

# Technik zur Auskopplung von Wärme bei Schwachgasen

Dr. R. Berger, Dr. D. Uhlig: e-flox GmbH, Renningen (roland.berger@e-flox.de)  
Erschienen in Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft Bd. 22, Verlag Abfall aktuell, 2015, ISBN  
978-3-9815546-2-5

## 1 Zusammenfassung

Eine direkte Nutzung von Schwachgasen aus der Deponie zur Stromerzeugung ist bis zu minimalen Methangehalten von rund 25 Vol% mit Micro-Gas-Turbinen, Stirlingmotoren oder speziell angepassten Gas-Motoren möglich. Generell ist zu beachten, dass bei sinkenden Methangehalten die Netto-Wirkungsgrade immer mehr sinken (Gasturbine und Stirlingmotor) bzw. die Abgasemissionen in immer schlechterem Verhältnis zum Nutzen stehen (Gasmotor). Aus diesem Grund werden spätestens bei Schwachgasen mit weniger als 25 Vol% CH<sub>4</sub> spezielle Schwachgas-Behandlungstechnologien erforderlich, bei denen ein vollständiger Ausbrand der Gase im Vordergrund steht. Allerdings muss dies nicht bedeuten, dass eine Nutzung der Energie im Deponiegas dann nicht mehr möglich wäre. Der folgende Beitrag soll eine erste Übersicht bieten, was dabei zu beachten ist und wie die Abwärme der Verbrennungseinrichtung genutzt werden kann.

## 2 Übersicht über zur Verfügung stehende Schwachgasbehandlungsverfahren

Eine detaillierte Übersicht über Deponiegasbewertungs- und Behandlungsverfahren findet sich in der als Gründruck vorliegenden VDI 3899/1<sup>1</sup>. Für die Auskopplung von Wärme kommen natürlich nur die thermischen Behandlungsverfahren in Frage. Die in der Praxis gebräuchlichsten Verfahren sind:

*Schwachgasbrenner – Gewebebrenner mit Vormischung:* Der am weitesten verbreitete Vertreter ist hier das CHC-Schwachgas-Behandlungssystem der Firma Lambda. Die Umsetzung erfolgt an einem Metallgewebe, das eine Flamme auch bei geringen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen stabilisiert. Damit sind je nach Gaszusammensetzung (N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Verhältnis) Gase bis 13% CH<sub>4</sub> zu verwerten. Das System arbeitet bei atmosphärischem Druck mit oben offener Brennkammer wie bei herkömmlichen Fackel-Systemen.

*Regenerative thermische Oxidation:* Hier wird das Deponiegas mit Luft verdünnt durch eine Keramikschüttung vorgewärmt. Im Keramikbett oder dem darüber gelegenen Reaktionsraum wird das Gas dann oxidiert. Danach strömt es durch ein zweites Keramikbett ab, das durch das heiße Gas vorgewärmt wird. Durch Umschalten der Strömungsrichtung wird eine sehr effiziente Wärmerückgewinnung ermöglicht. Das Gas muss durch Verdünnung mit Luft auf Methankonzentrationen von 0,5-1 Vol% eingestellt werden. Die genauen Bedingungen sind von der Ausführung der Anlage abhängig. Der Betrieb erfolgt wegen der großen Querschnitte in aller Regel bei atmosphärischem Druck. Der gebräuchlichste Vertreter im Deponiegasbereich ist die Vocsi-Box der Firma BMF-Haase.

---

<sup>1</sup> VDI 3899 Blatt 1 (Entwurf; Deponiegas – Deponiegasverwertung und –behandlung; Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2015

*FLOX®-Rekuperator-Brenner:* Bei diesem Verfahren werden Deponiegas und Luft über sogenannte Rekuperatorbrenner einer isolierten Brennkammer zugeleitet. Der Rekuperator ist ein Gegenstrom-Wärmeübertrager der mit abströmendem Abgas das einströmende Gas vorwärmt. Die Verbrennung findet flammenlos statt (FLOX® = Flammlose Oxidation). Dies wird durch eine spezielle Strömungsführung erreicht und sorgt für einen stabilen Betrieb, wobei die Flammenüberwachung über die Brennraumtemperatur erfolgt. Der Reaktor kann auch im Überdruck betrieben werden. Das Verfahren wird von der Firma e-flox angeboten, im Deponiegasbereich in Zusammenarbeit mit der Firma Lambda.

Ein weiteres Verfahren ist die Oxidation der Schwachgase in einer Wirbelschicht, dieses Verfahren ist jedoch bisher kaum verbreitet, da Wirbelschichten typischerweise wegen der hohen Investitions-Kosten eher bei Großanlagen eingesetzt werden.

### **3 Faktoren die die Einsatzmöglichkeiten und Effizienz der Wärmeauskopplung beeinflussen**

Um die Abwärme zu nutzen, muss das Abgas seine Wärme an ein zu erwärmendes Heiz-Medium abgeben. Dazu durchströmt es in aller Regel einen Wärmeüberträger der das Abgas kühlt und das Medium erwärmt. Wesentliche Leistungsparameter dieses Wärmeüberträgers sind sein Druckverlust und die nutzbare Temperaturdifferenz. Darüber hinaus ist es in der Praxis wichtig, die Wärmeauskopplung so steuern zu können, dass genau so viel Wärme ausgekoppelt wird, wie gerade benötigt wird.

#### **3.1 Druckverlust Wärmetauscher**

Um den Druckverlust zu überwinden, muss das Abgas entweder im Überdruck zuströmen oder über einen Ventilator, der vor oder nach dem Wärmetauscher angeordnet werden kann, durch den Wärmetauscher gefordert werden. Ein solcher Ventilator bedeutet einen Mehraufwand, speziell wenn er für höhere Temperaturen eingesetzt werden soll. Typische Druckverluste von Abgas-Wärmeüberträgern liegen im Bereich 5-15 mbar. Dabei ist zu beachten, dass sich auf der Oberfläche ablagernde Verschmutzungen den Druckverlust mit der Zeit ansteigen lassen. Eine regelmäßige Reinigung des Wärmeüberträgers ist notwendig.

#### **3.2 Wirkungsgrad - Nutzbare Temperaturdifferenz**

Der Wirkungsgrad der Abwärmennutzung beschreibt das Verhältnis aus der übertragenen Wärmemenge zu der zugeführten Heizleistung, typischerweise bezogen auf den unteren Heizwert. Die wesentlichen Verluste, die den Wirkungsgrad vermindern sind:

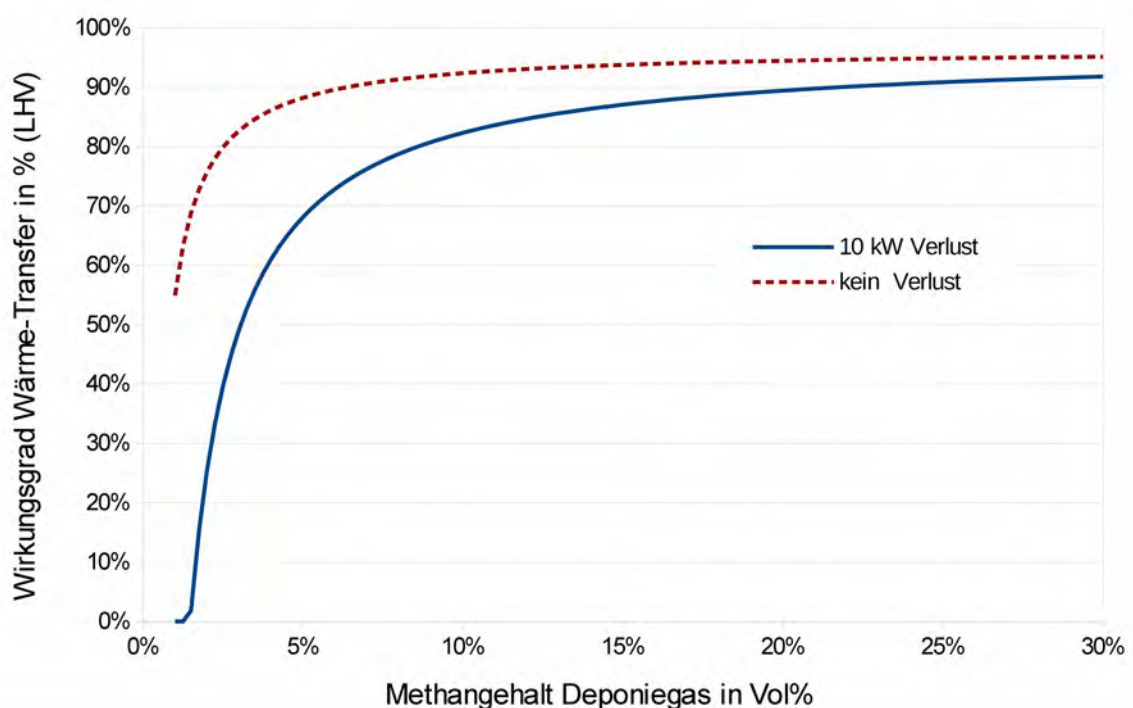
- Die Feuerungs- und Strahlungsverluste die in erster Linie von den geometrischen Verhältnissen abhängen und damit unabhängig vom Durchsatz sind
- Die Abgasverluste, die von den Abgastemperaturen abhängen und in erster Näherung proportional zum Durchsatz sind.

Da die Feuerungs- und Strahlungsverluste meist schwer zu erfassen sind, wird hilfsweise der Wirkungsgrad mit Hilfe der nutzbaren Temperaturdifferenz beschrieben. Genau genommen definiert die nutzbare Temperaturdifferenz zwischen zuströmendem Abgas ( $T_{ZA}$  in °C) und abströmendem Abgas ( $T_{AA}$  in °C) den erreichbaren Wirkungsgrad  $\eta_{WT}$  des Wärme-Transfers zum Heizmedium:

$$\eta_{WT} \cong \frac{T_{ZA} - T_{AA}}{T_{AG}}$$

Dabei ist die Temperatur  $T_{AG}$  die Abgastemperatur des Feuerungsverfahrens. Sie hängt vom Methangehalt des Deponiegases, aber auch von der zum Einsatz kommenden Technik ab. Im Idealfall ist sie gleich der adiabaten Verbrennungstemperatur und gleich der Temperatur  $T_{ZA}$ . Diese Maximale Temperatur wird in der Praxis jedoch nicht erreicht. Wärmeverlust an der Feuerung und den Abgasleitungen mindern die Temperatur. Darüber hinaus kann es sein, dass diese maximale Temperatur weiter abgesenkt werden muss, um preiswerteres Material für die Wärmeüberleitung einzusetzen oder weil der Wärmetauscher nur bei tieferen Eintrittstemperaturen betrieben werden kann. Dies ist ein wichtiger Einflussfaktor bei der Ermittlung eines Gesamt-Wirkungsgrads eines Systems, da diese Wirkungsgrad-Reduzierung beim Typenblatt-Wirkungsgrad des Wärmeüberträgers nicht berücksichtigt ist.

Die Temperatur des Abströmenden Abgases wird durch den Prozess mit dem der Wärmeüberträger verbunden ist definiert. So kann ein Niedertemperatur-Heizkreislauf zu Abgastemperaturen von unter 80°C führen, während ein Dampfprozess meist Temperaturen von 150-200°C mit sich bringt.



**Bild 1:** Erreichbare Kessel-Wirkungsgrade bei der Schwachgasverbrennung idealisiert und mit realistischen Verlusten bei 100°C Abgastemperatur nach dem Wärmetauscher

Bild 1 zeigt exemplarisch für den Fall eines Niedertemperaturkessels mit einer Abgastemperatur von 100°C die maximal erreichbaren Wirkungsgrade. Dabei wird von 100 m<sup>3</sup>/h Deponie-Schwachgas mit variablem Methangehalt, 20% N<sub>2</sub> und Rest CO<sub>2</sub> ausgegangen. Die Verbrennung wird mit einem Abgassauerstoffgehalt von 3% O<sub>2</sub> gerechnet. Beim Wärmeverlust wird einmal idealisiert von 0 kW und einmal von 10 kW (ein immer noch guter Wert) ausgegangen. Die Grafik zeigt den erreichbaren Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Methangehalt im Deponiegas.

Man kann der Darstellung entnehmen, dass selbst bei einer solchen einfachen effizienten Wärmeübertragung der Wirkungsgrad bei niedrigen Methangehalten deutlich sinkt und eine Minimierung von Wärmeverlusten immer wichtiger wird. Unterhalb von 3% CH<sub>4</sub> im Deponiegas wird es schwierig noch relevante Wärmemengen wirtschaftlich auszukoppeln.

### 3.3 Regelbarkeit der Wärmeauskopplung

Hier gilt es zwei Forderungen möglichst gut zu erfüllen:

- Bei schwankendem Wärmebedarf darf nur so viel Wärme an den Wärme übertragen werden, wie gerade benötigt wird, sonst überhitzt das Heiz-Medium.
- Bei hohem Wärmebedarf, z.B. bei Heizungsanlagen im Winter, soll die Wärme trotzdem mit möglichst hoher Effizienz (vgl. Bild 1) übertragen werden.

Die einfachste Möglichkeit der Regelung der Wärmeübertragung ist es, nur einen Abgasteilstrom abzuziehen, z.B. über einen separaten Abgasventilator hinter dem Abhitzekegel. Damit kann optimal geregelt werden. Im Allgemeinen ist aber eine zusätzliche Absperrklappe erforderlich, um sicherzustellen, dass der Wärmetauscher nicht überhitzt wenn gerade keine Wärme benötigt wird. Effizienter ist es, den Abgasvolumenstrom komplett zwischen Wärmetauscher und direkter Ableitung in die Atmosphäre umschalten zu können. So wird zum einen sichergestellt, dass das komplette Abgasvolumen zur Verfügung steht. Zum anderen wird verhindert, dass mit dem Abgas auch kalte Umgebungsluft mit angesaugt wird, die den Wirkungsgrad beeinträchtigt. Allerdings ist zu beachten, dass solche Hochtemperatur-Absperrorgane teuer sind. Der Preis steigt mit der gewünschten maximalen Betriebstemperatur und der gewünschten Dichtigkeit des Absperrorgans überproportional an.

## 4 Beurteilung von Schwachgasbehandlungsverfahren hinsichtlich Ihres Potentials zur Wärmerückgewinnung

Die folgende Zusammenfassung gibt einen Überblick über die Möglichkeiten der Abwärme-Auskopplung für die drei genannten thermischen Schwachgasbehandlungsmaßnahmen. Dabei ist zu beachten, dass für jedes der Verfahren durch spezielle Maßnahmen und Anpassungen die tatsächlich erreichten Werte besser oder schlechter sein können. Letztendlich ist es immer auch eine

Frage des Preises, was im Rahmen der thermodynamischen Möglichkeiten realisiert wird.

*Schwachgasbrenner – Gewebebrenner mit Vormischung:* Diese Systeme arbeiten wie herkömmliche Fackeln mit oben offenen atmosphärischen Brennkammern, Eine Wärmeauskopplung erfolgt durch seitliches absaugen des Abgases oberhalb der Reaktionszone. Eine Absperrung des normalen Abgasweges (oben offene Brennkammer) ist nicht möglich, deshalb kann immer nur ein Teilstrom abgezogen werden und es ist auch stets mit der Einmischung von Umgebungsluft zu rechnen. Der Wirkungsgrad liegt deshalb nach Herstellerangaben stets deutlich unter 50%. Dies reicht aber trotzdem oft, um kleinere Heizaufgaben wie die Beheizung von Büros und Werkstätten zu bewerkstelligen. Wegen des atmosphärischen Betriebs ist immer ein Abgasventilator notwendig.

*Regenerative thermische Oxidation:* Da die Abgastemperaturen solcher System in der Regel deutlich unter 200°C liegen ist eine Nutzung der Abwärme aus dem Hauptabgasstrom nicht sinnvoll. Dies liegt auch daran, dass bereits vor der Verbrennung stark verdünnt wird. D.h. die Abgasverluste liegen immer sehr hoch. Die einzige Möglichkeit Wärme in der Praxis auszukoppeln ist ein Heißgasbypass. Dabei wird Abgas direkt aus der Brennkammer abgezogen. Es kann aber nur ein Teilstrom abgezweigt werden, da das System sonst instabil wird. Auch ist das nicht bei allen RTO Systemen technisch möglich, da die Oxidation teilweise im selben Bett wie die Vorwärmung stattfindet. Wegen des hohen zusätzlichen Aufwands sind uns keine Deponiegassysteme mit Wärmeauskopplung bekannt.

*FLOX-Rekuperator Brenner:* Diese Systeme verfügen standardmäßig über einen Heißgasbypass, da dieser für die Anpassung an unterschiedliche Methanwerte notwendig ist. Die Abgase aus den Vorwärmern und dem Heißgasbypass werden zusammengeführt und stehen dann, je nach Methangehalt im Schwachgas, mit Temperaturen von 600-950 °C zur Verfügung. Eine Wärmeauskopplung erfolgt durch ein T-Stück an diesem Abgasausgang. Je nach gewünschter Effizienz des Systems wird lediglich über einen Abgasventilator abgesaugt oder über Heißgasklappen zwischen Heißgaskamin und Wärmeüberträger hin und her geschaltet. Dadurch sind Wirkungsgrade, abhängig vom Methangehalt im Schwachgas, von 65 bis 80% möglich.

## **5 Möglichkeiten zur Nutzung der ausgekoppelten Wärme**

Da bei Schwachgasverbrennungssystemen die auch unter 15% CH<sub>4</sub> im Deponiegas stabil arbeiten sollen stets eine Vorwärmung von Luft und/oder Deponiegas notwendig ist, für die die Abwärme prioritär zu nutzen ist, steht das Abgas typischerweise nur noch mit Temperaturen unterhalb von 800°C zur Verfügung. Deshalb konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf Niedertemperatursysteme zur Abwärmennutzung. Stirling-Motoren oder extern gefeuerte Gasturbinen werden hier nicht betrachtet.

## 5.1 Abwärmenutzung zu Heizzwecken

Der einfachste und häufigste Fall der Wärmenutzung ist die Erzeugung von Warmwasser in einem Abhitzeessel. Das heiße Abgas wird mit möglichst geringen Verlusten, also über kurze Strecken und gut isoliert, zu einem Warmwasserkessel geleitet. Dort wird warmes Wasser für Heizzwecke erzeugt. Ein Kessel mit niedrigen Abgastemperaturen wirkt sich positiv auf die erreichbare Wärmeauskopplung aus, kann aber bei hohen Schwefel- und Wasserkonzentrationen zu Säure-Taupunkts-Unterschreitungen und damit zu Kesselkorrosion führen. Ein dem Abhitzeessel nachgeschalteter Luftvorwärmer kann die Abgasverluste zusätzlich reduzieren und die Wärme zurück in den Prozess schaffen. Das lohnt sich um so mehr, je höher die Abgastemperaturen bzw. damit meist verbunden die Heizmedientemperaturen sind. Eine maximale Erhöhung des Wirkungsgrads um 5-10% ist je nach Ausgangsbedingungen möglich.



**Bild 2:** Deponiegasverbrennung Dörpen, bei der Warmwasser zur Beheizung der am Standort errichteten Boxenfermentation von Grüngutabfällen verwendet wird

## 5.2 Abwärmenutzung zu Heizzwecken mit Wärmetransport

Ist keine Wärmenutzung in der Nähe der Deponie verfügbar, so ist auch ein Wärmetransport über sogenannte Wärmecontainer möglich. Beispielsweise mit dem System der Firma LaTherm® bei dem geschmolzenes Natriumacetat die Wärme eines Warmwasserkessels bei sehr moderaten Temperaturen speichert. Denkbar sind aber auch simple Hochtemperatur-regenerativ Latentwärmespeicher mit Steinen durch die das Abgas direkt geleitet wird und die am Ort der Wärmenutzung (z.B. Schwimmbad) über einen einfachen Wärmetauscher entladen werden. Beide Typen von Wärmecontainern verfügen über eine Kapazität von rund 2,5 MWh. So kann die Wärme auf der Straße zur Verwertungsstelle transportiert werden. Solche Systeme lohnen aber nur bei kurzen Strecken und hohen Wärme-Vergütungen.

### 5.3 Abwärmenutzung zu Trocknungszwecken

Eine einfache Variante der Abwärmenutzung ist der Einsatz für Trocknungszwecke. Dabei wird entweder, entsprechende Deponiegasqualität vorausgesetzt, das Abgas direkt bzw. mit entsprechender Verdünnungskühlung mit Umgebungsluft eingesetzt oder mit dem Deponiegas Umgebungsluft vorgewärmt. Das heiße Gas wird dann über das zu trocknende Gut gefördert. Da die Verdampfung bei Temperaturen unter 100°C erfolgt, können die Abgastemperaturen recht niedrig sein. Bei der Auslegung sind folgende Punkte zu beachten:

- Die Eintrittstemperatur darf nur so hoch sein, dass das zu trocknende Gut nicht beschädigt wird. Bei Hackschnitzeltrockner sollte die Temperatur nicht über 150°C liegen.
- Die Austrittstemperatur ist so hoch zu wählen, dass es nicht wieder zu Kondensation kommt. Insbesondere im Winter, kann es deshalb notwendig werden den Trockner anders einzustellen als im Sommer. D.h. im Winter müssen dann höhere Abgasverluste in Kauf genommen werden.



**Bild 3:** Deponiegasverbrennung mit Hackschnitzeltrocknung

Bild 3 zeigt beispielhaft eine von der Firma e-flox realisierte Hackschnitzeltrocknung auf der Deponie Ringenbach (Kreis Sigmaringen) bei der die Wärme von einer Schachgasverbrennung zur Verfügung gestellt wird. Das Abgas der Feuerung wird mit Luft verdünnt über die Hackschnitzel geleitet. Die Hackschnitzel stammen von der Grüngutannahme die auf dem Deponiegelände abgewickelt wird.

#### 5.4 Abwärmenutzung zur Stromerzeugung

Auch wenn eine direkte Stromerzeugung über Verbrennungsmotoren, Gasmotoren oder Stirlingmotoren nicht mehr möglich ist, gibt es technische Möglichkeiten weiter Strom zu erzeugen. Hier sind zunächst klassische Dampfprozesse zu nennen. Allerdings fordern herkömmliche Dampfprozesse mit Dampfturbine oder Dampfmotor zur Stromwandlung große Leistungen, die im Deponiegasbereich kaum zur Verfügung stehen. Abhilfe versprechen hier neue Dampfmotorprozesse bei denen der gesamte Dampfprozess, bestehend aus Verdampfer, Motor und Kondensator, in einem geschlossenen Kreislauf realisiert ist. Diese Systeme werden z.B. von der Firma Voith unter dem Systemnamen Steam-Trac entwickelt.

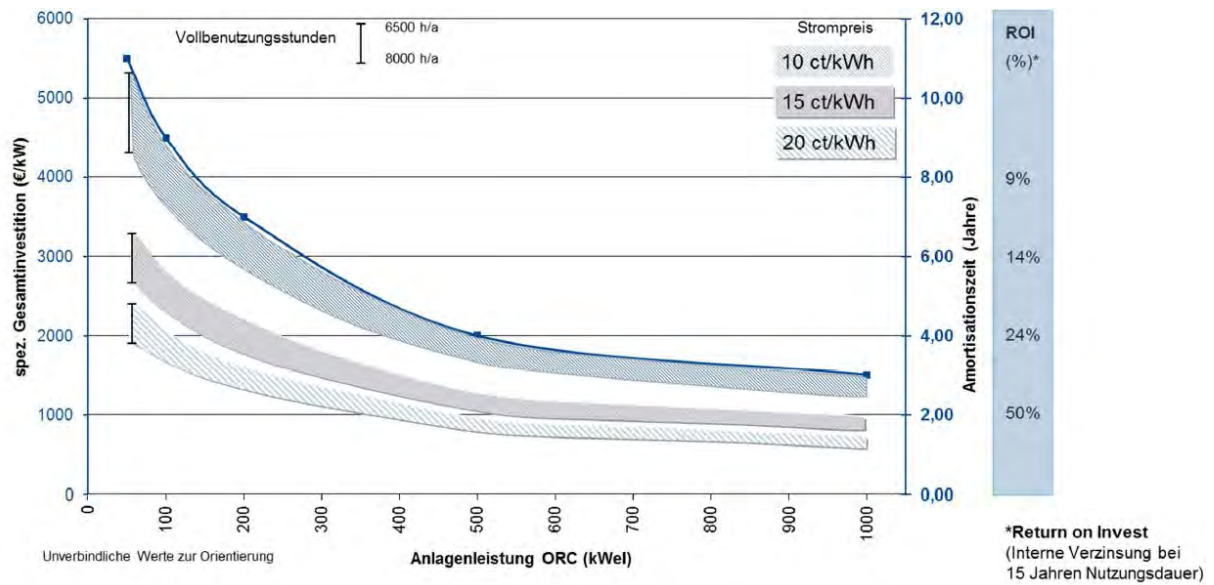
Einen Schritt weiter ist hier der Organic-Rancine-Cycle (ORC). Dieser ist inzwischen auch für kleinere Leistungen verfügbar und in mehreren Projekten technisch realisiert. Dabei wird im Wärmetauscher ein organisches Lösemittel verdampft, das dann über einen geschlossenen Kreislauf mit Turbine und Kondensator entspannt wird. Das System ist als installationsfertige SKID-Anlage verfügbar, wodurch die Kosten in den letzten Jahren gesunken sind. Nicht zuletzt auch weil namhafte Hersteller wie die Firmen Bosch und Dürr solche Systeme inzwischen anbieten. Hauptmarkt ist die Nutzung von BHKW-Abgasen zur Erhöhung der Stromproduktion, aber auch bei größeren Deponiegasanlagen ist der direkte Einsatz hinter Schwachgasverbrennungsanlagen möglich, wenn auch bisher nicht realisiert.



**Bild 4:** ORC-Anlagen der Firma Dürr; 70 kW links, 100 kW rechts

Bild 3 zeigt zwei realisierte Systeme der Firma Dürr, Bild 4 ein ebenfalls von der Firma Dürr erstelltes Diagramm, das die Wirtschaftlichkeit solcher Systeme bei unterschiedlichen Leistungen und Betriebszeiten hinterleuchtet. Dabei ist zu bedenken, dass der interne ORC-Wirkungsgrad (eingekoppelte Wärme zu Strom) bei rund 20% liegt. D.h. es muss jeweils die fünffache Wärmemenge eingekoppelt werden. Grob gerechnet muss also für ein 70 kW System eine Deponiegasleistung von rund 500 kW zur Verfügung stehen. Da die Wirtschaftlichkeit sich mit größeren Systemen dramatisch verbessert, kann also davon ausgegangen werden, dass sich solche Systeme nur rechnen wenn über einen langen Zeitraum (> 5 Jahre) Leistungen möglichst über 500 kW zur Verfügung stehen. Ist dies der Fall, kann eine Stromerzeugung vor Ort mit niedrigen Emissionen verbunden werden.





**Bild 5:** Amortisation von ORC Anlagen unterschiedlicher Leistung bei unterschiedlichen Einspeise-Vergütungen (Quelle:Dürr CYPLAN ORC-Technologie)

Kontakt:  
 Dr. R. Berger, Dr. D. Uhlig  
 e-flox GmbH  
 Renningen  
 Mail: roland.berger@e-flox.de