

# Die theoretischen 100 Prozent geernteter Energie

Eine Untersuchung der Fachhochschule Flensburg und eine ökonomische Betrachtung der Biogas-Akademie zur energetischen Ausbeute von Gärsubstraten.

Von Prof. Dr. Jens Born und Rainer Casaretto



FOTO: MARTIN BENSIMANN

**In einem neuen Ansatz wird über den Heizwert der Biomasse ihr maximal innewohnender Methanertrag ermittelt. Je näher eine Biogasanlage an diese maximale Methanausbeute heran kommt, um so effizienter funktioniert sie.**

**B**ei allen ökonomischen Berechnungen für Biogas-Anlagen stellen die Rohstoffkosten den ertragsbestimmenden Faktor dar. Die Branche verfügt über etliche Untersuchungen über die energetischen Ausbeutepotenziale der eingesetzten Rohstoffe. Alle Untersuchungsergebnisse wurden dabei entweder durch Gärtestverfahren, die in der VDI Richtlinie 4630 beschrieben wurden, oder durch theoretische Abschätzungen eines möglichen Vergärungs- oder Verdaulichkeitspotenzials gewonnen.

Allen diesen Verfahren ist gemeinsam, dass sie sowohl das energetische Potenzial des Rohstoffs als auch das individuelle biologische Vermögen der biologischen Vergärung/Verdauung beinhalten, ohne dass das

eine vom anderen zu trennen wäre. Während das energetische Potenzial des Rohstoffs ausschließlich die Qualität des Rohstoffes beurteilt, hängt das biologische Vermögen von der jeweiligen Prozessbiologie, der Anlagentechnik und dem Prozessmanagement sowie deren Vermögen mit dem jeweiligen Rohstoff umzugehen ab.

## Was an Energie maximal verfügbar ist

Die „theoretischen 100 Prozent“ sollen jedoch ausdrücklich eine Aussage ermöglichen, die nicht eine bestimmte Anlagentechnik oder eine bestimmte Verweilzeit voraussetzt, sondern die Obergrenze der maximal im Rohstoff zur Verfügung stehenden Energie angibt. Die schlichte Frage lau-

tet also: Wie viel Energie ist im jeweiligen Rohstoff vorhanden?

Das heißt, wie viel Energie kann maximal in den Energieträger Biomethan überführt werden beziehungsweise wie viel Biomethan kann maximal erwartet werden? Erst nach Beantwortung dieser Frage ist es möglich, sinnvolle Abrechnungsverfahren für Rohstoffe festzulegen, Ausbeutegrade in Abhängigkeit zur eingesetzten Technik zu bestimmen und Grenzkosten für Investitionen zu berechnen.

Für die Pflanze Mais haben Betreiber, die mit ihrer Anlage möglichen Werte präsent. Sie wissen, welche Abweichungen zu den veröffentlichten Werten von FNR, KTBL oder auch der neuesten Untersuchung zur FoTs (fermentierbaren organischen Trockensubstanz) nach Weißbach bestehen. Da aber auch das, was fermentierbar ist, in einem technischen Kontext, wie zum Beispiel einer Vorbehandlung, der Effizienz der Fermenter oder dem Sillierverfahren des Rohstoffes steht, sind Berechnungen über die Sinnhaftigkeit einer Investition oder einer vernünftigen Abrechnungsbasis nur schwer möglich.

Warum sollte jemand 100.000 Euro investieren, wenn die maximale mögliche Erhöhung der Gasausbeute nur bei ein Prozent läge? Dieser ganz konkreten Frage widmet sich dieser Artikel. Jeder Landwirt weiß, dass die Zuckerfabrik nicht nur nach Tonnage gelieferter Rüben zahlt, sondern auch nach deren Zuckergehalt. Denn nur wegen des Zuckergehalts werden die Rüben gekauft. Und dafür gibt es zuverlässige analytische Verfahren, die den Zuckergehalt repräsentativ ermitteln.

In der Abwassertechnik beispielsweise sind die beiden Parameter CSB (chemischer Sauerstoffbedarf) und BSB (biologischer Sauerstoffbedarf) bekannt. Während letzterer die Menge an Sauerstoff angibt, die zum biotischen Abbau im Wasser vorhandener organischer Stoffe unter bestimmten Bedingungen und innerhalb einer bestimmten Zeit benötigt wird, werden beim CSB alle oxi-

dierbaren, das heißt, auch die nicht biotisch abbaubaren respektive abgebauten Stoffe oxidiert.

Der CSB-Wert spiegelt also ein absolutes Maß für den Sauerstoffbedarf des Abwassers wider und wird unter anderem zur Preisermittlung unterschiedlich belasteter Abwässer verwendet. Der BSB entspricht also allen bisherigen Verfahren zur Biogasertragsprognose, während der CSB unseren theoretischen 100 Prozent entspricht. Leider funktioniert die Ermittlung des CSB nur bei flüssigen Rohstoffen wie eben Abwässern.

### Bestimmung des Heizwertes

In der Kraftwerkstechnik werden Rohstoffe als Brennstoffe verwendet, die dann im Kraftwerksprozess direkt in Wärme und in Strom umgesetzt werden. Hier dient die Bestimmung des Heizwertes nach DIN 51900 Teil 3 als Abrechnungsbasis. Dazu wird eine bestimmte Masse des getrockneten Brennstoffs in einem sogenannten Bombenkalorimeter isochor vollständig verbrannt und das den Druckreaktor (Bombe) umgebende Wasser adiabatisch erwärmt. Aus der dabei entstehenden Temperaturerhöhung des Wassers und der bekannten Wassermenge lässt sich der massenbezogene Energiegehalt der Probe ermitteln und dient der Abrechnung und der Dosierung der Brennstoffe im Kraftwerksprozess.

Die von uns vorgeschlagene Methode zur Bestimmung der theoretischen 100 Prozent folgt diesem Vorgehen. Zunächst wird die repräsentative Probe einer Trockenrückstandsbestimmung nach DIN 38414 S2 unterzogen. Der Trockenrückstand wird in die Bombe des Bombenkalorimeters eingewogen und der Heizwert  $H_u$  der Probe nach DIN 51900 Teil 3 wie beschrieben bestimmt. Die Ergebnisse für einige ausgewählte Rohstoffe finden sich in der Tabelle 1.

Interessant in Biogasanlagen ist aber nicht nur der den Rohstoffen inhärente Heizwert, sondern der Biogasertrag oder spezieller der Methanertrag. Der Prozess der Umwandlung des Rohstoffs in Methan ( $CH_4$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und gegebenenfalls anderen Gasen wie Ammoniak ( $NH_3$ ) oder Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) wird durch die sogenannte Buswell-Formel beschrieben:

$$C_xH_yO_zN_nS_s + \left( a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2} \right) H_2O \rightarrow \left( \frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4} \right) \cdot CO_2 + \left( \frac{a}{2} - \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} + \frac{e}{4} \right) \cdot CH_4 + c \cdot NH_3 + d \cdot H_2S$$

Mit Hilfe dieser Formel wäre also theoretisch denkbar die Gasausbeute rechnerisch zu ermitteln, wenn die Zusammensetzung der Biomasse bekannt ist. Die analytische

**Tabelle 1: Heizwerte für ausgewählte Rohstoffe**

Art	Heizwert [J/g]
Zuckerrübe	14.231
Mais 2010 siliert	18.461
Mais 2011 unsiliert	18.149
Roggen-GPS	17.501

**Tabelle 2: Methanerträge für ausgewählte Rohstoffe**

Sorte	Volumen [Nm <sup>3</sup> /Tonne oTS]
Mais 2011 unsiliert	505,93
Mais 2010 siliert	514,63
Zuckerrübe	396,72
Roggen-GPS	487,87

**Tabelle 3: Ökonomische Auswirkung der Standardgaserträge**

Leistung	526 kW	Betriebsstunden	8.234 h = 94 %
CH <sub>4</sub> Bedarf	1.070.420 Nm <sup>3</sup>	el. Arbeit	4.331.084 kWh
Mais	6.800 t	Standardgasertrag	720.800 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Zuckerrübe	4.662 t	Standardgasertrag	349.620 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Der Ausbeutegrad dieser Standarderträge entspricht:			
Mais mit 33 % TS	66 %	ZR mit 23 % TS	84 %
Massequote EEG:			
Mais	59 %	Zuckerrübe	41 %
Gasquote:			
Mais	67 %	Zuckerrübe	33 %
Grundvergütung	559.003 Euro		
zuzügl. Klasse I	259.865 Euro		
Wärmeerlös	39.633 Euro	1.680.148 kWh zu je 2,36 ct	
Umsatzerlöse	858.501 Euro		
Mais	238.000 Euro	Mais	35,00 Euro/t
Zuckerrüben	163.170 Euro	Zuckerrüben	35,00 Euro/t
Rohstoffkosten	401.170 Euro	= 49 % der EEG-Vergütung	
weitere Kosten*	457.331 Euro	* Betriebskosten, Zinsen, AfA, Rücklage	
Gesamtkosten	858.501 Euro		
Ergebnis	0 Euro	vor Steuern	

Bestimmung der in der Biomasse enthaltenen Kohlenhydrate, Lipide, Proteine und Lignine ist aufwendig. Etwas weniger aufwendig ist die Ermittlung der Anteile der Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel. Am einfachsten und zweckmäßigsten ist allerdings die Ermittlung des Heizwertes. Der Heizwert von Kohlendioxid ist Null, und im Folgenden wird davon ausgegangen,

dass der dem Rohstoff innewohnende experimentell ermittelte Heizwert komplett durch das während des Biogasprozesses gebildete Biomethan repräsentiert wird (Ammoniak und Schwefelwasserstoff entstehen ausschließlich aus den in den Rohstoffen enthaltenen Proteinen. Proteine treten in signifikanten Mengen lediglich in Schlachthofabfällen, Speiseresten und tierischen Exkrementen auf, nicht aber in Energiepflanzen ▶

**Tabelle 4: Ökonomische Auswirkungen bei einem Ausbeutegrad von 80 Prozent**

Leistung	526 kW	Betriebsstunden	8.234 h = 94 %
CH <sub>4</sub> Bedarf	1.070.420 Nm <sup>3</sup>	el. Arbeit	4.331.084 kWh
Mais	5.969 t	Gasgasertrag	770.420 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Zuckerrübe	4.000 t	Standardgasertrag	300.000 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Der Ausbeutegrad dieser Gaserträge entspricht:			
Mais mit 33 % TS	80 %	ZR mit 23 % TS	86 %
Massequote EEG:			
Mais	60 %	Zuckerrübe	40 %
Gasquoten:			
Mais	72 %	Zuckerrübe	28 %
Grundvergütung	559.003 Euro		
Klasse I	259.865 Euro		
Wärmeerlös	39.633 Euro	1.680.148 kWh zu je 2,36 ct	
Umsatzerlöse	858.501 Euro		
Mais	208.915 Euro	Mais	35,00 Euro/t
Zuckerrüben	140.000 Euro	Zuckerrüben	35,00 Euro/t
Rohstoffkosten	348.915 Euro	43 % der EEG-Vergütung	
weitere Kosten*	469.953 Euro	* Betriebskosten, Zinsen, AfA, Rücklage	
Gesamtkosten	802.407 Euro		
Ergebnis	56.094 Euro	vor Steuern	

zen. Für viele Energiepflanzen spielen letztere eine untergeordnete Rolle, sodass diese in der weiteren Betrachtung vernachlässigt werden können und die im Ammoniak und Schwefelwasserstoff enthaltene Energie durch einen entsprechend höheren Methananteil repräsentiert werden.) Aus der Formel

$$V_{N,sp,Max}(CH_4) = \frac{H_u * R * T_N}{\Delta_C H^\circ(CH_4) * p_N}$$

[R = 8,314 J/mol/K (Allgemeine Gaskonstante); T<sub>N</sub> = 273,15 K = 0°C (Normaltemperatur); Δ<sub>C</sub>H°(CH<sub>4</sub>) = 804 kJ/mol(CH<sub>4</sub>) (molarer Heizwert von Methan); p<sub>N</sub> = 101325 Pa = 1 bar (Normaldruck)] lässt sich das Normvolumen des absolut maximal gebildeten Biomethans je Masseneinheit Rohstoff abschätzen. Eingedenk der Annahmen repräsentiert dieser Wert die aus thermodynamischen Gründen maximale Methangasausbeute je Masseneinheit Rohstoff. Alle praktisch erreichten Werte müssen auf jeden Fall darunter liegen, denn erstens verbrauchen die Mikroorganismen für ihre Stoffwechselaktivität und ihre Vermehrung einen Teil der Energie, die in Wärme umgewandelt wird, und zweitens wird ein

Teil der energiehaltigen Rohstoffe nicht in Biomethan umgesetzt, sondern landet im Gärprodukt.

Mit anderen Worten: Die theoretischen 100 Prozent sind ein Maximalwert, der aus theoretischen Erwägungen nicht überschritten werden darf und in der Praxis nicht erreicht wird. In der Tabelle 2 sind die maximalen Methanerträge der für diese Untersuchung verwendeten Rohstoffe aufgelistet.

Dieser Wert hat mehrere Vorzüge: Er charakterisiert ausschließlich den Energieinhalt des Rohstoffs und könnte somit - vergleichbar mit dem CSB - als unabhängige Basis für die Abrechnung der Rohstoffe zwischen Biogasanlage und Rohstofflieferanten dienen. Je näher eine Biogasanlage diesem Wert kommt, desto effizienter arbeitet sie. Die Effizienz η einer Biogasanlage kann daher wie folgt definiert werden:

$$\eta = \frac{V_{N,sp,Biogasanlage}(CH_4)}{V_{N,sp,Max}(CH_4)}$$

Da dieser Wert ausschließlich auf den Energiegehalt des Rohstoffs bezogen wird, ist er zugleich ein objektives Maß für die Güte der Biogasanlagentechnik und des Prozessmanagements. Es kann ferner als Maß für die

Bewertung effizienzsteigernder Maßnahmen wie Vorbehandlung, Einsatz von Zusatzstoffen, Verlängerung der hydraulischen Verweilzeit und anderen Maßnahmen genutzt werden. Die theoretischen 100 Prozent sind also eine Messlatte, die nicht zu überspringen ist. Je näher eine Biogasanlage in einem repräsentativen Zeitabschnitt diesem Maximalwert kommt, desto effizienter arbeitet sie.

### Ökonomische Kennzahlen nach dem EEG 2012

Was wäre nun, wenn der vorhandene Energiegehalt den Rohstoffpreis bestimmen würde? Welchen Wert repräsentiert die gernete Energie?

**Beispiel Mais:** 1.000 Kilogramm organische Trockensubstanz (kg oTS) Mais repräsentieren 514,63 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>. Der Heizwert von Methan beträgt 9,968 kWh/Nm<sup>3</sup>. 1.000 kg oTS entsprechen somit 5.130 kWh. Am 4. Januar 2012 betrug der Preis für Heizöl 88,90 Cent je Liter. Da ein Liter Heizöl zehn Kilowattstunden (kWh) entspricht, entsprechen unsere 5.130 kWh somit 456 Euro. Damit ist der Preis für 1.000 kg oTS definiert.

Da pro Tonne Frischmasse (t/FM) mit 313,50 kg oTS zu rechnen ist, werden 3,18979 t/FM benötigt. Für eine Tonne Frischmasse [(313,50 kg oTS x 456 Euro) / 1.000 kg oTS] wäre der Preis dann 142,97 Euro. Nach den Standardgaserträgen des EEG (basierend auf den KTBL-Faustzahlen mit 33 Prozent Trockensubstanz (TS) pro t FM, 31,35 % oTS/t FM und 52 Prozent CH<sub>4</sub>-Gehalt) beinhaltet Mais 106 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t FM. Nach den theoretischen 100 Prozent liegt der CH<sub>4</sub>-Gehalt bei 161,33 Nm<sup>3</sup>. Bei 52 Prozent CH<sub>4</sub>-Gehalt liegt der Standard-Rohgasertrag je t FM bei 203,85 Nm<sup>3</sup> (106/52\*100). Nach den theoretischen 100 Prozent liegt er bei 310,26 Nm<sup>3</sup>. Der Standard-Ausbeutegrad liegt demnach 52 Prozent (310,26/203,85-100) unter den theoretischen 100 Prozent beziehungsweise beträgt 66 Prozent (203,85/310,26) derselben.

**Beispiel Zuckerrüben:** 1.000 kg oTS Zuckerrüben repräsentieren 396,72 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>. Der Heizwert von Methan beträgt 9,968 kWh/Nm<sup>3</sup>. 1.000 kg oTS entsprechen somit 3.954 kWh. Hier entsprechen unsere 3.954 kWh somit 351,51 Euro. Da pro t/FM mit 207,00 kg oTS zu rechnen ist, werden für 1.000 kg oTS 4,83092 t/FM benötigt. Für eine Tonne Frischmasse Zuckerrüben wäre der Preis dann 72,76 Euro pro Tonne. Mit 35,00 Euro t/FM werden 48,1 Prozent des theoretischen Energiegehaltes bezahlt.

Nach den Standardgaserträgen (23 Prozent TS/t FM, 20,70 Prozent oTS/t FM und 52 Prozent CH<sub>4</sub>-Gehalt) beinhaltet die Zuckerrübe 75 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t FM. Nach den theoretischen 100 Prozent liegt der CH<sub>4</sub>-Gehalt bei 87,57 Nm<sup>3</sup>. Bei 52 Prozent CH<sub>4</sub>-Gehalt liegt der Standard-Rohgasertrag je t/FM bei 144,23 Nm<sup>3</sup>. Nach den theoretischen 100 Prozent liegt er bei 168,41 Nm<sup>3</sup>. Der Standard-Ausbeutegrad liegt dementsprechend bei 86 Prozent.

### Grenze bei 35 Euro

Auf der Basis der EEG-Erlöse (EEG 2012) ergeben sich die folgenden ökonomischen Werte, siehe Tabelle 5: Nach unseren Erfahrungen und Berechnungen ist mit einem Gesamtaufwand von 70 Prozent vor Rohstoffkosten zu kalkulieren. Mit anderen Worten: Die Rohstoffkosten dürfen niemals mehr als 30 Prozent aller EEG-Erträge und Wärmeerlöse inklusive Gewinn vor Steuern ausmachen. Wie die Berechnung aufzeigt, ist es einem Betreiber schon heute kaum möglich die mit 35 Euro angesetzten Rohstoffpreise zu bezahlen. Gelänge es jedoch, den Ausbeutegrad zu erhöhen, hätte dies sofort eine durchschlagende Wirkung auf die Rohstoffkosten.

Mais ist nach den Standardgaserträgen mit einem Ausbeutegrad von 66 Prozent anzusetzen. Tabelle 4 simuliert die Auswirkungen einer Erhöhung auf 80 Prozent. Da Zuckerrüben nahezu vollständig vergären und mit 86 Prozent Ausbeutegrad schon nah an den theoretischen 100 Prozent liegen, haben wir diese Werte unverändert gelassen. Die Betriebskosten sinken ein wenig wegen der reduzierten Massen.

Mit den theoretischen 100 Prozent ist somit erstmals ein Benchmark der Betreiberqualifikation, Rohstoffqualität und der eingesetzten Technik möglich. Der anlagenspezifisch erzielte Ausbeutegrad steht nun in einer Relation, er hat eine Bezugsgröße gefunden. Investitionsentscheidungen können besser bewertet werden.

**Fazit:** Die auf der Bestimmung des Heizwertes des jeweiligen Rohstoffes beruhende Ermittlung der theoretischen 100 Prozent Biomethan sind eine Messlatte über die niemand hinüberkommt, aber je näher eine Biogasanlage diesen theoretischen 100 Prozent für den jeweiligen Rohstoff kommt, umso effizienter wird der im Rohstoff enthaltene Energiegehalt ausgenutzt. Der Abstand zu den theoretischen 100 Prozent ist zudem ein objektives Maß dafür, ob sich und, wenn

ja, welche weiteren Anstrengungen zur Ausbeutesteigerung finanziell überhaupt lohnen.

Wir werden in den kommenden Monaten weitere Untersuchungen über die Festlegung der theoretischen 100 Prozent vornehmen und auf weitere Rohstoffe ausdehnen. Wer uns dabei unterstützen will, ist herzlich aufgerufen, uns weitere Rohstoffe zur Verfügung zu stellen. ◀

Wir danken René Casaretto, Timo Baltzer und Daniel Baasch für die Messungen und Berechnungen und hoffen, dass sie uns auch in den kommenden Monaten dabei unterstützen werden.

#### Autoren

Prof. Dr. Jens Born  
 CATS Green Process Engineering  
 Fachhochschule Flensburg  
 Kanzleistr. 91-93 · 24943 Flensburg  
 E-Mail: jens.born@fh-flensburg.de  
 Rainer Casaretto  
 Geschäftsführer  
 BIOGAS - AKADEMIE®  
 Sperlingsgang 8 · 24220 Flintbek  
 E-Mail: info@biogas-akademie.de

**KERN KRAFT**  
**screw-press GmbH**

**SZARVASI 1 | HIRSCHGRAS**  
 die Ergänzung zum Maisanbau



– jetzt –  
**Saatgut  
 für 2012 sichern**

– Hirschgras –  
**mehr Trockenmasse  
 für Biogasanlagen ernten!**

Szarvasi 1“ die leistungsfähigste Biogaspflanze im Energiepflanzenversuch der Landwirtschaftlichen Lehranstalten Triesdorf

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aussaat (keine Pflanzung)</li> <li>- Mehrjährig</li> <li>- Hoch wachsend (bis 2,5 m möglich)</li> <li>- Tiefreichendes Wurzelwerk (bis 1,8 m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schopfbildend</li> <li>- Trockentolerant</li> <li>- Sehr frosthart</li> <li>- Zweischnittig</li> </ul>
---	---

[www.szarvasi1.com](http://www.szarvasi1.com)  
[www.biogasgras.de](http://www.biogasgras.de)  
[www.maisersatz.de](http://www.maisersatz.de)




[www.hirschgras.de](http://www.hirschgras.de)  
[www.pelletgras.at](http://www.pelletgras.at)  
[www.pelletgras.de](http://www.pelletgras.de)

screw-press GmbH - Alfrased 1 - 84367 Reut/Ndb.  
 Tel.: +49 8574 535 – Fax +49 8574 534

Tel: +49 89 962435-30  
[www.bsv-saaten.de](http://www.bsv-saaten.de)



Tel: +49 8574 535  
[www.oelpresse.de](http://www.oelpresse.de)



cirmac.com

nitrogen

biogas

## ➔ Biogas Aufbereitung und Einspeisung

- LP Coaab® Aminwäsche
- VPSA Systeme
- Membran Systeme

Spezifische Kenntnisse vom deutschen Markt  
 25 Jahre Erfahrung in Biogas Aufbereitung  
 Rund um die Uhr Service Bereitschaft  
 Kundenspezifische Lösungen und schlüsselfertige Lieferungen

- Hohe Leistungsversprechen in Ausbeute und Emissionen
- Wiederverwendung von CO<sub>2</sub>
- Einspeisung in das Erdgasnetz
- Fahrzeug Brennstoff (CNG/LNG)

[ tel ] +31 [0]55 534 0110 [ mail ] info@cirmac.com [ web ] www.cirmac.com