

Der Wärmehaufwand für den Betrieb von Biogasanlagen

Von Dipl.-Ing. S. NEULING

DK 631.371

Der anschließende Beitrag steht in Zusammenhang mit dem vorhergehenden Aufsatz „Neue Wege in der Stallentmischung“ und geht gleichzeitig auf Probleme ein, die ebenfalls von Prof. Dr. Rosegger in einem Vortrag auf der wissenschaftlichen Tagung in Bornim am 3. Juni behandelt werden.

Die große wirtschaftliche Bedeutung der Biogask Gewinnung in der Landwirtschaft wird allgemein anerkannt, ihre praktische Anwendung ist heute im wesentlichen nur noch eine Frage der Investitionskosten für die technischen Anlagen. Wir sind der Überzeugung, daß es unseren Forschungsinstituten schon bald gelingen wird, alle noch vorhandenen Schwierigkeiten technischer Art zu lösen, um so unserer Landwirtschaft eine zwar bekannte, aber noch nicht erschlossene Energiequelle voll und rentabel zugänglich zu machen.

Zum Thema „Biogas“ haben wir bereits in früheren Ausgaben unserer Zeitschrift Stellung genommen [Heft 5 (1953) Seite 137; Heft 7 (1953) Seite 214; Heft 3 (1955) Referat 5455; Heft 4 (1955), Seite 136]. Wir empfehlen unseren Lesern, auch diese Literatur zu beachten.
Die Redaktion

Einführung

Die Ausfäulung von Fäkalien und städtischen Abwässern wird bereits seit längerer Zeit mit Erfolg durchgeführt. Verhältnismäßig neu ist die Gewinnung von hochwertigem Methan aus landwirtschaftlichen Abfallprodukten und Mist. Während in den südlichen Ländern mit der Biogask Gewinnung schon vor dem ersten Weltkrieg begonnen wurde, hat sich die Vergärung und Ausfäulung landwirtschaftlicher Abfallstoffe in Deutschland erst in neuerer Zeit durchsetzen können [1].

Es muß in diesem Zusammenhang erwähnt werden, daß der Pionier der deutschen Abwassertechnik, Dr. Imhoff, die erste deutsche Biogasanlage kurz vor Kriegsende in Bayern baute [2]. Diese Anlage konnte aus zeitbedingten Gründen nicht fertiggestellt werden. Die Gebäude werden heute für andere Zwecke verwendet, die Maschinen sind verkauft worden. Im Jahre 1947 wurde in Allerhop bei Verden die erste einwandfrei arbeitende deutsche Biogasanlage von Schmidt und Dr. Eggersgluß in Betrieb genommen. Schmidt und Dr. Eggersgluß gingen abweichend von den üblichen Methoden der biologischen Gasgewinnung neue eigene Wege [3]. Dieses Verfahren ist so weit entwickelt, daß mehrere Großanlagen in Westdeutschland zur Zufriedenheit arbeiten.

Der ausgegorene Biogasfaulschlamm ist durch die Erhaltung des bei üblicher Mistlagerung entweichenden Stickstoffs ein ausgezeichneter Dünger. Die Versuche des Instituts für Humuswirtschaft der Forschungsanstalt für Landwirtschaft in Braunschweig-Völkenrode haben die Wirksamkeit des Biogasfaulschlammes als Dünger bestätigt.

Wird in einen Behälter beimpfter Faulschlamm gebracht, so entsteht bereits nach mehreren Tagen infolge der mikrobiologischen Zersetzung Methan. Die an der Methanherzeugung beteiligten Bakterien sind seit längerer Zeit bekannt und in ihren Lebensbedingungen erforscht. Alle Methanbakterien sind Anaerobier, d. h., sie arbeiten nur unter Luftabschluß. Im wesentlichen sind vier Arten von Methanbakterien bekannt [4].

1. *Methanosarcina methanica*;
diese Bakterien arbeiten optimal bei 5 bis 8° C,
2. *Methanococcus Mazei*;
ihre optimale Arbeitstemperatur liegt bei etwa 32° C,
3. *Methanobacterium Söhngenii*,
4. *Methanobacterium Omelianskii*.

Die beiden zuletzt genannten Bakterien sind ausgesprochene thermophile Methanbakterien; sie arbeiten optimal bei 50° C. Wenn angegeben wird, daß Methanbakterien bei den verschiedenen Temperaturen optimal arbeiten, so muß erwähnt werden, daß sie sich an andere Temperaturen gewöhnen können.

Grundsätzlich unterscheidet man je nach der wirkenden Bakterienart die mesophile Gärung, d. h. eine bakteriologische Zersetzung organischer Substanzen bei einer Faultemperatur von etwa 32° C und die thermophile Gärung bei etwa 50° C. Für den Betrieb von Biogasanlagen ergibt sich damit die Notwendigkeit, das gesamte Faulgut – also den durch Jauche- und Wasserzusatz pumpfähig gemachten Häckselmist und andere verflüssigte Abfallstoffe entsprechend der gewünschten Faul-

temperatur – für die Dauer der Fäulung aufzuheizen. Die Wärmeverluste der Faulräume müssen ebenfalls gedeckt werden.

Im folgenden soll der Wärmehaufwand für den Betrieb von Biogasanlagen ohne Berücksichtigung der Wärmeerzeugungseinrichtungen näher erörtert und die mesophile mit der thermophilen Fäulung wärmehauswirtschaftlich verglichen werden.

Wärmehaufwand für die Aufheizung des Faulgutes

Die zur Aufheizung eines beliebigen Stoffes notwendige Wärmemenge kann nach folgender bekannter Beziehung ermittelt werden:

$$Q_H = G \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \quad [\text{kcal}] \quad (1)$$

Um den Wärmehaufwand für die Aufheizung des Faulgutes in Biogasanlagen zu berechnen, ist dabei folgendes zu berücksichtigen:

Aus Gründen eines kontinuierlichen Betriebes von Biogasanlagen und zur Vermeidung von Störungen im Faulprozeß durch unzulässig hohe Faulraumbelastungen werden die Faulräume täglich nur teilweise entleert und neu beschickt. Maßgebend für das tägliche Entleerungs- und Beschickungsvolumen ist die Zeit bis zum Erreichen der technischen Faulgrenze, d. h. bis zu dem Punkt des Faulprozesses, an dem die Gasproduktion merklich nachläßt. Eine vollständige Ausfäulung bei Überschreiten der technischen Faulgrenze ist unwirtschaftlich und wird im praktischen Betrieb nicht durchgeführt. Ist a die Zeit einer Faulperiode in Tagen, so kann das tägliche Entleerungs- und Beschickungsvolumen schnell bestimmt werden. Die Faulzeit a ist für mesophile und thermophile Gärung verschieden und außerdem abhängig von der Art des ausfäulenden Materials. Sie beträgt für thermophile Gärung etwa nur die Hälfte der notwendigen Zeit für die mesophile Gärung. Lange und faserige Stoffe benötigen größere Faulzeiten als kurze und schwammige Materialien.

Beim praktischen Betrieb von Biogasanlagen hat es sich als günstig erwiesen, die Faulräume nicht vollständig zu füllen. Etwa 15% des Gesamtfaulraumes sollen als Gassammelraum dienen. Daraus ergibt sich ein tägliches Entleerungs- und Beschickungsvolumen V_B von

$$V_B = 0,85 V_F \cdot \frac{1}{a} \quad [\text{m}^3] \quad (2)$$

oder das Gewicht des täglich aufzuheizenden Faulgutes

$$G_B = 0,85 \cdot V_F \cdot \gamma_F \cdot \frac{1}{a} \quad [\text{t}], \quad (3)$$

wenn

- G_B Gewicht des täglich aufzuheizenden Faulgutes [t]
 V_F Gesamtvolumen des Faulraumes [m^3]
 γ_F spezifisches Gewicht des pumpfähigen Faulgutes [t/m^3] und
 a Faulzeit bis zur Erreichung der technischen Faulgrenze in Tagen bedeuten.

Das spezifische Gewicht der pumpfähigen Faulmaterialien kann mit $\gamma_F = 1,0 \text{ t}/\text{m}^3$ angenommen werden. Die verschiedenen spezifischen Gewichte für die verflüssigten landwirt-

schafflichen Abfallprodukte und den pumpfähig gemachten Mist weichen nur unwesentlich von dem spezifischen Gewicht des reinen Wassers ab.

Unter Berücksichtigung der Beziehung (3) läßt sich also die täglich notwendige Wärmemenge zum Aufheizen des Faulgutes wie folgt berechnen:

$$Q_H = 0,85 \cdot V_F \cdot \gamma_F \cdot \frac{10^3}{a} \cdot c_F (t_F - t_1) \quad [\text{kcal/Tag}] \quad (4)$$

Hierin bedeuten

- c_F spezifische Wärme des pumpfähigen Faulgutes [kcal/kg°C]
- t_F Faultemperatur [°C] und
- t_1 Temperatur des pumpfähigen Faulgutes vor dem Aufheizen [°C].

Die spezifische Wärme c_F beträgt für die verschiedenen Faulstoffe $c_F = 1,1$ kcal/kg°C [5] und weicht damit von der spezifischen Wärme des reinen Wassers nur wenig ab. Die Faultemperatur t_F liegt je nach der gewünschten Vergärungsart bei etwa 32°C für die mesophile und bei etwa 50°C für die thermophile Gärung.

Wärmeverluste an den Faulbehältern

Von einer warmen Fläche wird an die kältere Umgebung stets Wärme abgegeben. Die Wärme kann durch Konvektion und Strahlung übertragen werden. Die je m² und Stunde übertragene Wärmemenge ist

$$q = q_c + q_s \quad [\text{kcal/m}^2 \text{h}] \quad (5)$$

Für die Faulräume von Biogasanlagen kann ohne weiteres angenommen werden, daß die Oberflächentemperatur t_w und die Umgebungstemperatur t_u für Strahlung und Konvektion gleich sind. Es kann also geschrieben werden

$$q = \alpha (t_w - t_u) \quad [\text{kcal/m}^2 \text{h}] \quad (6)$$

wenn $\alpha = \alpha_c + \alpha_r$ die Wärmeübergangszahl in kcal/m²h°C bedeutet. Im allgemeinen ist die Wandtemperatur nicht bekannt. Dagegen wird man in den meisten Fällen die Wärmedämmschicht in ihrem Leitwert und in ihrer Dicke kennen, so daß die Berechnung des Wärmeüberganges vorteilhafter durch folgende Formel erfaßt werden kann:

$$q = K (t_1 - t_u) \quad [\text{kcal/m}^2 \text{h}] \quad (7)$$

K stellt dabei die Wärmedurchgangszahl dar und setzt sich nach

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1} \cdot \left[\frac{1}{\text{kcal/m}^2 \text{h}^\circ \text{C}} \right] \quad (8)$$

zusammen. α bedeutet hierin die Wärmeübergangszahl [kcal/m²h°C], λ die Wärmeleitfähigkeit [kcal/mh°C] und l die Dicke der Dämmschicht [m].

Es hat sich bei der Berechnung von Wärmeverlusten, insbesondere für verschieden große Faulräume von Biogasanlagen als vorteilhaft ergeben, die Fläche in die Formel zur Berechnung des Wärmedurchgangs mit einzubeziehen. Es ergibt sich dann $Q_D = F \cdot K \cdot Z \cdot (t_F - t_u)$ [kcal] (9) wenn

- Q_D Wärmedurchgang [kcal]
- F Oberfläche des Faulraumes [m²]
- K Wärmedurchgangszahl [kcal/m²h°C]
- Z Zeit [h]
- t_F Faultemperatur [°C]
- t_u Umgebungstemperatur [°C] ist.

Aus dieser Formel kann eine Schlußfolgerung für den Bau von Faulräumen für Biogasanlagen gezogen werden. Der Wärmeverlust Q_D wächst linear mit der Faulraumoberfläche. Es muß also das Ziel des Konstrukteurs sein, die Faulraumoberfläche zum Behältervolumen relativ klein zu halten. Diese Forderung wird erfüllt durch ein Verhältnis von Behälterdurchmesser d zur Behälterhöhe h gleich 1.

Wärmewirtschaftlicher Vergleich von mesophiler und thermophiler Faulung

Um schnell und ohne Rechnung den notwendigen Wärmeverbrauch für den Betrieb von

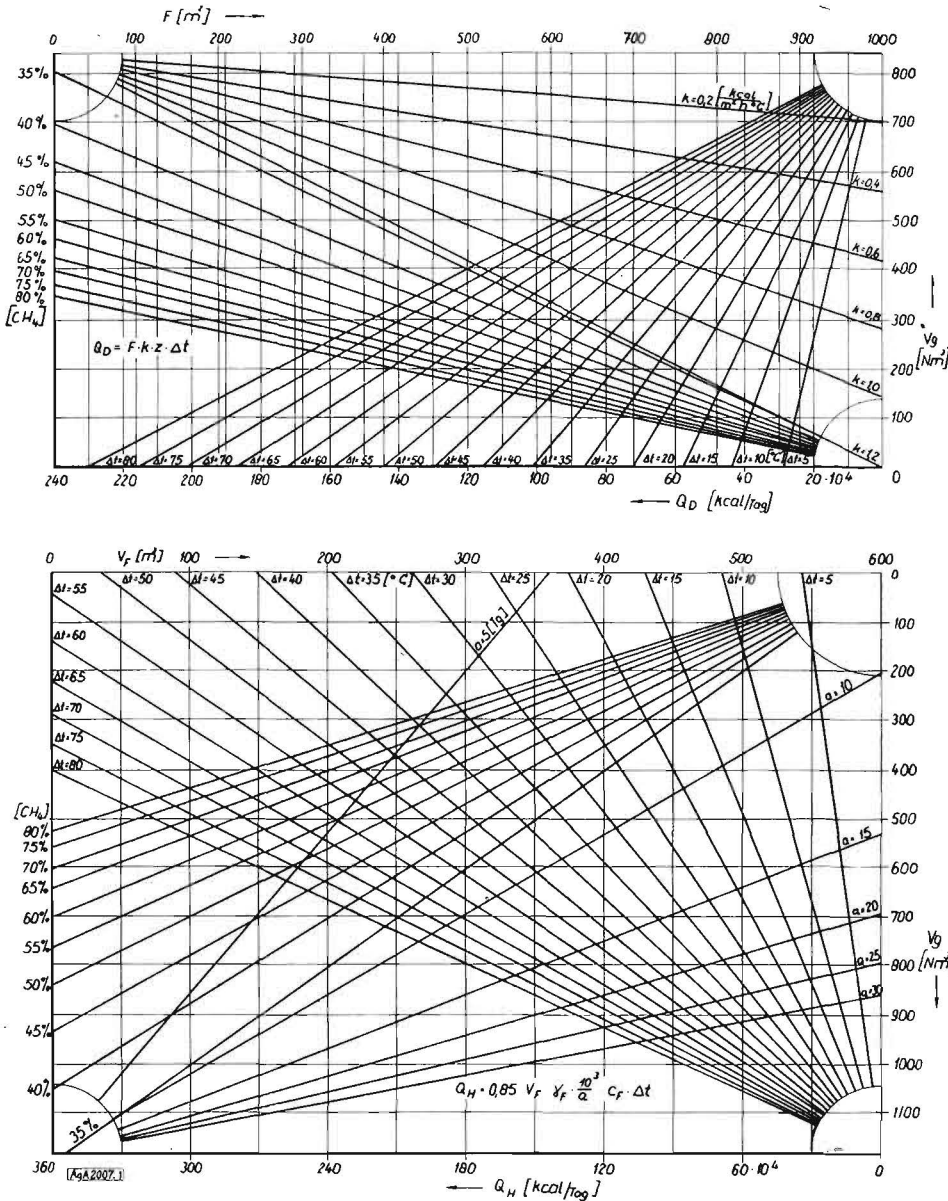


Bild 1. Nomogramm zur Bestimmung des Wärmeverbrauches für den Betrieb von Biogasanlagen.

- Ablesevorschrift: a Wärmemenge zur Aufheizung
 $V_F \rightarrow a \rightarrow \Delta t \rightarrow Q_H$ und % $CH_4 \rightarrow V_g$
- b Wärmeverluste des Faulraumes
 $F \rightarrow K \rightarrow \Delta t \rightarrow Q_D$ und % $CH \rightarrow V_g$

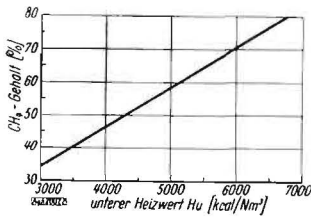


Bild 2. Abhängigkeit des Heizwertes vom Methangehalt des Biogases

Biogasanlagen ermitteln zu können, wurde vom Verfasser das dargestellte Nomogramm (Bild 1) aufgestellt. Als Grundlage dieses Nomogrammes dienen die Beziehung (4) für die notwendige Wärmemenge zum Aufheizen des Faulgutes und die Formel (9) für den Wärmedurchgang.

Als veränderliche Größen sind für die notwendige Aufheizwärmemenge im Nomogramm das Faulraumvolumen V_F , die Faulzeit a und die Temperaturdifferenz Δt dargestellt. Für die Wärmeverluste sind dagegen die Faulraumbofläche F , die Wärmedurchgangszahl K und die Temperaturdifferenz Δt als Variable mit eingezeichnet.

Der Verfasser hat es als zweckmäßig erachtet, neben der Ableitung der Wärmemenge Q auch die Bestimmung des dafür notwendigen Biogasvolumens in Abhängigkeit vom Methangehalt und damit des Heizwertes (Bild 2) mit in das Nomogramm aufzunehmen. Für einen wärmewirtschaftlichen Vergleich zwischen der mesophilen und der thermophilen Faulung sollen die folgenden aufgeführten Größen für beide Faulungsarten gemeinsam gelten:

Faulraumvolumen $V_F = 400 \text{ m}^3$ (das entspricht einem inneren Durchmesser von etwa 8,0 m bei einem Verhältnis $d : h = 1$).

Dieser angenommene Faulraum soll etwa 2,50 m tief in das Erdreich eingelassen sein, so daß sich damit eine Faulraumbofläche, die von Luft umgeben ist, in Höhe von

$$F_{\text{Luft}} = 235 \text{ m}^2$$

und eine Faulraumbofläche im Erdreich von

$$F_{\text{Erdreich}} = 130 \text{ m}^2$$

ergibt. (Die Wand und Isolierschichtdicke ist mit 40 cm angenommen. Es ergibt sich ein äußerer Behälterdurchmesser von 8,80 m.) Die Wärmedurchgangszahl wird mit $K = 0,4 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ \text{C}$ angenommen, während die Faultemperatur für die mesophile Faulung $t_F = 32^\circ \text{C}$ und für die thermophile Faulung $t_F = 50^\circ \text{C}$ beträgt. Die umgebende Luft soll eine mittlere Temperatur von $t_u = 9^\circ \text{C}$ und das Erdreich eine mittlere Temperatur von $t_u = 7^\circ \text{C}$ besitzen. Die Temperatur des pumpfähigen Faulgutes vor dem Aufheizen wird mit $t_1 = +14^\circ \text{C}$ angenommen.

Für die mesophile Faulung beträgt bei Vergärung von Rindermist die Faulzeit bis zum Erreichen der technischen Faulgrenze $a = 20$ Tage, bei thermophiler Faulung dagegen nur $a = 10$ Tage. Für beide Faularten soll das gewonnene Biogas einen Methangehalt von 58,5% CH_4 besitzen, d. h. der Heizwert des Biogases beträgt $H_u = 5000 \text{ kcal/Nm}^3$.

Eine Ermittlung des notwendigen Wärmehaufandes im Nomogramm ergibt folgendes:

a) Mesophile Faulung

Notwendige Wärmemenge zum Aufheizen

$$Q_H = 336,60 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tag,}$$

das entspricht einer Gasmenge von

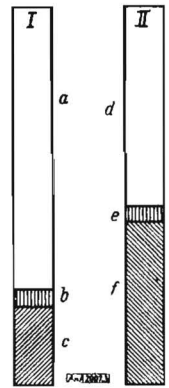
$$V_g = 67,32 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas.}$$

Wärmeverluste in das Erdreich $Q_D = 31,20 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tag}$, das entspricht einer Gasmenge von $V_g = 6,20 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}$. Wärmeverluste an die Luft $Q_D = 51,89 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tag}$, das entspricht einer Gasmenge von $V_g = 10,37 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}$.

Bild 3. Anteil des Wärmehaufandes an der erzeugten Gasmenge (berechnet für einen zylindrischen Faulraum mit $V_F = 400 \text{ m}^3$, einer Wärmedurchgangszahl von $K = 0,4 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ \text{C}$ und Faultemperaturen bei $t_F = 32^\circ \text{C}$ und $t_F = 50^\circ \text{C}$).

I mesophile, II thermophile Faulart.

a nutzbare Restwärmemenge $74,10\% = 1200,31 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tg}$; b Wärmemenge zur Deckung der Wärmeverluste $5,13\% = 83,09 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tg}$; c Wärmemenge zur Aufheizung $20,77\% = 336,6 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tg}$; d nutzbare Restwärmemenge $52,46\% = 1647,45 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tg}$; e Wärmemenge zur Deckung der Wärmeverluste $4,65\% = 146,15 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tg}$; f Wärmemenge zur Aufheizung $42,88\% = 1346,40 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tg}$



b) Thermophile Faulung

Notwendige Wärmemenge zum Aufheizen

$$Q_H = 1346,40 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tag,}$$

das entspricht einer Gasmenge von $V_g = 271,28 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}$. Wärmeverluste in das Erdreich $Q_D = 53,66 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tag}$, das entspricht einer Gasmenge von $V_g = 10,73 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}$. Wärmeverluste an die Luft $Q_D = 92,49 \cdot 10^3 \text{ kcal/Tag}$, das entspricht einer Gasmenge von $V_g = 18,49 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}$.

Aus den ermittelten Zahlen geht klar die wärmewirtschaftliche Überlegenheit der mesophilen Faulung hervor. Zum besseren Vergleich sollen diese Werte mit der erzeugten Gasmenge in Verbindung gebracht werden.

Je m^3 Bruttofaulraum können bei mesophiler Faulung je Tag $0,81 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}$ im Durchschnitt bei einer täglichen Faulraumbelastung von $3,0 \text{ kg/m}^3$ gewonnen werden, während bei thermophiler Faulung mit der doppelten Faulraumbelastung je Tag $1,57 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}$ erzeugt werden. Unter Zugrundelegung derselben Werte wie bei der vergleichenden Berechnung des Wärmehaufandes werden also bei mesophiler Faulung $324,0 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}$ mit insgesamt

$$1,62 \cdot 10^6 \text{ kcal/Tag}$$

erzeugt;

bei thermophiler Faulung $628,0 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}$ mit insgesamt

$$3,14 \cdot 10^6 \text{ kcal/Tag.}$$

Im Bild 3 sind die einzelnen notwendigen Wärmehaufandes für die mesophile und thermophile Faulung im Verhältnis zu der erzeugten Gasmenge dargestellt.

Es soll in diesem Zusammenhang nicht versäumt werden, darauf hinzuweisen, daß durch eine hochwertigere Isolierung gegen die Wärmehaufandes der Faulräume die thermophile Faulung nicht entscheidend wirtschaftlicher durchgeführt werden kann, wie es oftmals angenommen wird [6].

Der Großteil der notwendigen Wärmehaufandes wird nicht zur Deckung der Wärmehaufandes benötigt, sondern zum Aufheizen des pumpfähigen Faulgutes. Ein Ziel unserer Biogasentwicklung muß sein, den hierfür notwendigen Energie- und Wärmehaufandes auch für die mesophile Faulung durch die Anwendung modernster wärmetechnischer Methoden zu verringern.

Literatur

- [1] Imhoff: „Biologische Gasgewinnung aus Abfallstoffen.“ Rundschau Deutscher Techniker (1944), Nr. 5/6, S. 4.
- [2] Imhoff: „Digester Gas for Automobiles.“ Sewage Works Journal, New York (1946) Januar, S. 17.
- [3] Patentschrift Nr. 893928 des Deutschen Patentamtes der Bundesrepublik Deutschland, Verfahren zur Verarbeitung landwirtschaftlicher Abfallprodukte zu Faulgas und Dünger in Faulräumen. Patentierte 3. Oktober 1950.
- [4] Liebmann: „Zur Biologie der Methanbakterien.“ Gesundheitsingenieur (1950), 71. Jahrgang, S. 12 bis 22 und 56 bis 59.
- [5] Sierp: „Specific Heat, Conduction and Generation of Heat during the Digestion of Sewage Sludge.“ Sewage Works Journal (1930), H. 2, S. 191 bis 198.
- [6] Poch: „Biogas.“ Deutscher Bauverlag (1953), S. 23.