

DepoTech 2014



**Einsatz von Stirlingmotoren zur
Deponiegasverstromung – eine ökologische und
wirtschaftliche Variante zur Verwertung von
Deponie-Restgasmengen?**

Dr. A. Seyfert, SEF-Energietechnik GmbH, Zwickau

Gliederung



- 1. Die Stirlingmotorentechnik - Vorteile und Einsatzgrenzen**
- 2. Stirlingmotorentechnik - Marktchancen und neue Einsatzgebiete**
- 3. Aufbau und Funktionsweise eines Stirlingmotors**
- 4. Einsatz der Stirlingmotorentechnik im Bereich der Deponiegasverwertung**
- 5. Untersuchungen der Rahmenbedingungen sowie Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen an einem konkreten Fallbeispiel – Deponie Görnitz**

Die Stirlingmotorentechnik – Vorteile und Einsatzgrenzen

- Die Stirlingmotorentechnik ist bereits seit vielen Jahrzehnten bekannt, wurde aber in den letzten Jahren intensiv weiterentwickelt (zu Beginn des 20. Jahrhunderts ca. ¼ Millionen Motoren im Einsatz!)
- Der Stirlingmotor ist ein Kreisprozessmotor, bei dem eine äußere Verbrennung (äußere Wärmequelle Brenner, Dampf, Heißwasser, usw.) zum Einsatz kommt. Kein direkter Medienaustausch und somit keine negative Beeinflussung der Motorkomponenten durch die Art bzw. Abprodukte des eingesetzten Brennstoffs
- Sehr leise und vibrationsarm mit gleichmäßigem Drehmoment
- Sehr geringe Wartungsaufwendungen für den Betrieb (bei ca. 8000 Bh)
- Verfahrensspezifische Nachteile des Stirlingmotorprozesses - geringerer mechanischer Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren sowie höheres Masse/Leistungsverhältnis

Die Stirlingmotorentechnik – neue Einsatzgebiete

Innovationsinitiative Mikro - BHKW

Verbundnetz
Gas AG



	Baxi – ECOGEN	Viessmann – Stirling-BHKW	De Dietrich Remeha – Stirling-BHKW	Bosch Thermotechnik – Stirling-BHKW	Vaillant – Honda
					
Thermische Leistung	3,5-24 kW	6 kW	4,8 kW	3 - 31 kW	ca. 2,8 kW
Elektrische Leistung	1 kW (Brutto)	1 kW (Brutto)	1 kW	1 kW	ca. 1 kW
Zusatzbrenner	-	18 kW	24 kW	-	12-30 kW
Motorenart	Stirling	Stirling	Stirling	Stirling	Otto
Energieträger	Erdgas	Erdgas	Erdgas	Erdgas	Erdgas
Gesamtwirkungsgrad	92 %	97 %	k. A.*	k. A.*	>80 %
Schallpegel	45 dB (A)	54 dB (A)	<43 dB (A)	k. A.	ca. 47 dB (A)
Gewicht	110 kg	100 kg	110-120 kg	k. A.	ca. 60 kg
Abmaße (H x B x T)	950x450x426 mm	900x600x430 mm	900x490x420 mm	1800x600x600 mm	940x640x380 mm

Aufbau und Funktionsweise eines Stirlingmotors

1 Expansionszylinder

5 Kompressionszylinder

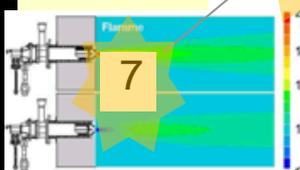
2 Erhitzer

6 Kurbelwelle

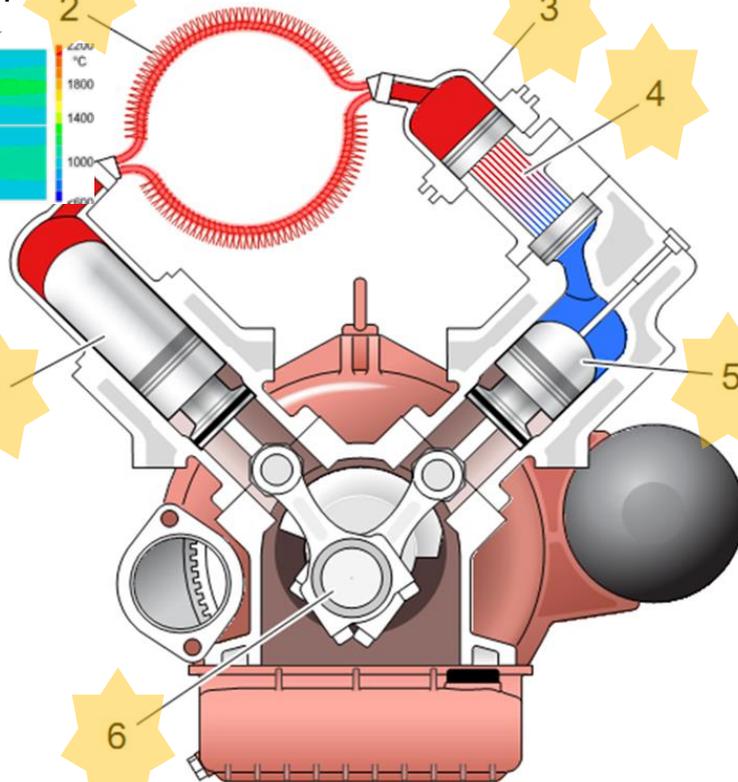
3 Regenerator

7 Heizquelle

4 Gaskühler



Gas,
Heizöl,
Dampf,
usw.



Der Stirling-Motor ist wie der Dampfturbinenprozess eine Wärmekraftmaschine mit externer Verbrennung, in der eine konstante Gasmenge (z. B. Luft, Wasserstoff, Helium) in einem geschlossenen Raum erwärmt, komprimiert und expandiert wird. Diese Volumenänderungsarbeit wird auf einen Arbeitskolben übertragen und in mechanische Arbeit umgesetzt. Das Gas wird danach abgekühlt und wieder komprimiert. So entsteht ein Kreisprozess

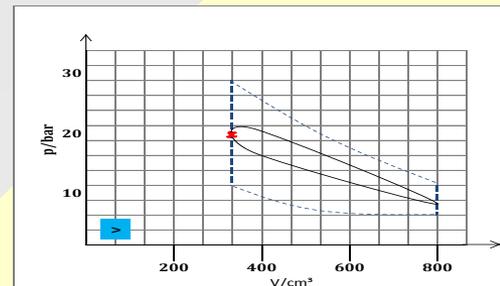


Abbildung: Schema Stirlingmotor [2]

Vorteile und Restrisiken für den Einsatz der Stirlingtechnik im Deponiegasbereich

Vorteile beim Einsatz im Deponiegasbereich

- Die verfahrensspezifischen Nachteile des Stirlingmotorprozesses (geringerer mechanischer Wirkungsgrad als der Verbrennungsmotoren) spielen bei dem vorgesehenen Einsatzzweck nur eine untergeordnete Bedeutung – Deponiegas ist schadstoffarm zu entsorgen!
- Verstromung von sehr geringen Deponie-Restgasmengen damit Bindeglied zwischen aktiver Deponiegasverwertung und passiver Deponiegasbeseitigung mit der Möglichkeit des ökologischen Fackelstromersatzes – **CO₂-Bilanzvorteil**
- Der Methangehalt im Deponiegas ist für den Brennprozess nicht entscheidend. Es kann dabei laut Hersteller Schwachgas bis zu einem minimalen Methangehalt von 20 % zum Einsatz kommen
- Schadstoffgehalte im Abgas sind sehr gering und die Emission unterschreitet die Grenzwerte einer Verbrennungsanlage. Siliziumanteile im Deponiegas führen nicht zu internen Motorschäden

Die Stirlingmotorentechnik – Restrisiken und Einsatzgrenzen

Restrisiken

- Der Schadstoffgehalt im Deponiegas, insbesondere der H_2S Gehalt, darf auf Grund des Einsatzes einer katalytischen Verbrennung nur gering sein
- Die Bindung an den Hersteller bzw. Vertriebspartner, zur Gewährleistung der notwendigen Ersatzteillieferung und eines qualifizierten Anlagenservices, ist notwendig. Die Firma LAMBDA ist deutscher Vertriebspartner
- Obwohl die Standfestigkeit der neuen Stirlingmotorenanlagen im Allgemeinen sehr hoch ist, gibt es noch keine Langzeiterfahrungen (beim Einsatz auf deutschen Deponien). Betriebstechnische Probleme gab es bisher bei Stirlingmotoren allgemein an den Erhitzerköpfen sowie Dichtungsprobleme am Expansionskolben

Abbildungen: **Korrosion am Erhitzerkopf sowie Verschleißspuren am Expansionskolben, [3]**



Verfügbare Anlagentechnik für den Einsatz im Deponiegasbereich

- Die schwedische Firma „cleanergy“ kaufte die Patentrechte des ehemaligen, in Deutschland entwickelten, „Solo“ Stirlingmotors
- Es wurde u.a. eine Brenneinheit für den Stirlingmotor adaptiert (FLOX-Brenner der Wärmeprozestechnik GmbH), mit der Schwachgase, insbesondere auch Deponiegas, erfolgreich katalytisch und sehr schadstoffarm verbrannt werden können
- Die Anlage wurde zu einer anschlussfähigen BHKW-Kompaktanlage weiterentwickelt

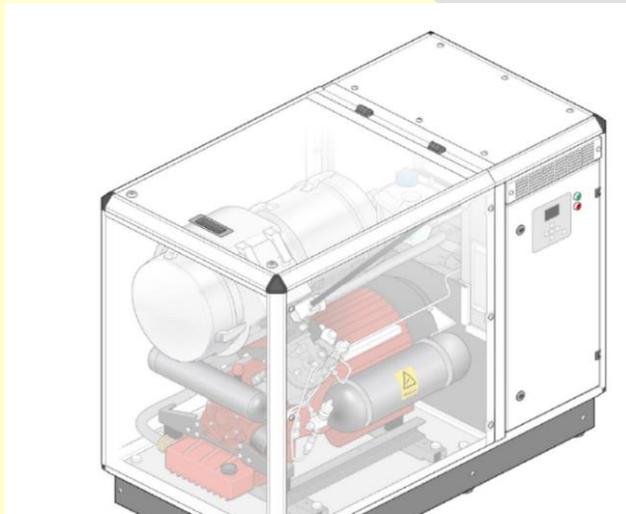


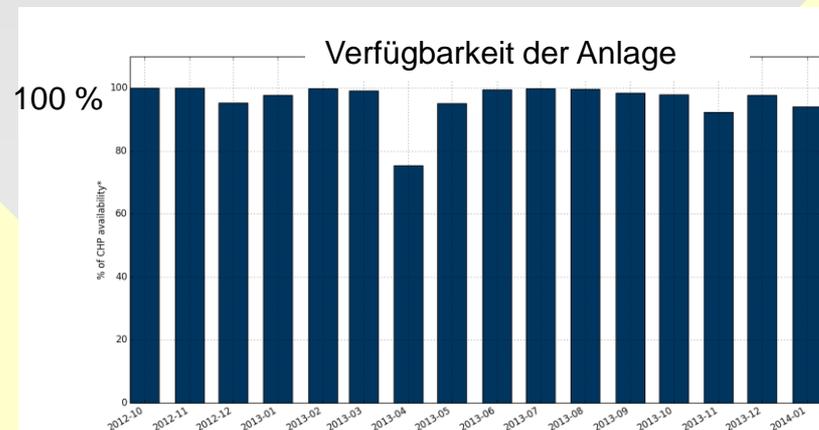
Abbildung: **BHKW-Modul und Produktionsstandort, [2]**

Rahmenbedingungen für das Projekt Göritz

- Der Kommunale Abfallentsorgungsverband „Niederlausitz“ (KAEV), 15907 Lübben, ist Betreiber und Eigentümer der Deponie Göritz. Unter Berücksichtigung der gastechnischen Situation auf der Deponie Göritz, mit weiter rückläufigen Deponiegasmengen und vermehrten Fackel-Stillstandszeiten, ist eine Anpassung des gastechnischen Verwertungssystems notwendig. Neben der Installation einer neuen Verdichter/Fackelanlage, mit entsprechend angepasster Verbrennungsleistung, ist die Optimierung der Deponierestgasverwertung durch die zusätzliche Installation einer Anlage zur Deponiegasverstromung mittels Stirlingmotoren geplant
- Diese Rahmenbedingungen sind beispielhaft für hunderte weiterer deutscher und europäischer Deponien. Veraltete und überdimensionierte Verdichter führen zu einem schlechten Betriebsregime, hohen Stromkosten (bis zu 10.000 Euro/a) sowie Wartungs- und Reparaturaufwendungen

Basisdaten und Rahmenbedingungen für den Einsatz des BHKW-Moduls C9G von Cleanergy

- Die verfügbare Anlage hat eine nominale Leistung von max. 9 kW(e), im Deponiegasbereich ist die Dauerleistung auf 7 kW(e) begrenzt
- Der Deponiegasbedarf des Motors beträgt 7,61 m³/h bei 7 kW(e) und 4 kWh/m³ Energiegehalt des Deponiegases, **sehr gering**
- Die Anlage kann modulierend zwischen 40 % und 100 % Last und mit Methangehalten noch **unter 20 Vol. %** gefahren werden
- Der Wirkungsgrad liegt gemäß Herstellerangaben in einem Bereich zwischen 16 % und 24 %, je nach Lastanforderung und Rücklaufwärme des Kühlwassers, **Wirkungsgrad bei Deponiegas nicht entscheidend**
- Die Verfügbarkeit der Anlage ist außerordentlich hoch und liegt z.B. am Standort Rönneholm in den letzten 12 Monaten bei über 95 % [2]



Rahmenbedingungen für den Einsatz einer BHKW-Stirling-Doppelmodulanlage

↪ Mit dem geringen Gas- und Methanbedarf ergibt sich noch ein nahezu unerschöpfliches Einsatzpotenzial auf Altdeponien

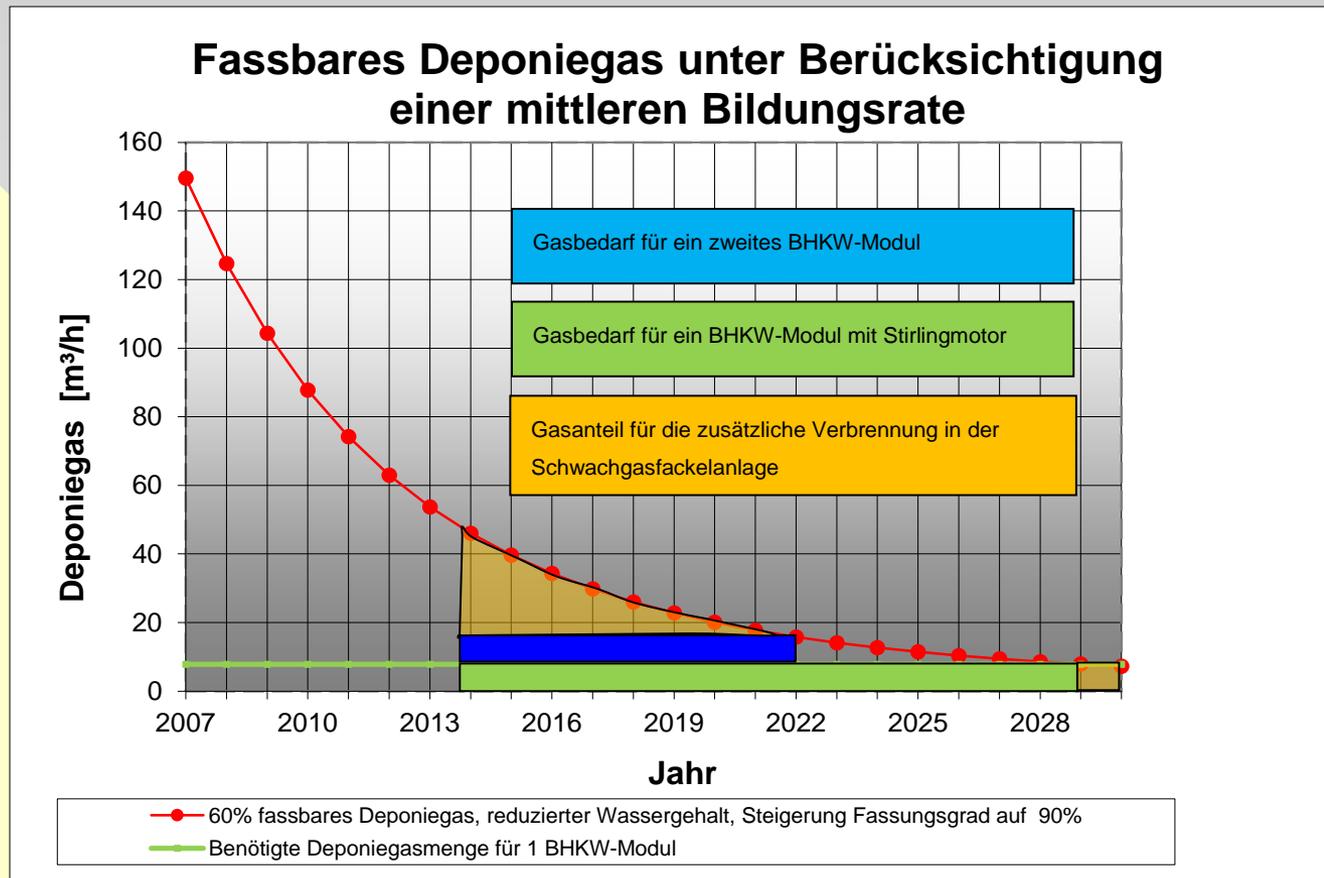


Abbildung: **Beispiel für eine bedarfsgerechte Anlagenauslegung am Fallbeispiel der Deponie Göritz [1]**

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für den konkreten Einsatzfall

- Im Berechnungsbeispiel der Deponie Göritz können bei Einsatz einer Doppelmodulanlage: $2 * 58.100 \text{ kWh} = 116.200 \text{ kWh}$ Elektroenergie erzeugt werden. Der Eigenstrombedarf am Standort durch die Fackelanlage beträgt im Durchschnitt ca. 29.050 kWh. Es könnte folglich nahezu der gesamte Eigenstromverbrauch gedeckt und zusätzlich nach Abzug des Eigenbedarfs ca. 83.830 kWh Überschussenergie in das öffentliche Netz eingespeist werden (Doppelmodulanlage)
- Die Verwertung der erzeugten thermischen Energie, im Bereich zwischen 8 kW und 25 kW, ist evtl. zu Heizzwecken möglich, jedoch nur auf einem relativ niedrigen Temperaturniveau
- Bei Gegenüberstellung möglicher Einsparungen/Mehrausgaben durch den Betrieb der BHKW-Stirlingmodulanlagen (Vergütung von 9,48 ct/kWh eingespeister Energie sowie 22 ct/kWh bei Eigenstromersatz, 8300 Bh, 7,0 kW Erzeugung pro Modul und 3,5 kW(el) Fackelbedarf) ergibt sich nachfolgende Bilanz

Stirlingmotorentechnik – Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit

Erträge/Zusatzausgaben	Bemerkung	[kWh]	Einmodulanlage Erz. 58.100 kWh (8300 Bh)	Doppelmodulanlage Erz. 116.200 kWh
1. Ersatz Eigenstrombedarf (anteilig, brutto):	50.000 kWh - 20%	40000,0	10.710,00 €	10.710,00 €
Netznutzungsentgelt Eigenstrom bei Anlagen über 10 kW(el)	(40.000 kWh * 0,0312 €/kWh)	-40000,0	0,00 €	-1.248,00 €
2. Stromrückspeisung (bei Inbetriebnahme 2014):	(18.100 kWh Überschuss, abzüglich 0,2 kW Eigenbedarf = 1660 kWh, 8,3449 ct Vergütung)	16440,0	1.371,90 €	6.081,76 €
3. Service/Reparaturkosten (brutto):	pro Jahr		-2.500,00 €	-4.000,00 €
4. Verbrauchskosten (brutto):	(z.B.: Öl, Helium) 70 % von 62.895		-500,00 €	-1.000,00 €
5. Wärmeersatzkosten (brutto):	kWh * 0,103 Euro/kWh	44026,5	4.550,00 €	5.847,00 €
Überschuss pro Jahr:			13.631,90 €	16.390,76 €

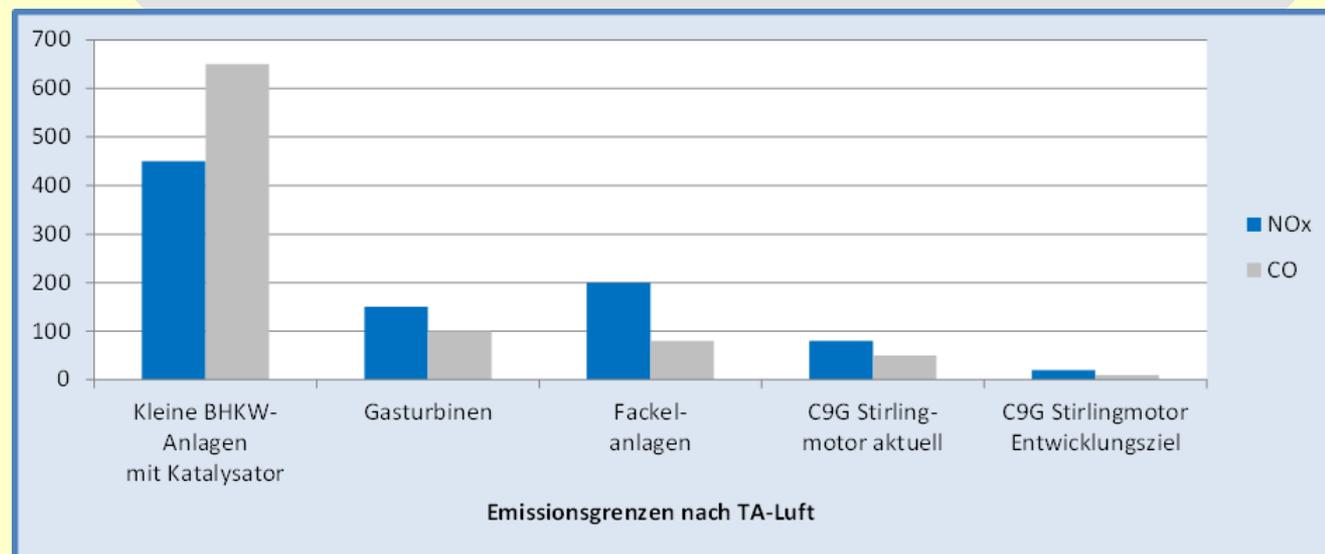
Abbildung: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für den Einatz einer BHKW-Stirlingmotorenanlage mit einem bzw. zwei Modulen [2]

↪ Bei Investitionskosten von ca. 70.000 – 80.000 Euro für eine Einmodulanlage (Gesamtinvestition) ergeben sich statische Amortisationszeiten zwischen 5 und 10 Jahren

Stirlingmotorentechnik – Emissionen und genehmigungsrechtliche Anforderungen

- Die genehmigungsrechtliche Einordnung einer Stirlingmotorenanlage ist schwierig, da sie weder exakt als Anlage zur Deponiegasverbrennung noch als eine Anlage zur Deponiegasverstromung einzuordnen ist
- Für die geplante Doppelmodulanlage auf der Deponie Göritz wurde ein BImSch-Antrag nach Nummer und Anhang 4. BImSchV 8.1.2.2 und 8.1.3 (Verbrennungsmotoranlage) gestellt und die Genehmigung ist jetzt erteilt
- Für weitere genehmigungsrechtliche Verfahren sollte jedoch abgewogen werden, ob nicht entsprechende Vereinfachungen für diese sehr geringen Emissionsströme möglich sind (FLOX-Brenners ($\text{CO} = 50 \text{ mg/m}^3$, $\text{NO}_x = 80 \text{ mg/m}^3$))

Abbildung: Vergleich der Emissionsgrenzen nach TA-Luft mit dem Schadstoffausstoß eines BHKW-Stirlingmoduls mit FLOX-Brenner [2]





Thesen und Schlussfolgerungen



Der Einsatz von Stirlingmotoren kann eine wirtschaftliche Alternative zur Deponiegasverbrennung sein, wenn

- ein Ersatz der vorhandenen Verdichter/Fackelanlagentechnik notwendig ist und
- die prognostizierbaren, verwertbaren Deponie-Restgasvolumenströme noch eine Anlagelaufzeit von ca. 10 Jahren zulassen.

Der Einsatz von Stirlingmotoren ist eine ökologische Alternative, da

- der Zeitraum der Deponiegasnutzung wesentlich verlängert werden kann,
- die Erzeugung von Eigenstrom eine ökologisch wertvolle Alternative zum Fremdstrombezug ist,
- ein großes Potential in Deutschland und auch weltweit vorhanden ist,
- bei vielen Deponien noch sehr lange Betriebszeiten mit den benannten geringen Restemissionen zu verzeichnen sind,
- und der Schadstoffausstoß im Vergleich zu anderen Techniken auf einem sehr geringen Niveau liegt.

Das Pilotprojekt beim KAEV auf der Deponie Göritz soll den Prozess vorantreiben, dass ein Stirlingmotor integraler Bestandteil einer Verdichter/Fackelanlage werden kann – ein Förderantrag wurde beim Land Brandenburg eingereicht

Quellenverzeichnis

Quellenverzeichnis

- [1] SEF 2013
- [2] Publikationsunterlagen der Fa. „cleanenergy“ Schweden
- [3] Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Zwischenbericht 3/2013, Zuverlässiger Alpha Stirlingmotor (ZUMO), Projektnummer: 314234