

Energiebilanzen an der als Sonnenkollektor genutzten Oberfläche eines Biogasreaktors - eine theoretische Studie

Von Welm Friedrichsen, Hans Wilhelm Orth und Dieter Wilkens, Braunschweig*)

Professor Dr.-Ing. Wolfgang Baader zum 60. Geburtstag

DK 620.91:697.329:631.862:662.767.1

Biogasreaktoren benötigen zu ihrem Betrieb Energie, überwiegend in Form von Wärme. In Ländern mit hoher Strahlungsintensität könnte die direkte Nutzung der auf einen Biogasreaktor einstrahlenden Sonnenenergie eine Möglichkeit zur Bereitstellung dieser Wärme sein. In einer theoretischen Betrachtung wird ein Teil der Reaktoroberfläche als Sonnenkollektor genutzt, und für verschiedene Oberflächenkonstruktionen werden Energiebilanzen berechnet.

Ein Energiegewinn wird nur erreicht in Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung und hohen Umgebungstemperaturen. Aber selbst da bleibt der Energiegewinn klein. Eine wärmedämmende Abdeckung in sonnenarmen Zeiten ist unbedingt erforderlich. Geeignete Absorberabdeckungen könnten zu einer weiteren Verminderung des Energiebedarfs des Biogasreaktors führen.

1. Einleitung

Biogasreaktoren werden am häufigsten mesophil betrieben. Daher wird Wärme, meist aus dem produzierten Biogas erzeugt, zur Aufheizung des Substrates und zur Aufrechterhaltung der Temperatur benötigt.

Aus Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung wird in diesem Zusammenhang oft die Frage nach einer möglichen Nutzung der Sonnenenergie zur Bereitstellung der Prozeßwärme für den Biogasreaktor gestellt. Insbesondere die großen Oberflächen des Reaktors scheinen für die Ausbildung als Kollektor prädestiniert zu sein.

Im Rahmen einer theoretischen Fallstudie werden für eine derartige Anordnung die Energieströme in den Reaktor, aber auch die gleichzeitig auftretenden Verluste bilanziert und Folgerungen für die praktische Anwendbarkeit gezogen [1]. Als Beispielesdaten werden Klimadaten der Türkei verwendet.

2. Klimadaten

Bei der Erstellung der Energiebilanzen sind die jahreszeit- sowie tageszeitabhängigen örtlichen Klimagrößen Temperatur und Sonneneinstrahlung zu berücksichtigen. Bild 1 zeigt in Abhängigkeit von der Tageszeit die Sonneneinstrahlung für die Türkei, und zwar im linken Bildteil für eine gegenüber der Horizontalen um 15° geneigte nach Süden ausgerichtete Fläche mit der Jahreszeit als Parameter sowie im rechten Bildteil für unterschiedlich geneigte nach

Süden ausgerichtete Flächen am Beispiel eines mittleren Junitages [2]. Aus Sicht der Sonneneinstrahlung ergibt die unter 15° geneigte Fläche maximale Werte, aber auch Neigungen bis ca. 45° zeigen aufgrund der tageszeitlichen Verteilung gute Werte.

Für die Rechnungen wird parallel zur Sonneneinstrahlung sowohl der Temperaturverlauf der Außenluft wie auch der des Substrates benötigt. Aus Wetterdaten [3, 4] und Erfahrungswerten bzw. durch Abschätzung der Substrattemperatur sind die Temperaturen als Funktion der Jahreszeit in Bild 2 gewonnen worden.

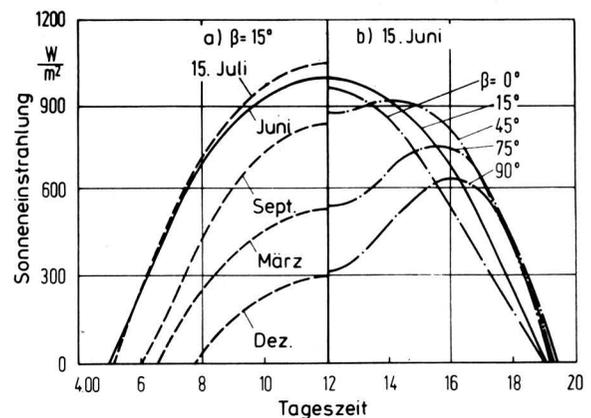


Bild 1. Sonneneinstrahlung in der Türkei auf eine geneigte ebene Fläche in Abhängigkeit von der Tageszeit, links beim Neigungswinkel $\beta = 15^\circ$ mit der Jahreszeit als Parameter, rechts für den 15. Juni mit Neigungswinkel β als Parameter.

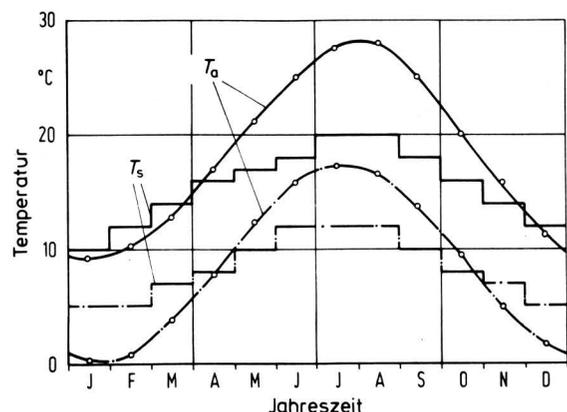


Bild 2. Jahreszeitlicher Verlauf der Außentemperatur T_a und der angenommenen Substrattemperatur T_s .

— Türkei — — Deutschland

*) Dipl.-Ing. W. Friedrichsen ist und Dr.-Ing. D. Wilkens war wiss. Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen der TU Braunschweig (Leiter: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthies); Prof. Dr.-Ing. H.W. Orth lehrt an der Fachhochschule Lünebeck.

3. Modellreaktor

Für die Studie wurde ein zylindrischer 100 m³-Biogasreaktor aus Stahl mit einem Höhen/Durchmesser-Verhältnis H/2 R = 1 angenommen, Bild 3. Ein Teil der Mantelfläche, beschrieben durch den Winkel 2 φ₀ und die Höhe H, wird als Absorber ausgebildet. Die restlichen Flächen sind isoliert, um die Wärmeverluste an der Reaktoroberfläche zu verringern.

In den Berechnungen werden die folgenden unterschiedlich ausgebildeten Absorberflächen, charakterisiert durch ihre Wärmeübergangskoeffizienten a [5], gegenübergestellt:

1. schwarze Oberfläche; a = 20 W/m²K
2. schwarze Oberfläche mit Einfachglasabdeckung; a = 7 W/m²K
3. schwarze Oberfläche mit Doppelglasabdeckung; a = 4 W/m²K
4. selektiv beschichtete Stahloberfläche mit Doppelglasabdeckung; a = 1,5 W/m²K.

Der innere Wärmeübergang von der Absorberplatte an das Flüssigsubstrat wird nach Orth, Pötke u. Sorge [6] mit einem Wert des Wärmeübergangskoeffizienten von a_{in} = 150 W/m²K beschrieben.

In der Modellrechnung kann der Reaktor von der horizontalen Lage der Zylinderachse (β = 0°) bis zur vertikalen (β = 90°) geneigt werden, wobei sicherlich Winkel im Bereich 20–70° konstruktiv schwierig zu verwirklichen sind.

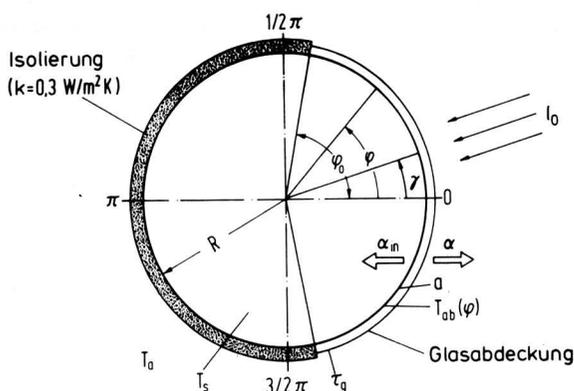


Bild 3. Schema und Bezeichnungen am Querschnitt des Modellreaktors.

a	Absorptionszahl	T _a , T _s	Umgebungs- bzw. Substrattemperatur
α	Wärmeübergangskoeffizient Absorber/Umgebung	φ, φ ₀	Winkelkoordinaten zur Beschreibung der Absorberfläche
a _{in}	Wärmeübergangskoeffizient Absorber/Substrat	γ	Sonnenstandswinkel
I ₀	max. Sonneneinstrahlung	τ _g	Transmissionszahl der Glasabdeckung
T _{ab} (φ)	Absorbertemperatur		

4. Theoretischer Ansatz

Der interessierende Wärmestrom \dot{Q} in den Reaktor bzw. in das Substrat wird beschrieben in differentieller Form durch

$$d\dot{Q} = a_{in} [T_{ab}(\varphi) - T_s] dA \quad (1)$$

mit $dA = H R d\varphi$ Flächenelement
 T_s Substrattemperatur
 $T_{ab}(\varphi)$ Absorbertemperatur als Funktion von φ .

In dieser Gleichung ist nur die Absorbertemperatur unbekannt, sie hängt ab von der Art des Absorbers und der Sonneneinstrahlung und variiert außerdem mit dem Umfangswinkel φ . Für die Verteilung der Sonneneinstrahlung auf der Fläche wird vereinfachend eine Cosinusverteilung angenommen; der Sonnenstandswinkel γ berücksichtigt, daß sich das Maximum mit der Tageszeit verschiebt:

kel γ berücksichtigt, daß sich das Maximum mit der Tageszeit verschiebt:

$$I = I_0 \cos(\varphi - \gamma) \quad (2);$$

der Maximalwert wandert mit der Tageszeit, berücksichtigt durch den Sonnenstandswinkel γ .

Die Absorbertemperatur ergibt sich aus der Energiebilanz an der Absorberfläche: Der eingestrahle Energiestrom ist gleich der Summe aus Wärmestrom in den Reaktor und Verlustwärmestrom von der Absorberoberfläche an die Umgebung.

$$a \tau_g I_0 \cos(\varphi - \gamma) = a_{in} [T_{ab}(\varphi) - T_s] + a [T_{ab}(\varphi) - T_a] \quad (3),$$

mit a Absorptionszahl
 τ_g Transmissionszahl für Glasabdeckungen
 T_a Außentemperatur.

Wird Gl. (3) nach $T_{ab}(\varphi)$ aufgelöst und in Gl. (1) eingesetzt, so läßt sich diese Gleichung durch Integrieren über die Gesamtfläche des Absorbers lösen:

$$\dot{Q} = H R a_{in} \int_{-\varphi_0}^{+\varphi_0} [T_{ab}(\varphi) - T_s] d\varphi \quad (4)$$

$$\dot{Q} = 2 H R \frac{a_{in}}{a_{in} + a} [a \tau_g I_0 \sin(\varphi_0 - \gamma) - \varphi_0 a (T_s - T_a)] \quad (5).$$

Aus Gl. (5) wird unter Berücksichtigung der Tages- und Jahreszeitabhängigkeit der Sonneneinstrahlung (I_0, γ) bei stündlicher Berechnung und Aufsummierung die Gesamtenergiebilanz am Absorber erstellt.

5. Ergebnisse

Mit Hilfe der aufgeführten Gleichungen wurden für den Modellreaktor Energiebilanzen berechnet, wobei die Neigung und die Größe der Absorberfläche sowie die Art der Absorberabdeckung variiert wurden.

Wie aus der Intensität der Sonneneinstrahlung auf eine ebene Fläche unterschiedlicher Neigung schon abzulesen war, sind mittlere Neigungen der Absorberflächen am günstigsten. Da diese Neigungen beim Reaktor jedoch erhebliche konstruktive Nachteile aufweisen, werden im folgenden nur Ergebnisse bei einem Neigungswinkel von $\beta = 15^\circ$ diskutiert.

In dieser nahezu horizontalen Lage der Zylinderachse wurde die Größe der Absorberfläche variiert. Bild 4 zeigt den resultierenden Wärmestrom durch die Absorberfläche für die Türkei für einige ausgewählte Zeitpunkte bei einer mit einer Verglasung abgedeckten schwarzen Absorberfläche. Es ist zu erkennen, daß wegen der hohen Wärmeverluste an der Absorberfläche nur im Sommer Energiegewinne zu erwarten sind.

Für die Bundesrepublik Deutschland ist der resultierende Wärmestrom auch im Sommer negativ, das heißt, es wird über die Absorberfläche mehr Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben als von der eingestrahelten Energie nutzbar ist, wie die strichpunktierte Kurve in Bild 4 zeigt.

Eine Vergrößerung der Absorberfläche verbessert zwar den Energiegewinn im Sommer, vergrößert aber wegen der ansteigenden Wärmeverluste in der übrigen Jahreszeit auch die negativen Werte des resultierenden Wärmestroms.

Dieses wird noch deutlicher sichtbar am jahreszeitlichen Verlauf des resultierenden Wärmestroms für das Absorbermodell mit der einfachen Glasabdeckung, Bild 5. Die Vergrößerung der Absorberfläche ergibt den bereits beschriebenen Effekt der Verbesserung im Sommer und der Verschlechterung im Winter. Ein Energiegewinn ergibt sich von Mai bis September in einer Größe, mit der ein beträchtlicher Teil der Wärme zum Aufheizen des Substrates abgedeckt werden kann.

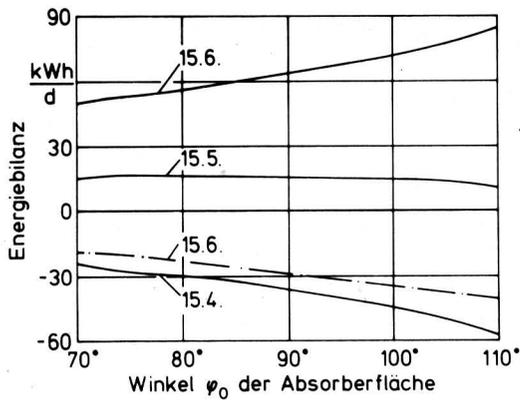


Bild 4. Resultierender Wärmestrom durch die Absorberfläche als Funktion der Größe der Absorberfläche; Absorber mit Einfachglasabdeckung, $\beta = 15^\circ$.

— Türkei
- - - Deutschland

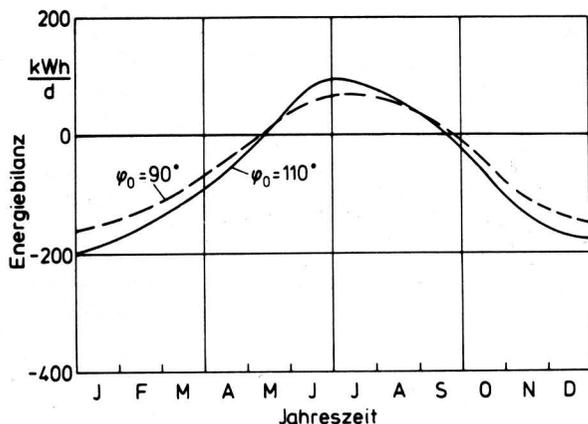


Bild 5. Jahresverlauf des resultierenden Wärmestroms am Absorber; $\beta = 15^\circ$, Absorber mit Einfachglasabdeckung, Türkei.

- - - $\varphi_0 = 90^\circ$
— $\varphi_0 = 110^\circ$

Bei hinsichtlich der Wärmeverluste verbesserten Absorberabdeckungen von dem nur schwarz gestrichenen Absorber ($\alpha = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$) bis hin zu einer selektiven Beschichtung mit Glasabdeckung ($\alpha = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$) werden bei entsprechendem intensivem Aufwand natürlich die Werte des resultierenden Wärmestroms verbessert, **Bild 6**.

Eine stundenweise Berechnung zeigt deutlich, daß im Tagesablauf die nächtlichen Verluste bei den einfachen Absorbern die Gesamtbilanz entscheidend beeinflussen. Um das zu belegen, sind in **Bild 6** die Werte des resultierenden Wärmestroms für die Tagzeit (6.00–18.00 Uhr) denen für einen 24 h-Zeitraum gegenübergestellt.

Aus den dargestellten Ergebnissen ist abzulesen, daß positive Werte des resultierenden Wärmestroms, also ein Energiegewinn, besonders nur dann erreicht werden können, wenn die Verluste zu Zeiten ohne und mit schwacher Sonneneinstrahlung durch wärmedämmende Abdeckung des Absorbers reduziert werden.

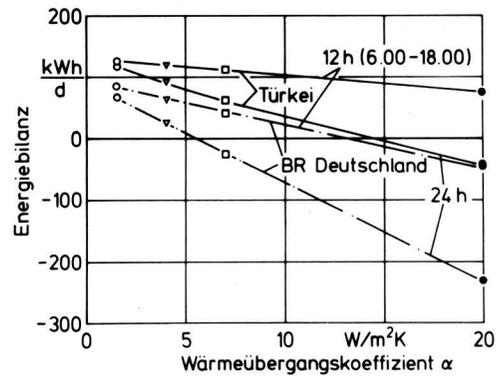


Bild 6. Resultierender Wärmestrom in Abhängigkeit von der Absorberkonstruktion, charakterisiert durch den Wärmeübergangskoeffizienten α ; Juni, $\beta = 15^\circ$, $\varphi_0 = 90^\circ$.

6. Zusammenfassung und Folgerungen

In Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung ist es naheliegend, Sonnenkollektor und Hülle eines Biogasreaktors miteinander zu kombinieren.

Berechnungen für unterschiedlich ausgebildete Absorberflächen belegen jedoch, daß selbst für aufwendige Bauarten ein Energiegewinn nur im Sommer zu erzielen sein wird. Hierfür sind im wesentlichen die großen Verluste an der Absorberfläche in strahlungslosen oder strahlungsschwachen Zeiten verantwortlich. Es ist daher nur dann sinnvoll, die Biogasreaktoroberfläche als Sonnenkollektor zu gestalten, wenn zu Zeiten hoher Wärmeverluste an die Umgebung eine einfache Isolierung vorgenommen werden kann.

Auch Absorberabdeckungen mit hoher Lichtdurchlässigkeit, hoher Absorption und niedrigem Wärmeübergangskoeffizienten wie evtl. Luftbläschenfolien könnten bei einfachem Aufbau in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung eine Entlastung der Energiebilanz am Biogasreaktor bewirken.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] **Friedrichsen, W.:** Berechnung von Energiebilanzen bei solarer Erwärmung von Biogasreaktoren. Unveröffentl. Studienarbeit (E.6/366) Institut für Landmaschinen der TU Braunschweig, 1982.
- [2] ● **Matthöfer, H.:** Forschung Aktuell, Sonnenenergie. Frankfurt/M.: Umschau Verlag 1976.
- [3] ● **Deutscher Wetterdienst:** Agrarmeteorologische Wochenberichte 1981. Zentrale Agrarmeteorologische Forschungsstelle Braunschweig.
- [4] ● **Türkiye İstatistik Yilligi 1975** (Statistical Yearbook of Turkey 1975). Basbakanlık Devlet İstatistik Enstitüsü 1975.
- [5] **Kalischer, P.:** Solarkollektoren, Technik und Wirkungsweise. RWE-Info 141, Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG, Essen 1978.
- [6] **Orth, H.W., W. Pötke u. W. Sorge:** Wärmeübergangszahlen bei laminarer Rohrströmung von in Biogasanlagen genutzten nicht-newtonschen Fluiden. Grndl. Landtechnik Bd. 35 (1985) Nr. 1, S. 15/19.