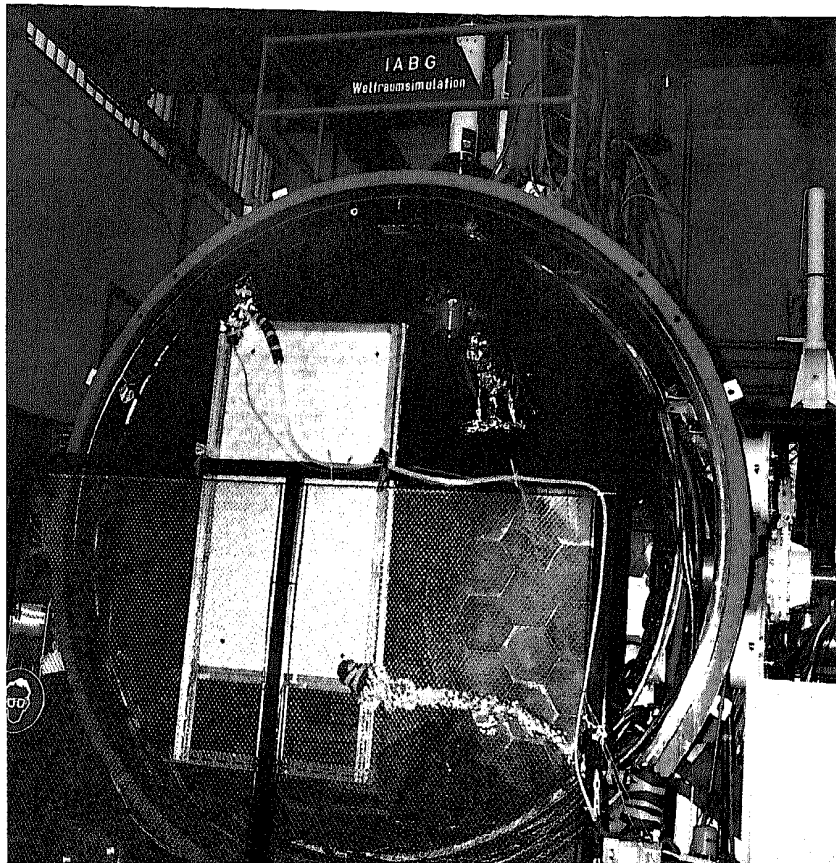
Ziel des Tests war, die Leistungen respektive die Wirkungsgradkurve des Kollektors zu ermitteln. Da es eine Vielfalt von Möglichkeiten gibt, die Eigenschaften von Kollektoren zu beschreiben, wurde nach einer Meß- und Versuchsmethode Ausschau gehalten, die – international bekannt und anerkannt ist

- eine Grundlage zur Berechnung von Solaranlagen liefert
- mit der vergleichende Betrachtungen angestellt werden können.

Die Wahl fiel auf den ASHRAE Standard 93–77, der auf dem „Interim Report NBSIR 74–635“ basiert. Dieser wurde für die National Science Foundation von James E. Hill und Tamami Kusuda, National Bureau of Standards (USA), ausgearbeitet.

Der Test wurde bei der Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG) in Ottobrunn durchgeführt. Bei der IABG ist ein Sonnensimulator installiert, der Forschungszwecken für die Raumfahrt dient, aber für jede Art, die Sonneneinstrahlung zu simulieren, verwendet werden kann.

Der Wirkungsgrad der Kollektoren sollte unter den am häufigsten eintretenden Bedingungen ermittelt werden. Dazu wurden zehn Betriebszustände ausgewählt, bei denen die Leistung gemessen wurde. Die Bestrahlungsstärken wurden zwischen 500 und 900 W/m² und die Eintrittstemperaturen zwischen 30 °C und 80 °C ausgewählt.



Im Sonnensimulator der IABG in Ottobrunn werden normalerweise Komponenten von Satelliten getestet. Diesmal wurde ein „irdischer“ Sonnenkollektor der künstlichen Sonne ausgesetzt, um seine thermischen Qualitäten exakt zu ermitteln.

Die Daten des Kollektors:

- Außenmaße: 1670×940×75 mm
- Gewicht: 46 kg
- Rahmen aus gezogenem AL-Profil, auf Wunsch braun eloxiert. Rückseitenisolierung 2lagig
 - 20-mm-PU-Schaum beidseitig, Al-kaschiert
 - 10-mm-Mineralwolle einseitig, Al-kaschiert
- 1 Abdeckscheibe aus Planglas klar, mit Silikon in den Rahmen eingedichtet.

Bei dieser Art der Beschichtung wird keine zusätzliche Schicht aufgetragen, sondern die Kristallstruktur der Platine an der Oberfläche in ihren optischen Eigenschaften verändert. Dadurch ist eine mechanisch unempfindliche Oberfläche mit hohen Standzeiten gegeben. Die Seeluftbeständigkeit ist größer als 12 Jahre.

Testaufbau

Der Sonnenkollektor wurde nach der Zeichnung am Textanfang in der Meßebebene des Sonnensimulators angebracht und an einen Wasserkreis angeschlossen.

Da es sich als schwierig erweist, mit einer Pumpe einen konstanten Durchfluß mit so niedrigen Mengen zu erreichen, wurde über einen Flachbehälter (7) mit Überlauf ein konstanter hydrostatischer Druck gewährleistet, und damit ein sehr konstanter Volumenstrom durch den Kollektor. Die Pumpe 9 dient der Speisung des Hochbehälters mit Wasser aus dem Vorratsbehälter. Im Vorratsbehälter wird die Temperatur über den Regler 8 mittels der elektrischen Heizung und der Kühlung auf konstanten Werten gehalten.

Bestrahlungsstärke I (W/m ²)	Eintrittstemperaturen $t_{i,j}$ (°C)					
	30 °C	45 °C	60 °C	70 °C	80 °C	
500	30 °C	45 °C	60 °C			
700	30 °C	45 °C	60 °C			
900		45 °C	60 °C	70 °C	80 °C	

Der Eintrittstemperaturbereich von 30 °C bis 60 °C entspricht 95% der Anwendungsfälle von Sonnenkollektoranlagen. Als Wärmeträger wurde Wasser genommen. Der Durchfluß wurde in Übereinstimmung mit ASHRAE mit 0,02 kg/s · m² entsprechend 72 l/m² · h gewählt.

Kollektor

Der Testkollektor war eine Weiterentwicklung des bisher von der Fa. Fritz Berger in Neumarkt/Opf. hergestellten Typs. Es sind wesentliche konstruktive Änderungen vorgenommen worden, die die mechanischen wie auch thermischen Eigenschaften verbessern.

Daten der Platine:

- Größe: 1600×860 mm
- Material: nichtrostender, austenitischer, unstabiler CrNi-Stahl
- Werkstoffnummer: 1.4301
- DIN-Bezeichnung: X5 CrNi 18 9
- Herstellung: Rollbond, aufgeblasen, 20 parallele Kanäle
- Inhalt: 1,91 l
- Beschichtung: selektiv nach dem Polyspektral-Verfahren und elektropliert
- $\alpha = 0,93$ $\epsilon = 0,12$
- scheinbarer Farbton: dunkelblau

Meßergebnisse

Während der Messung wurden insgesamt 50 Meßpunkte mit je neun Werten registriert. Für jeden Betriebspunkt wurden aus den Meßpunkten der Mittelwert und die Abweichung gebildet.

Es ergaben sich folgende Werte:

Nr.	Betriebspunkt		Wirkungsgrad		$\frac{t_{f,i} - t_a}{I_i}$	Standardabweichung	Rückseiten-temp. bei $t_a = 20,5^\circ\text{C}$ \bar{t}_R
	Strahlung I_i W/m ²	Zulauftemp. $t_{f,i}$ C	$\bar{\eta}$ %	Standardabweichung			
1	=500	=30	65,56	±1,7	0,02296	±0,00019	24,18
2	=700	=30	71,27	±1,513	0,01723	±0,00179	24,18
3	=700	=45	63,02	±2,514	0,03635	±0,00124	27,87
4	=500	=45	56,43	±0,32	0,0489	±0,0006	27,87
5	=900	=45	65,00	±1,12	0,02533	±0,00097	27,87
6	=900	=60	55,76	±2,145	0,04344	±0,00172	31,25
7	=700	=60	56,36	±0,976	0,05834	±0,0008	31,25
8	=500	=60	49,71	±1,187	0,08175	±0,00196	31,25
9	=900	=70	54,25	±1,67	0,0523	±0,0003	-
10	=900	=80	52,23	±2,8	0,08158	±0,00081	-

mittelt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ergibt sich aus

$$R^2 = \frac{a\sum y_i + b\sum x_i y_i + c\sum x_i^2 y_i - \frac{1}{n}(\sum y_i)^2}{\sum (y_i^2) - \frac{1}{n}(\sum y_i)^2}$$

Die Wirkungsgradkurve läßt sich durch die Funktion

$$\eta = 0,8063 - 6,836T + 0,3758T^2$$

beschreiben mit $R^2 = 0,9447$.

Kubische Kurvenanpassung

Die grundsätzliche Vorgehensweise ist wie bei der parabolischen Anpassung. Man erhält eine Funktion 3. Ordnung zur Beschreibung der Wirkungsgradkurve.

$$\eta = 0,8618 - 11,199T + 135,39T^2 - 648,01T^3$$

Das Bestimmtheitsmaß ist $R^2 = 0,0948$.

Ergebnisdiskussion

Wie ersehen werden kann, ist die Polynominalanpassung 3. Ordnung diejenige mit dem besten Bestimmtheitsmaß. Bei Anwendung obiger Funktion ist der Gültigkeitsbereich für die angegebenen Werte zu beachten. Er ist für den Kollektor

$$0,015 < \frac{t_{f,i} - t_a}{I_i} < 0,085$$

Der ausgezogene Teil der Wirkungsgradkurve bezeichnet den Gültigkeitsbereich, der gestrichelte stellt Extrapolationswerte dar. Der Sattelpunkt der Kurve kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, daß trotz zunehmender Platinentemperatur die Oberflächentemperatur der Kollektorrückseite nicht linear zunimmt. Hinzu kommt, daß der Wärmeübergangswert für senkrechte Flächen nach [5]

$$1,52 (t_R - t_a)$$

ist. Es wird angenommen, daß diese beiden Punkte die wesentliche Ursache darstellen.

Literaturverzeichnis

- [1] H. C. Hottel, B. B. Woertz „The Performance of Flat-Plate Solar Heat Collectors“, ASME Transactions, Vol. 64, S. 91, 1942
- [2] R. W. Bliss „The Derivation of Several Plate Efficiency Factors . . .“, Solar Energy, Vol. 3, No. 4, 1959
- [3] A. Whillier „Prediction of Performance of Solar Collectors“, ASHRAE GRP 170, ASHRAE, New York 1977
- [4] Duffie, Beckmann „Solar Energy Thermal Processes“, John Wiley and Sons, 1974
- [5] W. H. McAdams „Heat Transmission“, 2. Aufl. New York 1942

Da die Ergebnisse der Messungen in Berechnungen weiter verwendet werden sollten, wurden die statistischen Mittelwerte der Ergebnisse an je eine lineare, quadratische und kubische Kurve angepaßt. Diese Funktionswerte können von Anwendern zur Berechnung von Solaranlagen, bei denen diese Kollektoren eingesetzt werden, mit einschlägigen Programmen wie FCHART, SOLCOST, BLAST, DOE II etc. verwendet werden. Zur Bewertung der Genauigkeit der Kurvenanpassung wird das Bestimmtheitsmaß R^2 für jede Kurve ermittelt.

Lineare Kurvenanpassung

Ein Datensatz mit (x_i, y_i) mit $i = 1, 2, \dots, n$ wird nach der Methode der kleinsten Quadrate an die Gleichung

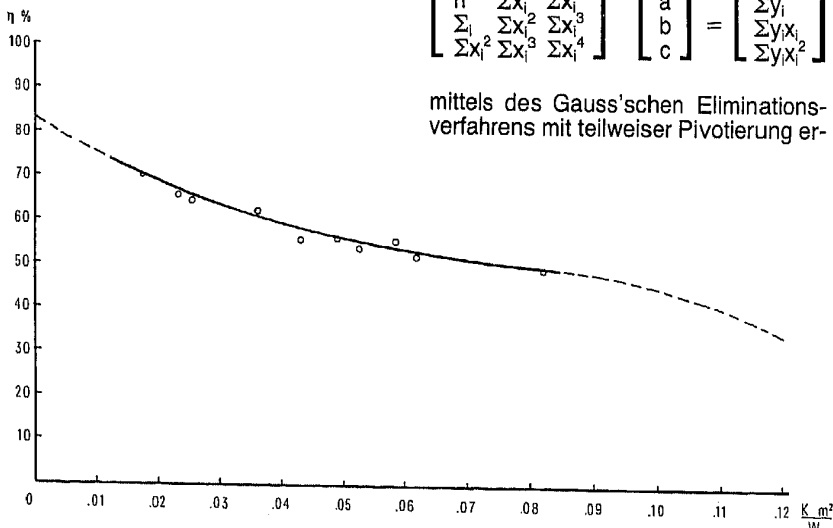
$$\eta = a + bT$$

angepaßt, mit

$$T = \frac{t_{f,i} - t_a}{I_i}$$

Die Regressionskoeffizienten a und b werden anhand des Gleichungssystems

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum (x_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \end{bmatrix}$$



Nach ASHRAE Standard 93-77 ermittelter Wirkungsgradverlauf für den Sonnenkollektor FB 137 CNS der Firma Fritz Berger, Neumarkt/Opf.

mit dem Gauss'schen Eliminationsverfahren ermittelt. Das Bestimmtheitsmaß ist

$$R^2 = \frac{a\sum y_i + b\sum y_i \cdot x_i - \frac{1}{n}(\sum y_i)^2}{\sum (y_i^2) - \frac{1}{n}(\sum y_i)^2}$$

Die Kurve läßt sich durch die lineare Funktion

$$\eta = 73,5 - 322,7 T$$

für η in Prozent oder

$$\eta = 0,735 - 3,227 T$$

beschreiben mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,8994$.

Quadratische Kurvenanpassung

Ein Datensatz mit (x_i, y_i) mit $i = 1, 2, 3 \dots, n$ wird an eine Parabel der Form

$$\eta = a + bT + cT^2$$

nach der Methode der kleinsten Quadrate angepaßt. Die Koeffizienten a, b und c werden durch Lösung des Gleichungssystems

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i x_i \\ \sum y_i x_i^2 \end{bmatrix}$$

mittels des Gauss'schen Eliminationsverfahrens mit teilweiser Pivotierung er-