



FACHHOCHSCHUL-BACHELORSTUDIENGANG

Bio- und Umwelttechnik

Technisch-wirtschaftlicher Vergleich eines Gasmotors mit einer Mikrogasturbine

ALS BACHELORARBEIT EINGEREICHT

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science in Engineering

von

Roman Lugmayr

Jänner 2010

Betreuung der Bachelorarbeit durch

DI Harald Bala MSc

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, die den benutzten Quellen entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.
Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

.....
Roman Lugmayr

Wels, 29.01.2010

KURZFASSUNG

In österreichischen Biogasanlagen werden bisher ausschließlich Gasmotoren zur Bereitstellung von Energie und Wärme verwendet. In dieser Arbeit wird der Gasmotor mit einer neuen Technologie, nämlich der Mikrogasturbine, verglichen. Dazu wurde je ein Angebot als Basis für den Vergleich herangezogen und die jeweiligen Stärken und Schwächen wurden ermittelt. Dabei ergab sich, dass der Gasmotor einen höheren elektrischen Wirkungsgrad sowie niedrigere spezifische Investitionskosten hat. Die Mikrogasturbine zeichnet sich vor allem durch ihre niedrige Mindestgasqualität, eine lange Lebensdauer und niedrige Betriebs- und Wartungskosten aus. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Mikrogasturbine zukünftig eine gute Alternative zum Gasmotor sein wird.

ABSTRACT

In Austrian biogas plants the gas engine is mainly used to provide energy and power. In this thesis the gas engine is compared with a new technology called microturbine. The basis for the comparison was an offer of two enterprises and, according to this data, the strengths and weaknesses were determined. The results were that the gas engine has a higher electrical efficiency and lower specific investment costs. The advantages of the microturbine are a lower minimum gas quality, a long life and lower operating and maintenance costs. Based on this results it can be assumed, that in the future the microturbine will be a good alternative to the gas engine.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Ziele.....	1
1.2	Nicht-Ziele	1
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	2
2.1	Biogas	2
2.1.1	Allgemeines	2
2.1.2	Entstehung von Biogas	2
2.1.3	Zusammensetzung von Biogas.....	3
2.1.4	Substrate für Biogasanlagen.....	4
2.1.5	Biogas-Qualitätsparameter	5
2.1.5.1	Heizwert-Brennwert.....	5
2.1.5.2	Gemischheizwert.....	5
2.1.5.3	Methanzahl (MZ)	5
2.1.5.4	Zündgrenze	5
2.1.5.5	Laminare Flammengeschwindigkeit	5
2.1.6	Biogasanforderungen.....	6
2.2	Blockheizkraftwerke (BHKW)	7
2.2.1	Allgemeines	7
2.2.2	Funktionsprinzip.....	7
2.2.3	Energiebilanz eines Blockheizkraftwerkes	9
2.2.4	Wirtschaftlichkeitsfaktoren	10
2.2.5	Blockheizkraftwerkarten.....	11

2.3	Gasmotor.....	12
2.3.1	Geschichte	12
2.3.2	Aufbau	12
2.3.3	Funktion	13
2.3.4	Ottomotor.....	14
2.3.5	Zündstrahlmotor.....	15
2.3.6	Vergleich Ottomotor – Zündstrahlmotor.....	16
2.4	Mikrogasturbine.....	17
2.4.1	Geschichte der Gasturbine	17
2.4.2	Aufbau	18
2.4.3	Funktion	19
2.4.4	Hersteller.....	20
2.5	Abgasemissionen	21
2.5.1	Emissionsgrenzwerte in Deutschland	22
2.5.2	Emissionsgrenzwerte in Österreich.....	23
3	Vergleich Gasmotor – Mikrogasturbine.....	24
3.1	Technischer Vergleich	24
3.1.1	Motor-Abmessungen.....	24
3.1.2	BHKW-Fläche	24
3.1.3	Gesamtfläche.....	24
3.1.4	Gewicht.....	24
3.1.5	Aufstellungsart	25
3.1.6	Gemischkühler	25
3.1.7	Notkühler.....	25
3.1.8	Vordruck am Gaseintritt	25
3.1.9	Elektrischer Wirkungsgrad	26
3.1.10	Thermischer Wirkungsgrad	27

3.1.11	Gesamtwirkungsgrad	28
3.1.12	Teillastverhalten	29
3.1.13	Mindestgasqualität	29
3.1.14	Spezifischer Kraftstoffverbrauch	30
3.1.15	Füllmenge Öl.....	30
3.1.16	Schmierölverbrauch	30
3.1.17	Benötigte Verbrennungsluftmenge.....	30
3.1.18	Abgasemissionen und Abgasmassenstrom	31
3.1.19	Abgasmassenstrom	32
3.1.20	Abgastemperatur	33
3.1.21	Schallemissionen	33
3.1.22	Warmwasserkreislauf.....	32
3.1.23	Erfahrung mit Biogas.....	33
3.2	Wirtschaftlicher Vergleich	34
3.2.1	Anschaffungskosten Blockheizkraftwerk.....	34
3.2.2	Gesamtinvestitionskosten	35
3.2.3	Wartungsintervalle	36
3.2.4	Vollwartungskosten.....	36
3.3	Zusammenfassung	37
3.4	Stärken-Schwächen-Katalog	38
4	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	39
5	LITERATUR.....	40

1 EINLEITUNG

In unserer heutigen Zeit ist die effektive Herstellung und Nutzung von Energie von großer Bedeutung. Während übliche großtechnische Stromerzeugungsanlagen die Wärme nicht nutzen können und damit ca. 50 % der Gesamtenergie „verschenken“, verwenden Biogasanlagen zur Energiegewinnung die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Der Vorteil liegt darin, dass neben dem erzeugten Strom auch noch die Wärme genutzt und somit ein fast doppelt so hoher Gesamtwirkungsgrad erzielt wird.

In Österreich werden fast ausschließlich Gasmotoren als KWK-Anlagen betrieben. Eine neue Technologie ist die Mikrogasturbine, die langsam den Markt erobert. In dieser Arbeit wird zuerst auf die Biogasqualität und ihre Anforderungen an die nachfolgende Verstromung eingegangen. Anschließend werden die verschiedenen Arten von Blockheizkraftwerken beschrieben. Am Schluss der Arbeit steht der technische und wirtschaftliche Vergleich zwischen dem Gasmotor und der Mikrogasturbine.

1.1 Ziele

- ✓ Überblick über die Biogasentstehung
- ✓ Biogas-Qualitätsparameter
- ✓ Erklärung des Begriffes „Blockheizkraftwerk“
- ✓ Beschreibung des Gasmotors und der Mikrogasturbine
- ✓ technischer Vergleich zwischen Gasmotor und Mikrogasturbine
- ✓ Gegenüberstellung der Kosten
- ✓ Erstellung eines Stärken-Schwächen-Katalogs

1.2 Nicht-Ziele

- ✓ keine detaillierte Beschreibung einer Biogasanlage
- ✓ keine Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsberechnung

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Biogas

2.1.1 Allgemeines

Unter Biogas versteht man das gasförmige Endprodukt aus dem bakteriellen Abbau von organischem Kohlenstoff, das unter anaeroben Bedingungen (unter Luftabschluss) in feuchtem Milieu gebildet wird. Dieses Gas kann aufgrund seines Methananteils als Energieträger zur Strom- und Wärmeenergiegewinnung, aber auch als Treibstoff verwendet werden.

2.1.2 Entstehung von Biogas

Biogas entsteht in vier Teilschritten, die im Fermenter meistens zeitlich parallel ablaufen:

Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese.¹

Ein vereinfachtes Schema der Biogaserzeugung wird in Abbildung 1 dargestellt.

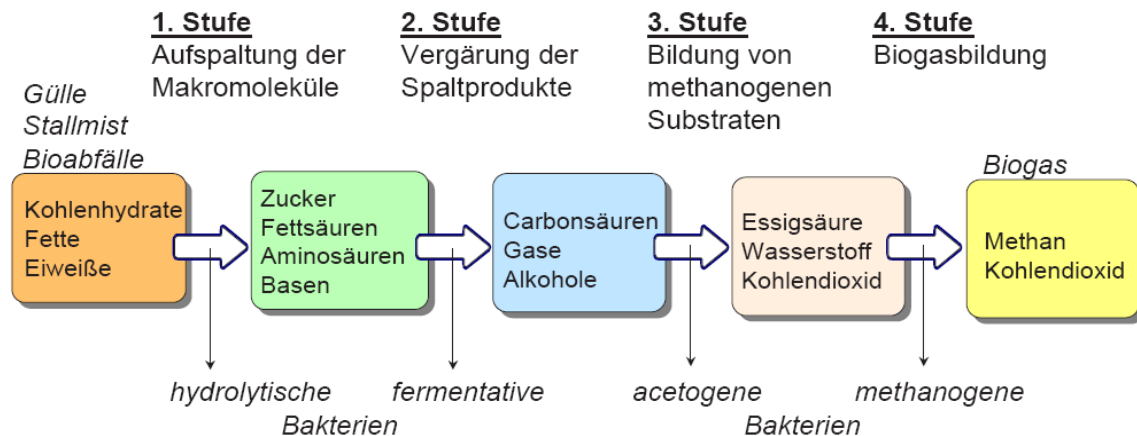


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema der Biogaserzeugung

Quelle: Linke, B.: *Biogas*, 2003

¹ Linke, B.: *Biogas*, 2003

1. Stufe – Hydrolyse

In der Hydrolyse-Phase spalten anaerobe Mikroorganismen die Substrate, die aus Fett, Eiweiß und Kohlenhydraten bestehen, in die Grundbausteine Fettsäuren und Glycerin, Aminosäuren und Zucker auf.

2. Stufe – Acidogenese

In der Acidogenese werden die Produkte der Hydrolyse in kurzkettige organische Säuren und Alkohole zerlegt. Dabei werden bereits die ersten Gase gebildet.

3. Stufe – Acetogenese

In der Acetogenese, die auch Essigsäurebildung genannt wird, werden die kurzkettigen organischen Säuren und Alkohole in Essigsäure (CH_3COO), Kohlendioxid (CO_2) und Wasserstoff (H_2) zerlegt.

4. Stufe – Methanogenese

Die Methanogenese ist die vierte und letzte Phase im Prozess der Biogasbildung. Hier wird primär die Essigsäure zu Methan (CH_4) und CO_2 umgewandelt, ein geringerer Methananteil wird direkt aus dem Wasserstoff gebildet.

2.1.3 Zusammensetzung von Biogas

Die Hauptbestandteile von Biogas sind Methan, Kohlendioxid und Wasserdampf. Weiters sind auch noch Spuren von anderen Inhaltsstoffen enthalten.² Die Gasqualität wird im Wesentlichen durch die Zusammensetzung der eingesetzten Substrate beeinflusst. In Tabelle 1 ist die übliche Zusammensetzung von Biogas dargestellt.

Zusammensetzung von Biogas			
Methan	40–75 %	Sauerstoff	0–2 %
Kohlendioxid	25–55 %	Wasserstoff	0–1 %
Wasserdampf	0–10 %	Ammoniak	0–1 %
Stickstoff	0–5 %	Schwefelwasserstoff	0–1 %

Tabelle 1: Biogaszusammensetzung

Quelle: GE Jenbacher: *Gaszusammensetzung*, 2005

Um die Blockheizkraftwerke vor Korrosion durch H_2S oder Ammoniak zu schützen, müssen diese Konzentrationen bei Bedarf verringert werden.

² GE Jenbacher: *Gaszusammensetzung*, 2005

2.1.4 Substrate für Biogasanlagen

Der Großteil der österreichischen Biogasanlagen verwendet Energiepflanzen in Kombination mit geringen Mengen Rinder-, oder Schweinegülle als Ausgangssubstrat. Unter Energiepflanzen versteht man Pflanzen, die ausschließlich zur Energiegewinnung angebaut werden und nicht als Nahrungsmittel dienen. Hier wird vor allem Maissilage eingesetzt, da sie einen sehr hohen Biomasse- und Biogasertrag liefert. Weitere Energiepflanzen sind Getreide und Gräser, die ebenfalls hohe Biomasseerträge je Hektar ermöglichen. Neben Energiepflanzen können Abfälle, wie zum Beispiel Altfett, Fettabscheider, Bioabfälle, Grünschnitt, etc. vergoren werden.³

In Abbildung 2 werden die spezifischen Gaserträge und Methangehalte verschiedener Substrate dargestellt.

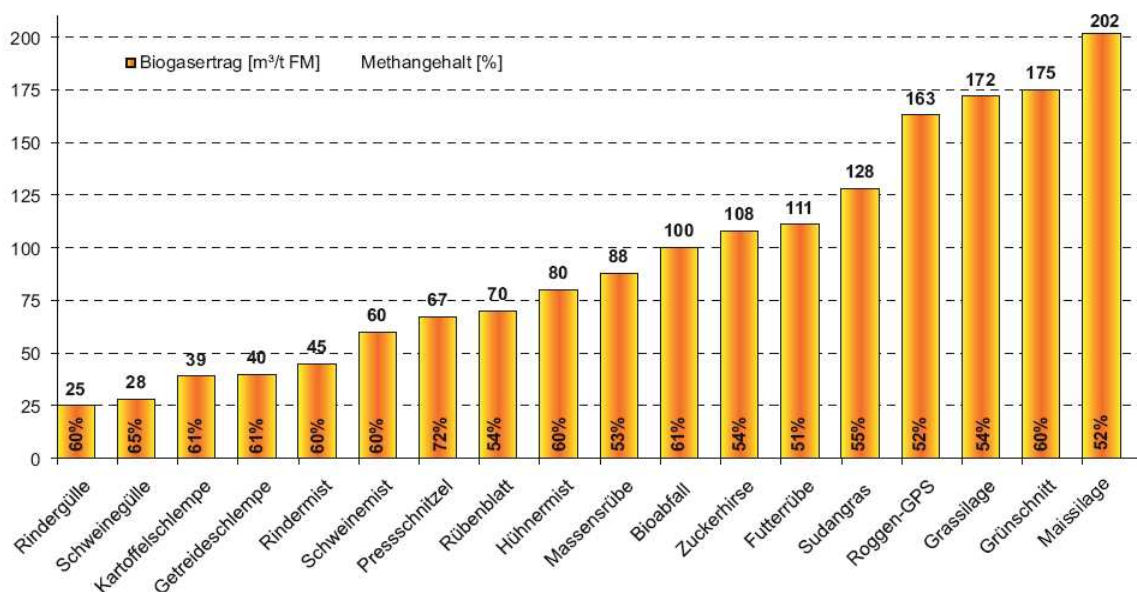


Abbildung 2: Biogaserträge verschiedener Substrate

Quelle: FNR: Biogas – eine Einführung, 2006

Die Qualität des Biogases richtet sich hauptsächlich nach der Höhe des Methangehaltes. Dies liegt daran, dass ein hoher Methananteil gleichzeitig einen hohen Heizwert bedeutet, da CO₂ und Wasserdampf energetisch nicht genutzt werden können. Wie in Abbildung 2 dargestellt, liegen die Methangehalte zwischen 40 % und 75 % pro Nm³ Biogas.

³ FNR: Biogas – eine Einführung, 2009

2.1.5 Biogas-Qualitätsparameter

Die Biogasqualität wird durch einige Parameter bestimmt, die die Brenneigenschaften des Biogases beschreiben.⁴

2.1.5.1 Heizwert-Brennwert

Der Heizwert gibt die maximal nutzbare Wärmemenge einer Verbrennung ohne Kondensationsenergie des im Gas enthaltenen Wasserdampfes an, während der Brennwert die Kondensationsenergie berücksichtigt. Das Verhältnis von Methan zum Heizwert ist 10:1. Somit weist beispielsweise Biogas mit einem Methangehalt von 50 % einen Heizwert von 5 kWh auf. Ein Normkubikmeter Biogas ($1 \text{ Nm}^3 = 1 \text{ m}^3$ Gas bei einer Temperatur von $0 \text{ }^\circ\text{C}$, einem Druck von 1.013,25 mbar und 0 % Luftfeuchtigkeit) hat somit cirka denselben Heizwert wie 0,6 Liter Erdöl oder $0,5 \text{ Nm}^3$ Erdgas.³

2.1.5.2 Gemischheizwert

Der Gemischheizwert gibt den Heizwert eines aus Brennstoff und Verbrennungsluft bestehenden Gasgemisches an.

2.1.5.3 Methanzahl (MZ)

Die Methanzahl ist (analog zur Oktanzahl) ein Wert, der die Klopfintensität (Eigenschaft des Gases, zum richtigen Zeitpunkt zu zünden und Fehlzündungen zu vermeiden) eines Gases angibt. Die Methanzahl errechnet sich aus dem volumetrischen Mischungsverhältnis der Gaskomponenten und ihren spezifischen Methanzahlen. Während Methan eine Methanzahl von 100 hat, besitzt Wasserstoff eine Methanzahl von 0. Somit hat beispielsweise ein Gemisch von 60 % Methan und 40 % Wasserdampf eine Methanzahl von 60.⁴

2.1.5.4 Zündgrenze

Die Zündgrenze ist jene Temperatur, bei der ein Brennstoff zu brennen beginnt.⁴

2.1.5.5 Laminare Flammgeschwindigkeit

Diese Kennzahl gibt an, wie schnell sich die Flamme bei laminarer Strömung (kein Auftreten von Verwirbelungen) ausbreitet und ist somit ein Parameter für die Geschwindigkeit der Verbrennung. Sie verringert sich mit Zunahme des Lambda-Wertes (Verhältnis von zugeführter Verbrennungsluft zum Biogas).⁵

³ FNR: Biogas – eine Einführung, 2009

⁴ Dr. Herdin, G.: Gasmotoren – Grundlagen

⁵ Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

2.1.6 Biogasanforderungen

Für den Betrieb von Blockheizkraftwerken werden Anforderungen an das Biogas gestellt, um eine optimale Ausschöpfung der eingesetzten Ressourcen zu erzielen. In Tabelle 2 sind diese Kriterien für Gasmotoren und Mikrogasturbinen aufgelistet.⁶

Biogasanforderungen für Blockheizkraftwerke

Parameter	Gasmotor	Mikrogasturbine
Methangehalt	> 40 %	> 30 %
Wasserstoff	0–5 %	0–5 %
Wasserdampf	0–5 %	0–5 %
Sauerstoff	0–5 %	0–10 %
Kohlendioxid	0–50 %	0–50 %
Stickstoff	0–50 %	0–50 %
Schwefelwasserstoff [mg Nm ⁻³]	< 500 mg	< 300 mg

Tabelle 2: Biogasanforderungen für Blockheizkraftwerke

Quelle: B. Krautkremer: *Anforderungen an die Qualität von Biogas*, 2003
Dr. Herdin, G.: *Gasmotoren-Analyse*

Die Hauptstörstoffe im Biogas sind Wasserdampf, da er in der Maschine zur Kondensatbildung führt und Schwefelwasserstoff, da er korrosiv wirkt. Durch diese Gasinhaltsstoffe können sich folgende Probleme ergeben:⁶

- ✓ Startschwierigkeiten
- ✓ Druckschwankungen
- ✓ Korrosion
- ✓ Erosion
- ✓ Ausfall der Ventile
- ✓ Verdichterprobleme

Zur Lösung dieser Probleme ist eine Biogasreinigung meist unerlässlich. Dazu gehört die oxidative Biogasentschwefelung durch aerobe Mikroorganismen, oder die chemische Fällung des Schwefels durch Metallchloride. Zur Kondensation von Wasserdampf gibt es verschiedene Varianten:⁶

- ✓ Kältetrocknung
- ✓ Adsorption
- ✓ Überverdichtung und anschließende Expansion mit Wasserabscheider
- ✓ Membranverfahren
- ✓ Erwärmung

⁵ Dr. Herdin, G.: *Gasmotoren-Analyse*

⁶ Krautkremer, B.: *Anforderungen an die Qualität von Biogas*, 2003

2.2 Blockheizkraftwerke (BHKW)

2.2.1 Allgemeines

Ein Blockheizkraftwerk ist eine Anlage, die nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) arbeitet. Dies bedeutet, dass die Zuführung von Energie zu einer simultanen Gewinnung von Strom und Wärme führt. Die Art des Brennstoffes reicht von herkömmlichen flüssigen Treibstoffen, wie Benzin und Diesel, bis hin zum gasförmigen Erd- und Biogas.³

Ein Blockheizkraftwerk umfasst folgende Komponenten:⁷

- ✓ Verbrennungsmaschine
- ✓ Generator inkl. Steuerung
- ✓ Primärkühlkreis
- ✓ Sekundärkühlkreis
- ✓ Abgassystem
- ✓ Brennstoffkontrollsystem

2.2.2 Funktionsprinzip

In Abbildung 3 ist die Funktionsweise einer Biogasanlage mit integriertem Blockheizkraftwerk dargestellt.

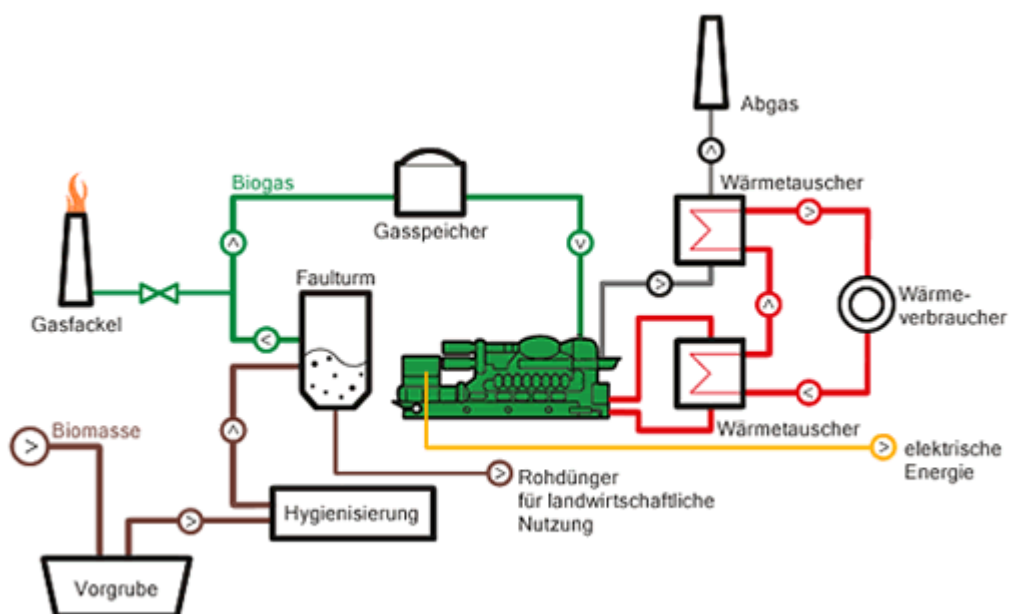


Abbildung 3: Schema Biogasanlage

Quelle: GE Jenbacher Internet, 01.11.09

³ FNR: Biogas – eine Einführung, 2009

⁷ DI Fröhlich, F.: Blockheizkraftwerke für Biogasanlagen, 2005

Technisch-wirtschaftlicher Vergleich eines Gasmotors mit einer Mikrogasturbine

Am Beginn des Prozesses steht die Anlieferung der verwendeten Biomasse. In einer Vorgrube werden die verschiedenen Substrate homogenisiert. Vor der Beschickung des Faulturmes (Fermenter) wird jenes Material hygienisiert, das potentiell pathogene (krankheitserregende) Keime wie Salmonellen oder Listerien beinhalten kann (Schlachtabfälle, Großküchenabfälle, etc.).

Im Fermenter beginnt der eigentliche Biogaserzeugungsprozess, der im Punkt „2.1.2 Erzeugung von Biogas“ näher beschrieben ist. Das dabei entstehende Biogas wird in einen Gasspeicher geleitet, der für eine gleichmäßige Gasbeschickung des Blockheizkraftwerkes sorgt und Schwankungen in der Biogasproduktion ausgleicht.



Abbildung 4: Auf Fermenterdecke stehende Gasfackel

Quelle: Bala

Da Methan zu den Treibhausgasen (weitere Treibhausgase sind CO_2 , Lachgas, FCKW und Wasserdampf) gehört, ist eine Gasfackel (oder auch ein Heizkessel) installiert, die in Abbildung 4 dargestellt ist. Diese dient zur Verbrennung von überschüssigem Biogas. Das vergorene Substrat aus dem Biogasprozess wird in Behältern (Endlager, Güllelagune) gelagert und zu den Vegetationszeiten als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt.

2.2.3 Energiebilanz eines Blockheizkraftwerkes

In einem Blockheizkraftwerk wird ein Brennstoff-Luft-Gemisch verbrannt, um einen Generator zur Stromerzeugung anzutreiben. Zur Kühlung wird beim Gasmotor Wasser verwendet, während die Mikrogasturbine luftgekühlt ist. Die darin enthaltene Wärmeenergie kann zu internen und externen Heizzwecken verwendet werden.

In Abbildung 5 ist die Energiebilanz eines Blockheizkraftwerkes als sogenanntes Sankey-Diagramm dargestellt.⁸

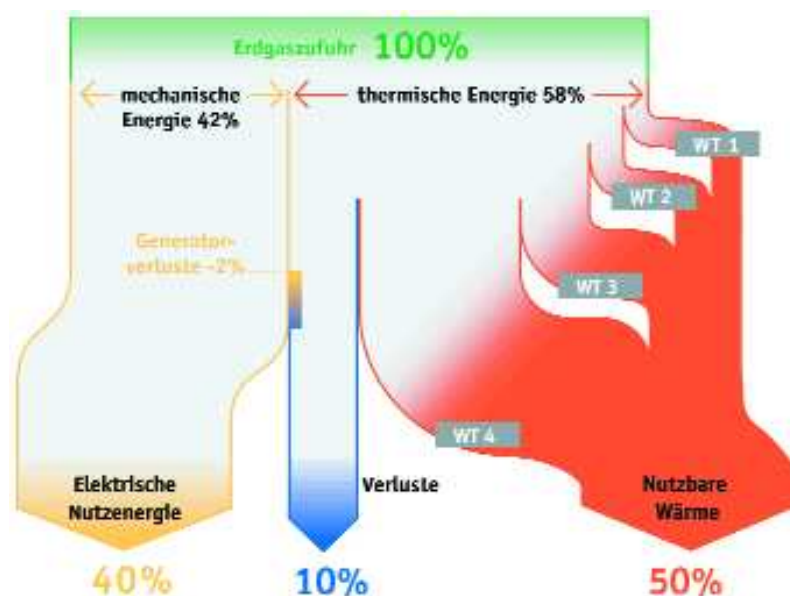


Abbildung 5: Energiebilanz BHKW

Quelle: GE Jenbacher, *Kraft-Wärme-Kopplung mit Gasmotoren*, 2009

- WT 1: Gemisch-Wärmetauscher
- WT 2: Öl-Wärmetauscher
- WT 3: Motorkühlwasser-Wärmetauscher
- WT 4: Abgas-Wärmetauscher

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass ca. 40 % der im Biogas enthaltenen Bruttoenergie in Strom umgewandelt wird, während 50 % als nutzbare Wärme vorliegt. Für eine optimale Energienutzung ist somit die Verwertung der Wärme entscheidend. Der Verlust von 10 % setzt sich aus Generator-, Wärmetauscher- und Strahlungsverlusten, sowie dem nicht nutzbaren Anteil der Abgaswärme zusammen und kann daher nicht vermieden werden.

⁸ GE Jenbacher: *Kraft-Wärme-Kopplung mit Gasmotoren*

2.2.4 Wirtschaftlichkeitsfaktoren

Die Auswahl des Blockheizkraftwerkes ist eine der Hauptschwierigkeiten bei der Stromerzeugung mit Biogas. Jedes bringt spezifische Vor- und Nachteile mit sich, die individuell abgewogen werden müssen.

Für die Wahl sollte das Aggregat folgende Anforderungen erfüllen:⁹

- ✓ günstiger Preis
- ✓ hoher mechanischer Wirkungsgrad
- ✓ geringe Abgasemissionen
- ✓ Unempfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit, H₂S und anderen Spurenstoffen
- ✓ lange Lebensdauer
- ✓ lange Serviceintervalle
- ✓ einfache Wartung
- ✓ schnelle Ersatzteilversorgung



Abbildung 6: 200 kW Mikrogasturbine

Quelle: Bala

Im Vordergrund stehen primär eine lange Lebensdauer sowie ein hoher Wirkungsgrad.

⁹ Eder, Schulz: *Biogas Praxis*, 2006

2.2.5 Blockheizkraftwerkarten

Für die Energiegewinnung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Auswahl:

GASMOTOR:



Gasmotoren sind Blockheizkraftwerke, die in den Varianten Ottomotor und Dieselmotor betrieben werden. Dabei wird ein Kraftstoffgemisch in einer Brennkammer verbrannt und die freiwerdenden Kräfte werden über Kolben auf eine Welle übertragen. Diese treibt einen Generator an, der dadurch Strom erzeugt. Die Abgaswärme wird zur Heißwassererzeugung in Gebäuden genutzt.¹⁰

Abbildung 7: Gasmotor Jenbacher

Quelle: Novatech GmbH, BHKWs, 2009

ZÜNDSTRAHLMOTOR:



Das Funktionsprinzip des Dieselmotors ist das gleiche wie das des Gasmotors mit dem Unterschied, dass er ein Selbstzünder ist. Daher benötigt er zusätzlich zum Biogas noch Diesel, oder Biodiesel als Zündungsauslöser.⁵

Abbildung 8: Zündstrahlmotor Schnell

Quelle: Novatech GmbH, BHKWs, 2009

MIKROGASTURBINE:



Mikrogasturbinen sind sehr kleine Hochgeschwindigkeitsturbinen, bei denen Turbine, Verdichter und Generator auf einer Welle sitzen. Durch die Verwertung des Brennstoffgemisches wird die Turbine angetrieben und somit Strom erzeugt. Parallel dazu wird die Abgaswärme zur Vorwärmung des Verbrennungsgases verwendet.¹¹

Abbildung 9: Mikrogasturbine Capstone

Quelle: VTA Engineering und Umwelttechnik GmbH
Internet, 09.10.2009

⁵ Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

¹⁰ Bioenergie Serviceagentur, 2009

¹¹ VTA Engineering und Umwelttechnik GmbH, 2009

2.3 Gasmotor

2.3.1 Geschichte

Die Erfindung des Gasmotors reicht ins 18. Jahrhundert zurück. Im Jahr 1791 untersuchte John Barber als Erster die Wirkungsweise eines mit Gas betriebenen Motors. Drei Jahre später entwickelte Robert Street eine Kolbenmaschine, die Teeröle und Terpentine vergaste und anschließend verbrannte. Als nächstes baute Philippe Lebon eine Maschine, deren Kraftstoff Leuchtgas war. Dabei wurde Luft und Gas durch zwei Pumpen in eine Vorlage gepresst, entzündet und die dabei freiwerdende Kraft zum Antreiben eines Zylinders genutzt.¹⁰

Der Durchbruch des Gasmotors gelang jedoch erst nach der Erfindung von Étienne Lenoir im Jahre 1860. Nach einer Werbekampagne stieg der Absatz dieser Maschinen rasch an und es wurde die Société Lenoir zum Bau von Gasmotoren gegründet. Trotz hoher Unterhaltskosten der Motoren blieb die Nachfrage enorm, da das Motorgeräusch sehr leise war. Im Jahre 1867 stellte Nikolaus Otto seinen Gasmotor auf der zweiten Pariser Weltausstellung aus, den er immer weiter entwickelte und der bis heute die größte Verbreitung gefunden hat.¹⁰

2.3.2 Aufbau

Im Gegensatz zur Gasturbine ist der Gasmotor wie der Hubkolbenmotor (Antrieb der Welle mithilfe eines Kolbens) aufgebaut. Dabei gibt es wie in der Automobilbranche sowohl die Möglichkeit der Fremdzündung (Zündung des Gasgemisches durch eine Zündkerze) als auch die der Selbstzündung (Zündung des Gasgemisches durch Zufuhr von Zündöl).⁵

Die Verwendung von qualitativ hochwertigem Biogas weist höhere Wirkungsgrade und eine gute Abgasbilanz auf. Jedoch muss auf einige Spurenstoffe im Biogas (H_2S , Phosphorverbindungen) ein besonderes Augenmerk gerichtet werden, da diese ansonsten im Motor oder im Abgassystem zu Korrosion führen. Zur Abgasreinigung müssen die Motoren mit Oxidationskatalysatoren zur Reduktion von Kohlenmonoxid sowie einer Ammoniak-Injektion zur Stickoxid-Reduktion ausgestattet sein.⁵

⁵ Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

¹⁰ Bioenergie Serviceagentur, 2009

2.3.3 Funktion

Es gibt verschiedene Arten von Gasmotoren, die jedoch alle nach dem Schaltbild arbeiten, das in Abbildung 10 dargestellt ist:⁵

1-2: Mischung

2-3: Verdichtung

3-4: Leistungsregelung

4-5: Kühlung

5-6: Verbrennung

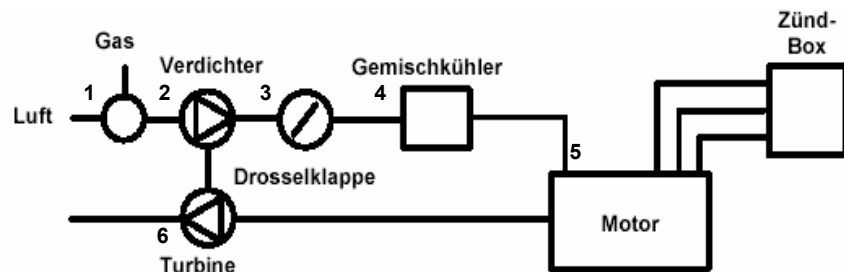


Abbildung 10: Schaltbild Gasmotor

Quelle: Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

Vor dem Gasmotor wird ein Luft-Brennstoff-Gemisch in einem bestimmten Verhältnis hergestellt (1-2). Danach wird das Zündgemisch zur Leistungssteigerung in einem Turbolader verdichtet (2-3). Dieser überbrückt das hohe Luft/Kraftstoffverhältnis. Ein großer Unterschied zur Gasturbine liegt darin, dass der Brennstoff nicht auf einen Druck im bar-Bereich (zwischen 4 und 6 bar) verdichtet werden muss, sondern eine Verdichtung auf ca. 100 mbar ausreicht.

Die Leistungsregelung erfolgt einerseits über einen Turboladerbypass, andererseits über die Drosselklappe (3-4). Der Turboladerbypass ist ein elektronisch gesteuertes Ventil, das eine gezielte Gemischrückführung ermöglicht. Mithilfe der Drosselklappe kann die zugeführte Gasmenge dosiert werden.¹²

Da sich das Zündgemisch durch die Verdichtung bzw. Drosselung erwärmt, wird es mit dem Gemischkühler auf die optimale Betriebstemperatur gebracht (4-5). Danach wird es vor den Zylinder injiziert, komprimiert und mithilfe einer Zündkerze verbrannt (5-6). Die im entstandenen Abgas enthaltene Wärme wird über einen Abgas-Wärmetauscher gewonnen, dann verlässt die Abluft den Motor (6).⁵

⁵ Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

¹² GE Jenbacher: Baureihe 4, 2009

2.3.4 Ottomotor

Das Gasottomotor ist für den Einsatz mit Biogas sehr weit entwickelt und weist mittlerweile annähernd gleiche Wirkungsgrade wie der Dieselmotor auf.⁵

Abbildung 11 zeigt den Gasmotor der Firma Jenbacher, der in der Biogasanlage Wallsee eingesetzt wird. Dieser V12-Motor hat je 6 Zylinder in Reihe und besitzt eine Leistung von 625 kW_{el}. Zur Motorkühlung wird Wasser mit einer Eintrittstemperatur von 70 °C verwendet. Dabei erwärmt es sich um 20 °C und steht mit einer Temperatur von 90 °C als Wärme zur Verfügung.



Abbildung 11: Gasmotor Jenbacher V12 625 kW in Wallsee, 19.10.09

Hersteller von Gasmotoren

Da der Motor bereits im 18. Jahrhundert entwickelt wurde, gibt es eine Vielzahl von Herstellern. Die wichtigsten Erzeuger von Gasmotoren sind unter anderem:

- ✓ GE Jenbacher
- ✓ MWM
- ✓ Caterpillar
- ✓ MAN
- ✓ MTU Friedrichshafen
- ✓ Ford

⁵ Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

2.3.5 Zündstrahlmotor

Eine neue Entwicklung ist die Verwendung eines Dieselmotors zur Biogasverstromung. Dieser Motor wird vor allem dann eingesetzt, wenn das verwendete Biogas einen CO₂-Gehalt über 40 % enthält. Bei einem Methangehalt über 55 % wird der Gasmotor bevorzugt. CO₂-Gehalte über 40 % bewirken eine langsamere Verbrennung, während viel Methan zu einer schnellen Zündung führt.⁷

- 1-2: Mischung
- 2-3: Verdichtung
- 3-5: Kühlung
- 4-5: Einspritzung
- 5-6: Verbrennung

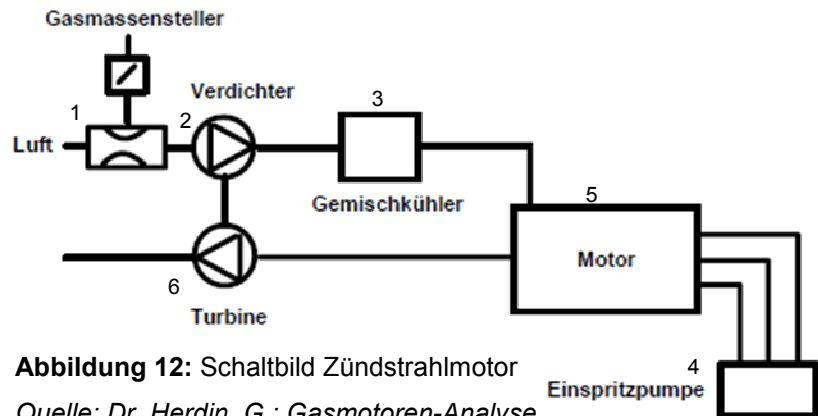


Abbildung 12: Schaltbild Zündstrahlmotor

Quelle: Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

Das Funktionsprinzip, das in Abbildung 12 dargestellt ist, ist das gleiche wie das des Ottomotors mit dem Unterschied, dass der Dieselmotor ein Selbstzünder ist. Hier wird ein Luft-Brennstoff-Gemisch in einem bestimmten Verhältnis hergestellt (1-2) und zur Leistungssteigerung verdichtet (2-3). Das durch die Verdichtung erwärmte Gasgemisch wird im Gemischkühler auf Betriebstemperatur abgekühlt (3-5). Anschließend wird das Luft/Gasgemisch durch die Ansaugventile in die Brennkammer gesaugt und durch den Zylinder komprimiert.

Bei maximaler Kompression wird durch die Einspritzpumpe zusätzlich eine bestimmte Menge Zündöl (10–15 % Diesel oder Biodiesel) in die Brennkammer injiziert (4-5), welches das Gasgemisch entzündet und verbrennt (5-6). Die im Abgas enthaltene Energie wird über einen Abgas-Wärmetauscher gewonnen, danach verlässt die Abluft den Motor (6).

Durch die gemeinsame Verbrennung von Luft, Flüssigkeit und Gas können die Abgasgrenzwerte für Gasmotoren nicht eingehalten werden, auf die im Kapitel „2.5 Abgasemissionen“ näher eingegangen wird.⁵

⁵ Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

⁷ DI Fröhlich, F.: Blockheizkraftwerke für Biogasanlagen, 2005

2.3.6 Vergleich Ottomotor – Zündstrahlmotor

Tabelle 3 beinhaltet einen Vergleich zwischen dem Ottomotor und dem Zündstrahlmotor. Dabei werden die wesentlichsten Merkmale der Aggregate verglichen.⁹

Vergleich von Motorbauart und Verbrennungsverfahren		
Merkmal	Gasottomotor	Zündstrahlmotor
Preis	Niedrig	Hoch
elektrischer Wirkungsgrad [%]	25–40	30–40
Lebensdauer	Niedrig	Mittel
Geräusch	Mittel	Stark
Rußbildung	Nein	Ja
Wartung	Hoch	Hoch
Zündölverbrauch	Nein	Ja
Ersatzkraftstoff bei Biogasausfall	Benzin	Heizöl, Diesel, Pflanzenöl

Tabelle 3: Merkmale verschiedener Motoren

Quelle: Eder, Schulz: Biogas Praxis, 2006

Ein großer Nachteil von Zündstrahlmotoren liegt in der Russbildung. Dies hat zur Folge, dass der Wärmeübergang im Abhitzekeessel gestört wird. Die Russbildung führt auch zu einer erheblichen Beanspruchung des Luftfilters, was wiederum einen größeren Wartungsaufwand sowie höhere Abgasemissionen mit sich zieht. Dies ist die Hauptursache für die Gebäudeverunreinigung von Biogasanlagen.⁵

⁵ Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

⁹ Eder, Schulz: Biogas Praxis, 2006

2.4 Mikrogasturbine

2.4.1 Geschichte der Gasturbine

Die Idee der Gasturbine fand bereits im Jahre 1791 durch John Barber, der auch als Erfinder des Gasmotors gilt, seinen Ursprung. Jedoch werden Gasturbinen wegen der hohen technischen Anforderungen erst seit etwa 50 Jahren technisch marktfähig produziert. Für die bisher verwendete Technologie, nämlich dem Gasmotor in seinen Varianten Otto- und Dieselmotor bzw. Dampfturbine, bedeutete dies einen ernstzunehmenden Rivalen. In der Luftfahrt hat sie die großen Flughöhen und Geschwindigkeiten (bis zur mehrfachen Schallgeschwindigkeit) möglich gemacht und somit dort den Ottomotor total verdrängt.¹³

Die Weiterentwicklung der Gasturbine war damit aber noch lange nicht abgeschlossen:

- ✓ Im Jahr 1993 wurde die erste Mikrogasturbine von der Firma Capstone Turbine Corporation gebaut. Der Grund dafür war das amerikanische Militär, für das ein sowohl leichter als auch leistungsfähiger Stromerzeuger entwickelt werden sollte. Als Grundlage dafür diente die Turboladertechnologie.¹⁴
- ✓ 1996 wurde die Beta-Version der 30 kW Mikrogasturbine eingeführt.
- ✓ 2000 wurde aufgrund des wachsenden Leistungsbedarfs die erste 60 kW Maschine eingeführt.
- ✓ Im Jahr 2002 wurde die tausendste Mikrogasturbine in Betrieb genommen.
- ✓ 2006 wurde die 60 kW Mikrogasturbine durch die 65 kW Maschine ersetzt. Weiters wurde die 65 kW Maschine auch für den Betrieb mit Biogas entwickelt.
- ✓ 2009 wurde schließlich die Markteinführung der 200 kW Mikrogasturbine gefeiert.

Heutzutage dient die Mikrogasturbine zur Erzeugung von Wärme und Strom in der dezentralen Energieversorgung.¹¹

¹¹ VTA Engineering und Umwelttechnik GmbH, 09.10.2009

¹³ Bohl: Strömungsmaschinen 1, 1998

¹⁴ E-quad Power Systems, 09.10.2009

2.4.2 Aufbau

Die Hauptbestandteile der Mikrogasturbine sind der Verdichter, der Rekuperator, der Brenner, die Turbine und der Generator. Der Aufbau ist in Abbildung 13 dargestellt.¹¹

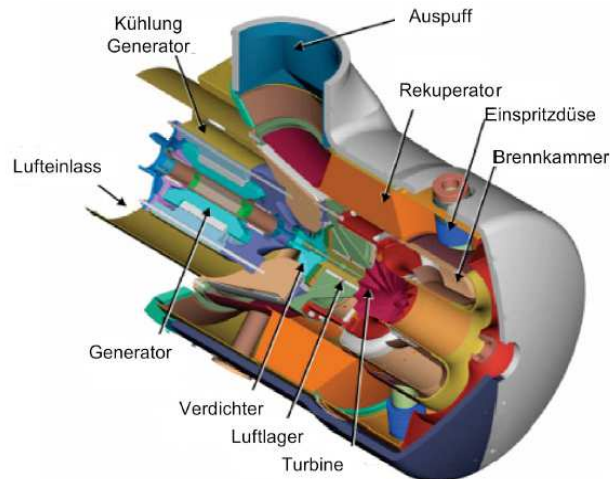


Abbildung 13: Aufbau einer Mikrogasturbine

Quelle: VTA Engineering und Umwelttechnik GmbH, 09.10.09

Alle sich drehenden Bestandteile (der Verdichter, die Turbine und der Generator) der Mikrogasturbine liegen auf einer Welle. Diese Welle ist luftgelagert, somit werden keine Kühl- und Schmierflüssigkeiten benötigt. Dadurch reduzieren sich der Wartungsaufwand und der Platzbedarf erheblich. Die von der Firma Capstone garantierte Lebensdauer beträgt 80.000 Betriebsstunden.¹¹

Die Besonderheiten der Mikrogasturbine sind:¹⁵

- ✓ Verdichter-Turbine-Einheit (Getriebe meistens nicht notwendig)
- ✓ Rekuperator, der den eintretenden Luftstrom durch die heißen Abgase vorwärmt
- ✓ Luftlagertechnik
- ✓ geringe Druckverhältnisse
- ✓ Hochgeschwindigkeitsgeneratoren mit Permanentmagneten

¹¹ VTA Engineering und Umwelttechnik GmbH, 09.10.2009

¹⁵ DI G. Simader, DI H. Ritter, DI G. Benke, DI H. Pinter: Bericht Micro-KWK, 2004

2.4.3 Funktion

Abbildung 14 zeigt das Funktionsprinzip einer Mikrogasturbine anhand eines Schaltbildes.⁵

- 1-2: Verdichtung
- 2-3: Vorwärmung
- 3-4: Verbrennung
- 4-5: Expansion
- 5-6: Abkühlung

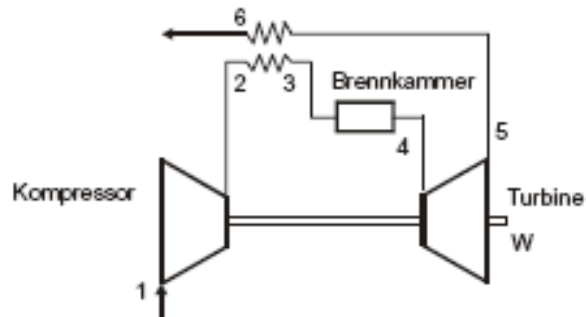


Abbildung 14: Schaltbild Mikrogasturbine

Quelle: Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

Die Verbrennungsluft fließt beim Eintritt am Generator vorbei, wodurch dieser gekühlt wird. Anschließend wird sie verdichtet, da der erforderliche Druck in der Brennkammer zwischen 4 und 6 bar liegt (1-2). Dann tritt die Luft in den Rekuperator ein, in dem sie durch die heißen Abgase vorgewärmt wird (2-3). In der Brennkammer wird der Brennstoff mit der Verbrennungsluft gemischt und verbrannt (3-4). In der Turbine wird das Verbrennungsgas entspannt, wodurch die Welle mit ihren Komponenten angetrieben wird. (4-5). Die noch heißen Abgase wärmen im Rekuperator die Verbrennungsluft vor und verlassen danach die Mikrogasturbine (5-6).



Abbildung 15: Gaskühler der Mikrogasturbine

Quelle: Bala

⁵ Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

In Abbildung 16 wird der Verlauf des Luftstromes dargestellt.

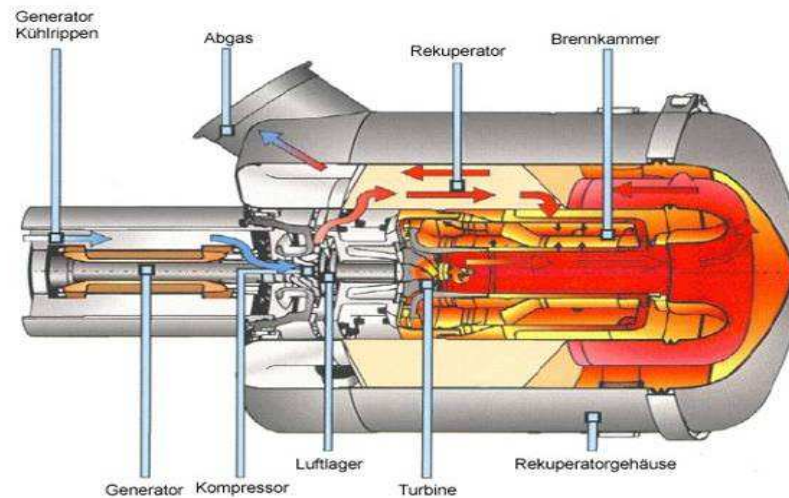


Abbildung 16: Luftweg in der Mikrogasturbine

Quelle: VTA Engineering und Umwelttechnik GmbH, 09.10.09

Mithilfe der Rekuperatortechnik können Wirkungsgrade von 25 % bis 33 % erzielt werden. Durch die Vorwärmung der Luft wird in der Brennkammer weniger Brennstoff zum Erreichen der Betriebstemperatur benötigt. Daher sind höhere elektrische Wirkungsgrade erreichbar.

Der sich auf der Welle befindende Permanentmagnet erzeugt einen hochfrequenten Wechselstrom. Im Gegensatz zu Industriegasturbinen erfolgt die Leistungsregelung über die Drehzahl. Der hochfrequente Wechselstrom wird in der Mikrogasturbine über die Leistungselektronik gleichgerichtet und anschließend auf 50 Hz umgewandelt.¹¹

2.4.4 Hersteller

Da die Mikrogasturbine eine neue Technologie ist, gibt es lediglich zwei wichtige Hersteller:

- ✓ Der unumstrittene Weltmarktführer ist die Firma Capstone in den USA.
- ✓ Der zweitwichtigste Hersteller dieser Geräte ist die Firma Turbec in Italien.

¹¹ VTA Engineering und Umwelttechnik GmbH, 09.10.2009

2.5 Abgasemissionen

Durch die Verbrennung von Biogas entstehen hauptsächlich Kohlendioxid, Wasserdampf und Sauerstoff. Weitere Nebenprodukte sind unter anderem Kohlenmonoxid, Stickoxide, Schwefeldioxid, Formaldehyd und Kohlenwasserstoffe.⁹

Um die gesetzlich festgelegten Grenzwerte nicht zu überschreiten, werden die Blockheizkraftwerke üblicherweise im Magermodus betrieben. Dies bedeutet, dass Gasmotoren mit einem hohen Luftüberschuss betrieben werden.

In Abbildung 17 werden die Emissionsverläufe von Kohlenmonoxid, den Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen bei verschiedenen Lambda-Werten dargestellt.

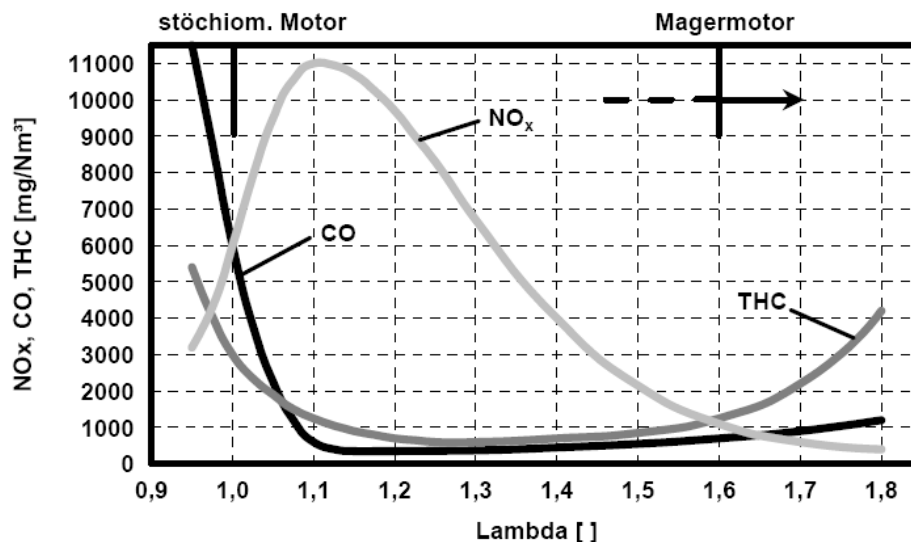


Abbildung 17: Typische Emissionsverläufe

Quelle: Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

Dabei kann man erkennen, dass sich die Emissionen mit ansteigendem Lambda verringern und ein Optimum zwischen 1,2 und 1,6 erreichen. Die Abbildung zeigt auch, dass sich die Stickoxidemissionen sehr stark reduzieren, je höher der Lambda-Wert ist. Daher werden Gasmotoren meist in diesem Bereich betrieben.⁵

⁵ Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

⁹ Eder, Schulz: Biogas Praxis, 2006

2.5.1 Emissionsgrenzwerte in Deutschland

Die gesetzlich festgelegten Grenzwerte für Deutschland sind in der Technischen Anleitung (TA)-Luft festgehalten und werden in Tabelle 4 aufgelistet.¹⁶

Emissionsgrenzwerte für Blockheizkraftwerke nach der TA-Luft

Luftschadstoff	Emissionsgrenzwerte [mg m ⁻³]				
	Gasottomotor		Zündstrahlmotor		MGT
	< 3 MW	> 3 MW	< 3 MW	> 3 MW	< 350 kW
CO	1000	650	2000	650	100
NO _x	400	500	1000	500	150
SO ₂	350	350	350	350	-
Gesamtstaub	20	20	20	20	-
Formaldehyd	60	20	60	60	-

Tabelle 4: Emissionsgrenzwerte BHKW

Quelle: BMU: TA-Luft, 2002

Wie man der Tabelle entnehmen kann, sind für Blockheizkraftwerke kleiner 3 MW und größer 3 MW Wärmeleistung unterschiedliche Emissionsgrenzwerte festgelegt. Blockheizkraftwerke mit einer Gesamtfeuerungswärmeleistung von über 1 MW müssen diese Grenzwerte verbindlich einhalten, für kleinere Anlagenleistungen werden diese als Richtwerte herangezogen.

Für die Mikrogasturbine sind eigene Emissionsgrenzwerte in der TA-Luft festgehalten. Diese sind deutlich niedriger als die der anderen Blockheizkraftwerkstypen, jedoch sind hier nur 2 Parameter von Bedeutung, nämlich Kohlenmonoxid und die Stickoxide.¹⁶

¹⁶ BMU: TA-Luft, 2002

2.5.2 Emissionsgrenzwerte in Österreich

Im Gegensatz zu Deutschland gibt es in Österreich keine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Blockheizkraftwerktypen. Hier zählt einzig und allein die Leistung des Blockheizkraftwerkes.

In Tabelle 5 werden die Emissionsgrenzwerte für die in Österreich betriebenen Stationärmotoren aufgelistet.¹⁷

Luftschadstoff	Emissionsgrenzwerte [mg m ⁻³]	
	< 250 kW BWL	≥ 250 kW BWL
	(< 100 kW _{mech.})	(≥ 100 kW _{mech.})
NO _x	-	400
CO	650	650
NMHC (Nicht-Methan-KW)	-	150
H ₂ S	-	5

Tabelle 5: Österreichische Emissionsgrenzwerte für Stationärmotoren

Quelle: BMWA: Beurteilung-Biogasanlagen, 2003

Da Blockheizkraftwerke mit Diesel-Zündstrahlmotor diese Abgasgrenzwerte deutlich überschreiten, findet diese Technologie in Österreich keine Anwendung. Somit werden ausschließlich Gas-Ottomotoren bzw. Mikrogasturbinen eingesetzt.

Ein Beispiel: In Deutschland dürfen Dieselmotoren mit einer maximalen Stickoxidemission von 1.000 mg/m³ in Betrieb genommen werden. Der österreichische Emissionsgrenzwert von Stickoxiden liegt bei 400 mg/m³. Somit ist es in Deutschland möglich, zweieinhalb Mal so viele Stickoxide als in Österreich zu emittieren!

¹⁷ BMWA: Beurteilung-Biogasanlagen, 2003

3 Vergleich Gasmotor – Mikrogasturbine

In diesem Abschnitt findet der technische und wirtschaftliche Vergleich zwischen dem Gasmotor und der Mikrogasturbine statt. Als Basis dafür diente je ein Angebot der Firma IET Service GmbH für einen MAN-Gasmotor mit 250 kW_{el} sowie der Firma Wels Strom GmbH für eine Mikrogasturbine der Firma Capstone mit 200 kW_{el}.

3.1 Technischer Vergleich

3.1.1 Motor-Abmessungen

	Gasmotor	Mikrogasturbine
Abmessungen [m]	3,8 x 1,8 x 2,2	3,7 x 1,7 x 2,5

Tabelle 6: Abmessungen

Die Abmessungen der beiden Blockheizkraftwerke, die in Tabelle 6 dargestellt sind, sind fast ident. Der errechnete Volumensunterschied beträgt lediglich 0,7 m³ (der Gasmotor weist 15,0 m³ und die Mikrogasturbine 15,7 m³ auf).

3.1.2 BHKW-Fläche

Analog zu den Abmessungen gibt es auch bei der Fläche keinen großen Unterschied. Der Gasmotor benötigt mit seinen 6,84 m² geringfügig mehr Platz als die Mikrogasturbine mit ihren 6,29 m². Dies entspricht einem Unterschied von 8 %.

3.1.3 Gesamtfläche

Während der Gasmotor mit all seinen zusätzlich benötigten Komponenten in einen Container integrierbar ist, benötigt die Druckerhöhung und die Gaskühlung der Mikrogasturbine mehr Platz. Durch die starke Wärmeentwicklung bei der Druckerhöhung muss diese getrennt von der Mikrogasturbine ausgeführt werden, während dies beim Gasmotor problemlos möglich ist.

3.1.4 Gewicht

Im Gegensatz zu den 4.850 kg des Gasmotors besitzt die Mikrogasturbine mit ihren 2.775 kg ein um 43 % geringeres Gewicht.

3.1.5 Aufstellungsart

Der Aufstellungsvergleich ergab, dass der Gasmotor in geschlossenen Räumen betrieben werden muss, um sowohl die Witterungseinflüsse (Temperaturunterschiede, Feuchtigkeit, Verschmutzung, usw.) als auch Anrainerbeschwerden, die lärmbedingt auftreten könnten, zu vermeiden. Auf die Schallemissionen wird im Punkt 3.1.22 näher eingegangen. Die Mikrogasturbine sollte nicht in Räumen aufgestellt werden, sondern muss frei oder überdacht betrieben werden. Die Gründe liegen in der Temperatur und deren negativen Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad und dem Verbrennungsluftbedarf. Auf diese beiden Kennzahlen wird in den Punkten 3.1.11 und 3.1.17 genauer eingegangen.

3.1.6 Gemischkühler

Beim Gasmotor ist ein Gemischkühler eingebaut, der das durch die Komprimierung erwärmte Luft-Brennstoff-Gemisch wieder auf Betriebstemperatur abkühlt. Die Mikrogasturbine beinhaltet keinen Gemischkühler, weil das Luft-Gas-Gemisch direkt in der Ringbrennkammer zusammengemischt wird.

3.1.7 Notkühler

Im Gegensatz zur Mikrogasturbine benötigt der Gasmotor für seinen Betrieb einen Notkühler, um überschüssige Motorabwärme vernichten zu können. Die Mikrogasturbine braucht diesen nicht, da die gesamte Wärme über die Abgastemperatur abgeführt werden kann.

3.1.8 Vordruck am Gaseintritt

Der Vordruck am Gaseintritt ist jener Druck, der unmittelbar vor der Brennkammer herrscht. Dieser beträgt beim Gasmotor etwa 100 mbar, da der Zylinder den Druck durch seine Gaskomprimierung erhöht. In der Mikrogasturbine wird das Gas-Luftgemisch auf etwa 5,2 bar verdichtet. Verglichen mit dem der Mikrogasturbine benötigt der Gasmotor lediglich einen Vordruck von 2 %, was sich auch auf den Eigenstrombedarf auswirkt.

3.1.9 Elektrischer Wirkungsgrad

Der elektrische Wirkungsgrad ist das Verhältnis von elektrischer Leistung zur zugeführten Leistung.

$$\eta_{el} = \frac{\text{elektrische Leistung [kW]}}{\text{zugeführte Leistung [kW]}}$$

Beim Gasmotor beträgt er 38,82 %, bei der Mikrogasturbine 33 %. Dies bedeutet, dass der Gasmotor einen um 15 % höheren Wirkungsgrad aufweist, welcher sich linear auf die benötigte Gasmenge auswirkt. Bei dieser Wirkungsgradbetrachtung wurde der interne Energiebedarf für Vorverdichtung und andere benötigte Aggregate nicht abgezogen. Die Auswirkungen der Blockheizkraftwerkbetriebsweise sind beim Gesamtwirkungsgrad unter dem Punkt 3.1.11 näher beschrieben.

In Abbildung 18 wird der Einfluss der Temperatur auf den elektrischen Wirkungsgrad dargestellt.¹⁸

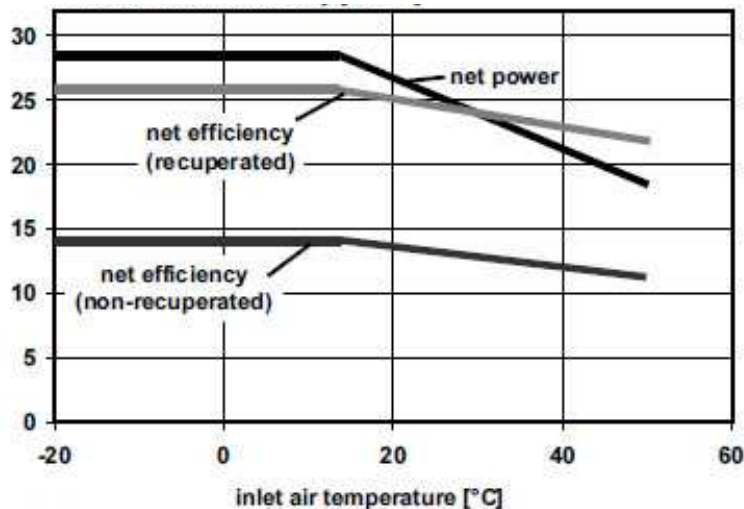


Abbildung 18: Einfluss der Temperatur auf den elektrischen Wirkungsgrad

Quelle: Dr. Herdin, G. R.: *Stand der BHKW-Technik*

Aus der Abbildung kann man ableiten, dass der elektrische Wirkungsgrad der Mikrogasturbine bei Lufttemperaturen von -20 °C bis ca. 15 °C konstant bleibt. Über 15 °C sinkt er bei einem Temperaturanstieg von je 10 °C um ca. $2\text{--}3\text{ ‰}_{el}$.¹⁸

¹⁸ Dr. Herdin, G. R.: *Stand der BHKW-Technik*

3.1.10 Thermischer Wirkungsgrad

Der thermische Wirkungsgrad ist das Verhältnis von thermischer Leistung zu zugeführter Leistung. Je höher der elektrische Wirkungsgrad ist, desto geringer wird der thermische Wirkungsgrad, da die sonstigen Verluste gleich bleiben.

$$\eta_{th} = \frac{\text{thermische Leistung [kW]}}{\text{zugeführte Leistung [kW]}}$$

Dieser beläuft sich beim Gasmotor auf 47,36 %, bei der Mikrogasturbine beträgt er 48,76 %. Eigentlich wäre zu erwarten, dass die Mikrogasturbine einen höheren thermischen Wirkungsgrad aufweist, da sie verglichen zum Gasmotor einen geringeren elektrischen Wirkungsgrad hat. Jedoch ergab der Vergleich nur einen geringen Unterschied. Dieser geringe Unterschied lässt sich nur durch einen schlechteren Gesamtwirkungsgrad der Mikrogasturbine erklären.

In Abbildung 18 wird die thermische Leistung des Gasmotors bei verschiedenen Abgastemperaturen dargestellt. Die Mikrogasturbine hat diese Möglichkeit nicht.

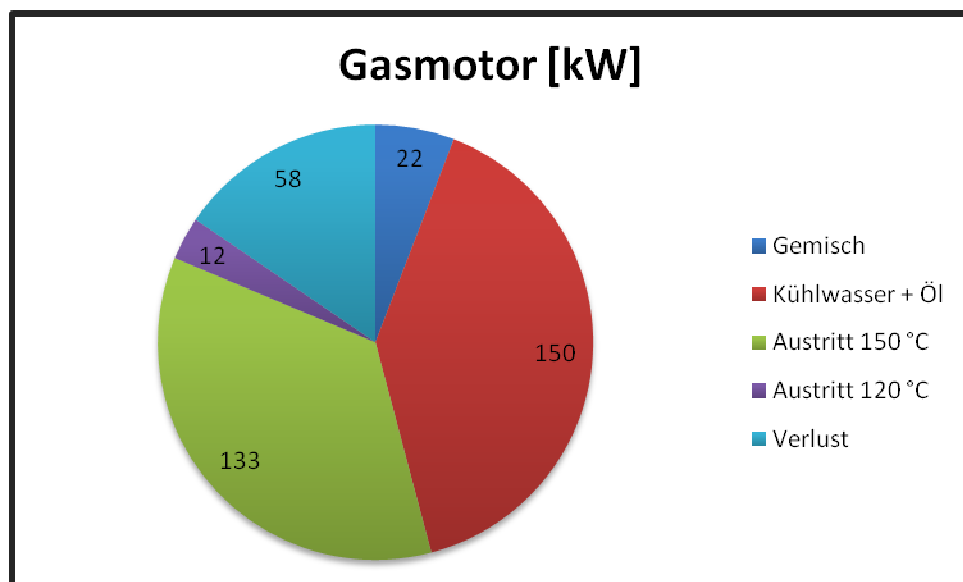


Abbildung 18: thermische Leistung des Gasmotors in kW

3.1.11 Gesamtwirkungsgrad

Der Gesamtwirkungsgrad ist die Summe aus elektrischem und thermischem Wirkungsgrad und wird in Abbildung 19 dargestellt. Beim Gasmotor beträgt er 86,18 %, die Mikrogasturbine weist 81,76 % auf. Dieser Unterschied lässt sich durch die im Punkt 3.1.10 abgeleiteten Abhängigkeiten erklären.

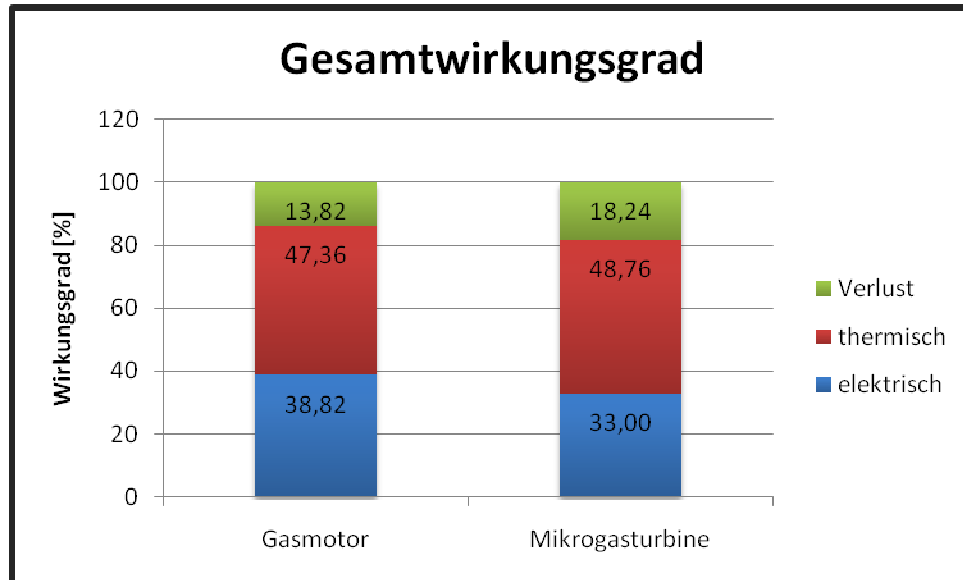


Abbildung 19: Gesamtwirkungsgrad

Der Gesamtwirkungsgrad kann erhöht werden, indem das Abgas weiter abgekühlt wird, wodurch sich der thermische Wirkungsgrad erhöht. Durch eine Abkühlung des Abgases von 150 °C auf 120 °C können 12 kW gewonnen werden, was eine Gesamtwirkungsgraderhöhung um 1,86 % bedeutet.

¹⁸ Dr. Herdin, G. R.: Stand der BHKW-Technik

3.1.12 Teillastverhalten

Oft können Blockheizkraftwerke nicht mit 100 % der Leistung betrieben werden, da nicht genügend Brennstoff bzw. Abnehmer zur Verfügung stehen.

In Abbildung 20 wird der elektrische Wirkungsgrad im Teillastbetrieb dargestellt.

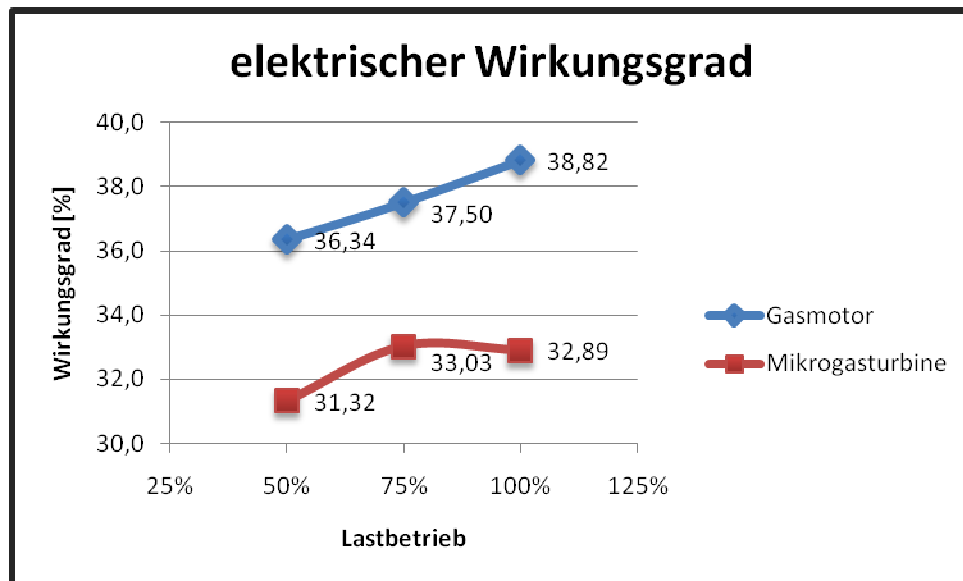


Abbildung 20: elektrischer Wirkungsgrad im Teillastbetrieb

Wie deutlich erkennbar ist, weist der Gasmotor einen relativ linearen Wirkungsgradverlauf auf, während sich der Mikrogasturbinen-Verlauf nichtlinear verhält. Bei 75 % Vollastbetrieb hat der Gasmotor einen elektrischen Wirkungsgradverlust von 1,32 %, während die Mikrogasturbine bei 75 % Last keinen Verlust aufweist. Bei einem Vollastbetrieb von 50 % beträgt der Unterschied beim Gasmotor 2,48 %, bei der Mikrogasturbine beläuft er sich auf 1,57 %.

3.1.13 Mindestgasqualität

Für einen stabilen Betrieb benötigt der Gasmotor eine Mindestgasqualität von 4 kWh pro Nm³. Im Vergleich dazu kann die Mikrogasturbine eine minimale Gasqualität 3 kWh pro Nm³ verwerten. Die Auslegung des Gasmotors erfolgte auf Basis eines Mindestheizwertes von 6 kWh pro Nm³ (dies entspricht einem Methangehalt von 60 %), während das Einsatzgebiet der Mikrogasturbine im Bereich der Schwachgase (3–6 kWh pro Nm³) liegt.

3.1.14 Spezifischer Kraftstoffverbrauch

Der verglichene Gasmotor benötigt eine Rohenergie von 2,48 kWh pro erzeugter elektrischer kWh. In Gegensatz dazu benötigt die Mikrogasturbine 3,03 kWh. Dieser Unterschied von 18,16 % ist durch den elektrischen Wirkungsgrad bedingt.

3.1.15 Füllmenge Öl

Der Betrieb eines Gasmotors erfordert immer den Einsatz von Mineralöl zur Schmierung des Kolbens, da dieser ansonsten aufgrund der Reibung „verreibt“. Der Gasmotor hat eine Füllmenge von 70 Liter Mineralöl. Bei der Mikrogasturbine kann auf die Ölschmierung verzichtet werden, da die Welle luftgelagert ist, was sich erheblich auf den Wartungsaufwand und somit auf die Wartungskosten auswirkt. Dies wird im Punkt 3.2.4 näher erläutert.

3.1.16 Schmierölverbrauch

Der spezifische Schmierölverbrauch beläuft sich beim Gasmotor auf 0,5 g pro kWh, dies entspricht einem Stundenverbrauch von 3 g pro Stunde bzw. ca. 26 kg pro Jahr. Da die Mikrogasturbine kein Schmieröl benötigt, fällt kein Verbrauch an.

3.1.17 Benötigte Verbrennungsluftmenge

Für die Verbrennung wird eine bestimmte Luftmenge benötigt, die sich aus dem Lambda-Wert errechnen lässt. Der Gasmotor hat einen stündlichen Luftbedarf von 912 Nm³, was eine Luftmenge von 3,65 Nm³ pro kWh bedeutet. Die Mikrogasturbine hingegen benötigt 4.418 Nm³ pro Stunde, was einer Luftmenge von 22,09 Nm³ pro kWh entspricht. Somit benötigt die Mikrogasturbine pro erzeugter elektrischer kWh fast fünfmal mehr Verbrennungsluft (+ 484 %).

3.1.18 Abgasemissionen und Abgasmassenstrom

Der Vergleich der Abgasemissionen ergab, dass der Gasmotor im Gegensatz zur Mikrogasturbine hohe Abgasemissionen aufweist. Diese Emissionen sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Abgasemissionen [mg m^{-3}]	Gasmotor	Mikrogasturbine
CO	650	50
NO _x	250	18

Abgasemissionen [g h^{-1}]	Gasmotor	Mikrogasturbine
CO	665	181
NO _x	256	65

Tabelle 7: Abgasemissionen

Abbildung 21 ist die grafische Darstellung der Abgasemissionen in g/h.

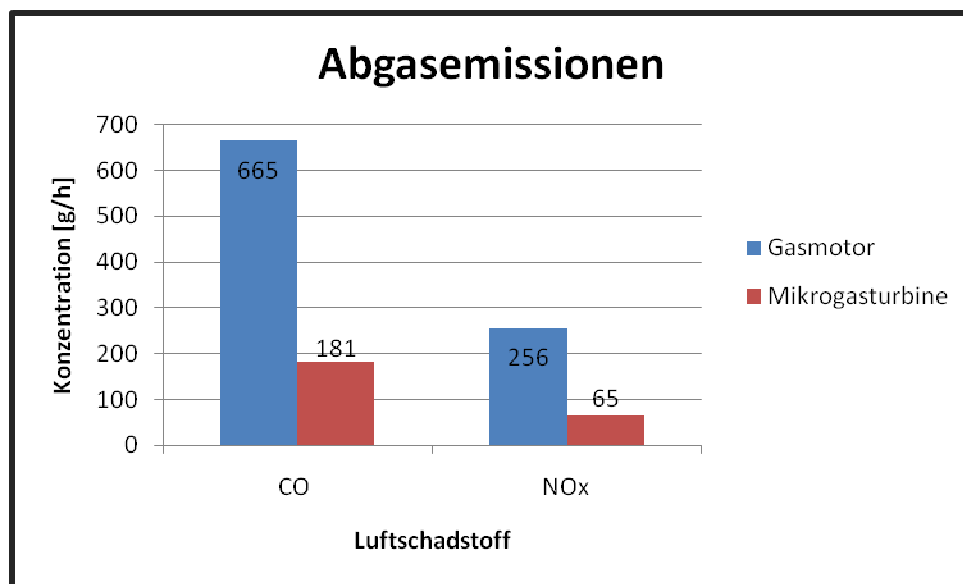


Abbildung 21: Abgasemissionen CO und NO_x

Wie deutlich erkennbar ist, liegen die Abgaswerte des Gasmotors erheblich über denen der Mikrogasturbine. Die CO-Emission liegt um + 367 %, die NO_x-Werte sind um + 394 % über den Werten der Mikrogasturbine.

3.1.19 Abgasmassenstrom

In Abbildung 22 wird der Abgasmassenstrom von Gasmotor und Mikrogasturbine dargestellt.

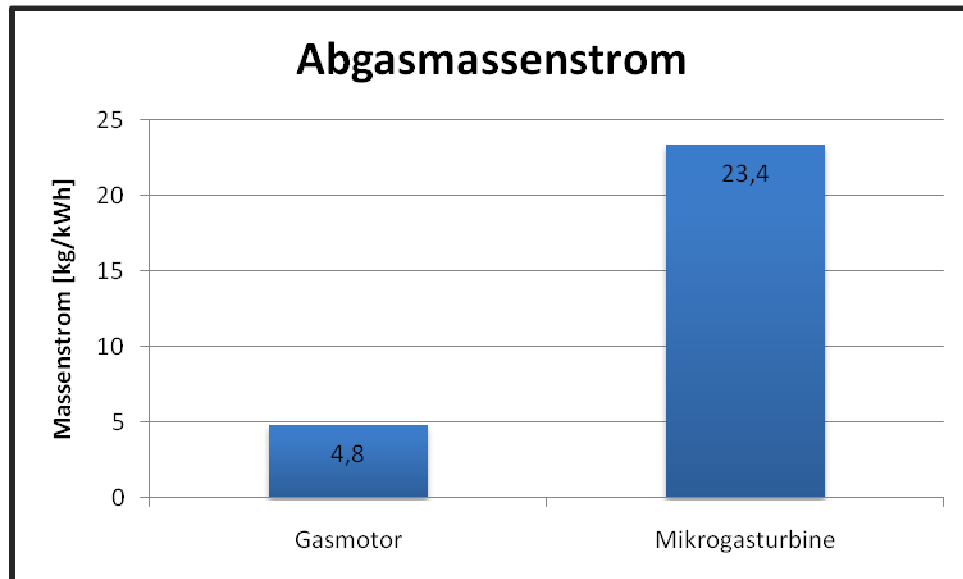


Abbildung 22: Abgasmassenstrom in kg/kWh_{el}

Der Gasmotor emittiert einen trockenen Abgasmassenstrom von 1.206 kg pro Stunde (4,8 kg pro kWh). Im Vergleich dazu beläuft sich der Abgasmassenstrom der Mikrogasturbine trotz geringerer elektrischer Leistung auf 4.680 kg pro Stunde (pro kWh etwa 23,4 kg). Somit hat die Mikrogasturbine, verglichen mit dem Gasmotor, einen fast fünfmal höheren Abgasmassenstrom (+ 488 %), was sich durch den hohen Verbrennungsluftbedarf (+ 484 %, siehe Punkt 3.1.17) erklären lässt.

3.1.20 Warmwasserkreislauf

Der Vergleich des Warmwasserkreislaufes ergab, dass der Gasmotor mit einer Vorlauf/Rücklauf-Temperatur von 90/70 betrieben wird, während bei der Mikrogasturbine ein Wärmeniveau 80/60 üblich ist.⁵ Der Grund dafür sind vor allem die unterschiedlichen Abgastemperaturen (siehe 3.1.21). Dies ist vor allem für die Fernwärmenutzung limitierend, da dafür Temperaturen von 85–95 °C erreicht werden müssen.

3.1.21 Abgastemperatur

Im Abgas sind beim Gasmotor ca. 50 % und bei der Mikrogasturbine 100 % der thermisch nutzbaren Energie enthalten. Die Differenz zwischen Abgaseintritts- und Abgasaustrittstemperatur wird mithilfe eines Wärmetauschers in nutzbare Wärmeenergie umgewandelt. In Abbildung 23 werden die Abgastemperaturen der beiden Blockheizkraftwerke dargestellt. Wie deutlich erkennbar ist, beträgt die im Abgas enthaltene Restwärme etwa ein Drittel der ursprünglichen Wärme.

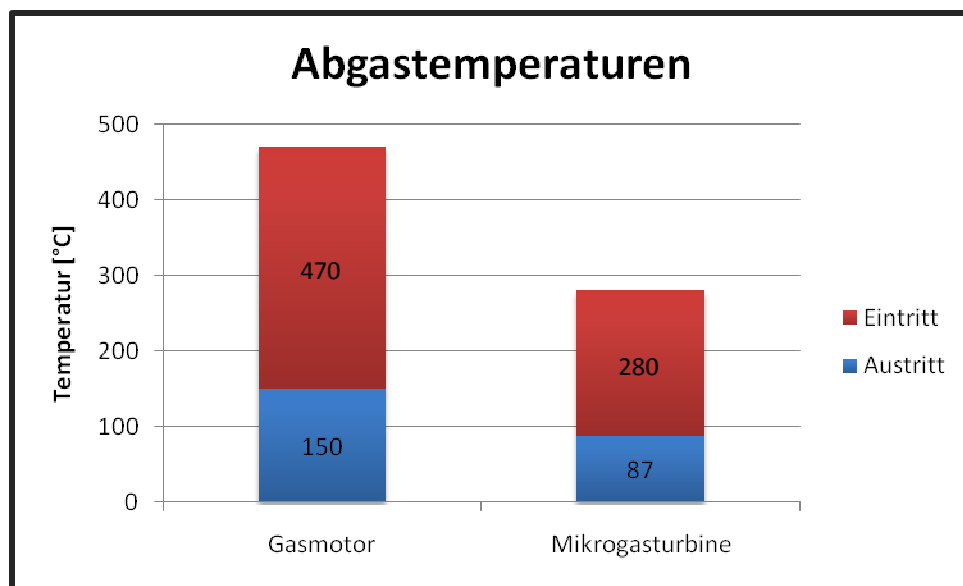


Abbildung 23: Abgastemperaturen

3.1.22 Schallemissionen

Der Vergleich der Schallemissionen ergab, dass die Betriebslautstärke des Gasmotors mit 98 dB weit höher liegt als die der Mikrogasturbine mit 75 dB. Dies trifft aber nur bei frei aufgestellten Blockheizkraftwerken zu. Durch die Aufstellung im Gebäude werden die Schallemissionen um mindestens 25 dB reduziert, da ein innen aufgestellter Gasmotor besser schalldämmt werden kann.

3.1.23 Erfahrung mit Biogas

Die Gasmotor-Technologie verfügt mit mehr als 10 Jahren über eine längere Betriebserfahrungen als die Mikrogasturbine. Sie wird erst seit etwa 5 Jahren im Bereich Klärgas eingesetzt, bei Biogas liegen praktisch keine Betriebserfahrungen vor.

⁵ Dr. Herdin, G.: Gasmotoren-Analyse

3.2 Wirtschaftlicher Vergleich

3.2.1 Anschaffungskosten Blockheizkraftwerk

Der Vergleich der beiden Angebote ergab, dass sich der Gasmotor und die Mikrogasturbine enorm in ihren Anschaffungskosten unterscheiden. Die anfallenden Kosten sind in Tabelle 8 aufgelistet.

	Gasmotor	Mikrogasturbine
Anschaffungskosten BHKW [€]	120.000	171.800
Gesamtinvestitionskosten [€]	198.820	335.219
Gesamtinvestitionskosten pro kW [€ kW ⁻¹]	795	1.676

Tabelle 8: Investitionskosten

In Abbildung 24 werden die Blockheizkraftwerk-Anschaffungskosten einander gegenübergestellt.

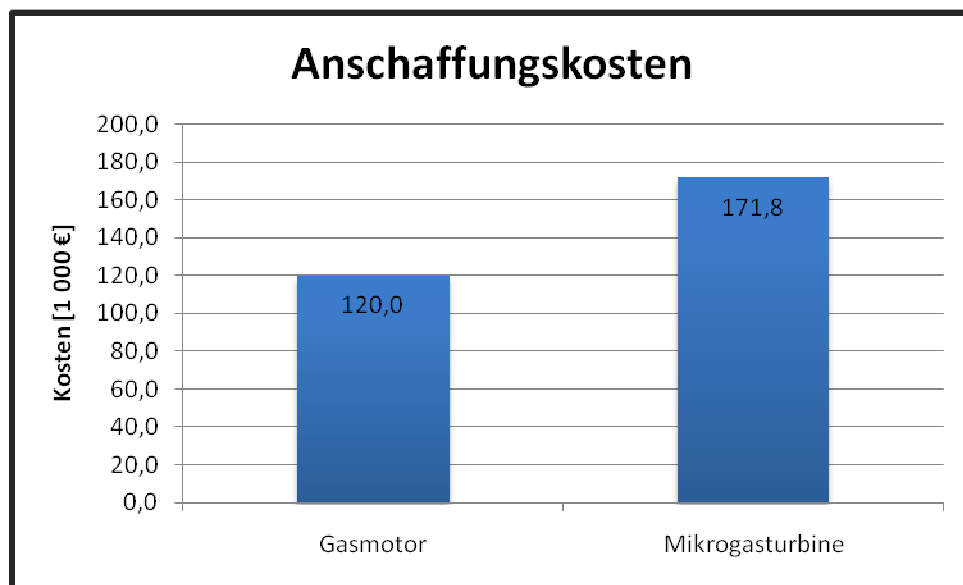


Abbildung 24: Anschaffungskosten

Während sich die Anschaffungskosten der Mikrogasturbine auf € 171.800 belaufen, ist der Gasmotor mit € 120.000 um ca. 30 % günstiger.

3.2.2 Gesamtinvestitionskosten

Abbildung 25 ist die Gegenüberstellung der gesamten Investitionskosten inkl. Transport, Aufstellung und Inbetriebnahme.

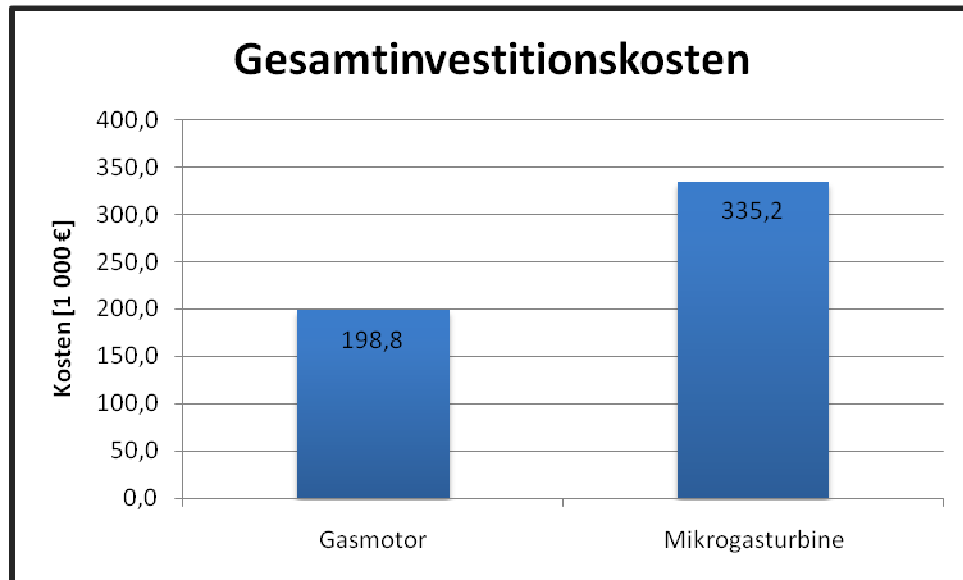


Abbildung 25: Gesamtinvestitionskosten

Auch hier ergeben sich enorme Unterschiede. Während sich für den Gasmotor Gesamtkosten von € 198.800 ergeben, kostet die Mikrogasturbine € 335.219. Somit ist sie insgesamt um 40,7 % teurer als der Gasmotor. Pro Kilowatt elektrischer Leistung fallen beim Gasmotor mit € 795 um 47,45 % geringere Investitionskosten als bei der Mikrogasturbine mit € 1.676. Dies wird in Abbildung 26 dargestellt.

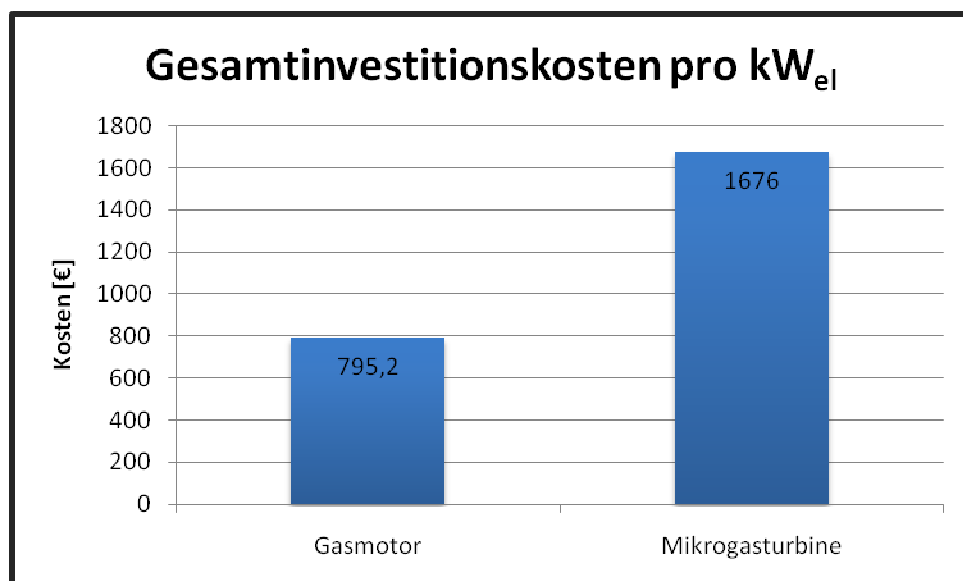


Abbildung 26: Gesamtinvestitionskosten pro kW_{el}

3.2.3 Wartungsintervalle

Der Vergleich der beiden Blockheizkraftwerke in Hinblick auf die Wartungsintervalle ergab keinen Unterschied. Laut den Angeboten wird sowohl der Gasmotor als auch die Mikrogasturbine nach 8.000 Betriebsstunden gewartet.

3.2.4 Vollwartungskosten

In Tabelle 9 werden die Vollwartungskosten pro Betriebsstunde aufgelistet. Dies beinhaltet die Anreise- und Arbeitskosten des Servicearbeiters sowie die Ersatzteilkosten.

	Gasmotor	Mikrogasturbine
Vollwartungskosten [€ h^{-1}]	1,82	0,89

Tabelle 9: Wartungskosten

Diese Kosten werden in Abbildung 27 grafisch dargestellt.

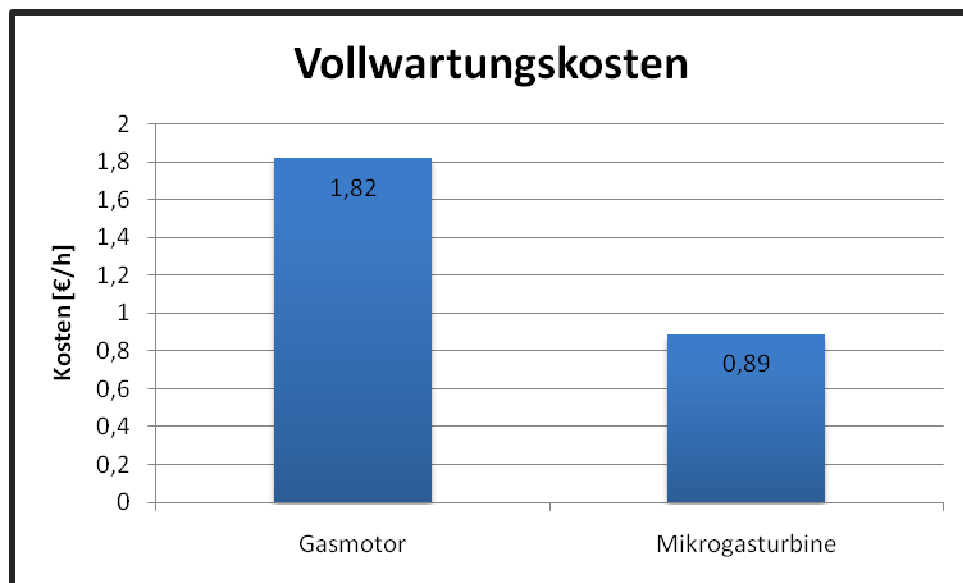


Abbildung 27: Vollwartungskosten

Wie man der Abbildung entnehmen kann, ergab der Vergleich einen großen Unterschied. Während der Gasmotor mit € 1,82 pro Betriebsstunde hohe Kosten verursacht, ist die Mikrogasturbine mit € 0,89 um 51,1 % günstiger. Dieser Kostenvorteil spricht eindeutig für die Mikrogasturbine.

3.3 Zusammenfassung

Tabelle 10 ist eine Zusammenfassung über den technisch-wirtschaftlichen Vergleich.

Vergleich Gasmotor – Mikrogasturbine		
Technisch	Gasmotor	Mikrogasturbine
Abmessungen [m]	3,8 x 1,8 x 2,2	3,7 x 1,7 x 2,5
BHKW-Fläche [m ²]	6,84	6,29
Gewicht [kg]	4.850	2.775
Aufstellungsart	innen	außen
Gemischkühler, Notkühler	ja	nein
Vordruck am Gaseintritt [mbar]	100	5.170
elektrischer Wirkungsgrad [%]	38,82	33,00
thermischer Wirkungsgrad [%]	47,36	48,76
Gesamtwirkungsgrad BHKW [%]	86,18	81,76
Mindestgasqualität [kWh Nm ⁻³]	6	3-6
spez. Kraftstoffverbrauch [kWh kWh ⁻¹]	2,48	3,03
Füllmenge Öl [l]	70	0
Schmierölverbrauch [g kWh ⁻¹]	0,5	0
benötigte Luftmenge [Nm ³ h ⁻¹]	912	4.418
Abgasemissionen CO [mg h ⁻¹]	665	181
Abgasemissionen NO _x [mg h ⁻¹]	256	65
Abgasmassenstrom trocken [kg h ⁻¹]	1.206	4.680
Abgastemperaturen WT [°C]	470/150	280/87
Schallemissionen [dB]	98,6	75
Warmwasserkreislauf [°C]	90/70	80/60
Erfahrungen mit Biogas	> 10 Jahre	< 5 Jahre
Wirtschaftlich		
Anschaffungskosten BHKW	120.000	171.800
Gesamtinvestitionskosten [€]	198.820	335.219
Gesamtinvestitionskosten pro kW [€ kW ⁻¹]	795	1.676
Wartungsintervalle [h]	8.000	8.000
Vollwartungskosten [€ h ⁻¹]	1,82	0,89

Tabelle 10: Vergleich Gasmotor – Mikrogasturbine

3.4 Stärken-Schwächen-Katalog

In Tabelle 11 wird ein Stärken-Schwächen-Katalog dargestellt. Diesem liegen die Ergebnisse des Gasmotor-Mikrogasturbine-Vergleiches zugrunde.

Stärken-Schwächen-Katalog	
Gasmotor	Mikrogasturbine
Vorteile	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ höherer elektrischer Wirkungsgrad ✓ niedriger Vordruck ✓ hohe Verbrennungstemperatur ✓ unempfindlicher gegenüber: <ul style="list-style-type: none"> – Temperaturänderungen – Druckänderungen ✓ niedrigere Investitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ lange Lebensdauer ✓ Schwachgasbetrieb möglich ✓ niedrige Mindestqualität ✓ unempfindlicher gegenüber H₂S ✓ sehr geringe Abgasemissionen ✓ geringere Schallemissionen ✓ geringere Betriebskosten ✓ geringere Wartungskosten ✓ keine Schmiermittel
Nachteile	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ hohe Mindestgasqualität ✓ höhere Betriebskosten ✓ höhere Wartungskosten ✓ Schmiermittelbedarf ✓ höhere Abgasemissionen ✓ hohe Schallemissionen 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ niedriger elektrische Wirkungsgrad ✓ hoher Druck ✓ niedrige Verbrennungstemperatur ✓ hohe Investitionskosten ✓ höherer Gasverbrauch

Tabelle 11: Stärken-Schwächen-Katalog

Prinzipiell kann nicht zu 100 % festgelegt werden, wann welches Blockheizkraftwerk eingesetzt werden soll, da jede Maschine spezifische Vor- und Nachteile besitzt. Für die richtige Wahl müssen die Mindestanforderungen für das entsprechende Einsatzgebiet abgedeckt sein. Danach wird zwischen den Vor- und Nachteilen ein Kompromiss geschlossen und das lukrativste Blockheizkraftwerk in Betrieb genommen.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Großteil der heute betriebenen Biogasanlagen verwendet den Gasmotor, während die Mikrogasturbinen-Technologie noch relativ neu ist. Diese beiden Arten von Blockheizkraftwerken wurden miteinander verglichen und es ergaben sich folgende Ergebnisse:

- ✓ Die Vorteile der Mikrogasturbine liegen neben den geringen laufenden Betriebs- und Wartungskosten in der langen Lebensdauer und den sehr geringen Abgasemissionen. Auch der Einsatz bei Schwachgasen sowie ihre Unempfindlichkeit gegenüber Gasschwankungen und H_2S sprechen für sie. Für ihren Betrieb benötigt sie keine Schmiermittel, jedoch werden all diese Vorteile durch den niedrigeren elektrischen Wirkungsgrad, den höheren Gasverbrauch und die relativ hohen Investitionskosten abgeschwächt.
- ✓ Beim Gasmotor liegen die Vorteile im höheren elektrischen Wirkungsgrad sowie seiner Unempfindlichkeit gegenüber Temperatur- und Druckschwankungen. Weitere Vorteile sind der niedrige Vordruck, die hohen Betriebstemperaturen und die relativ niedrigen Investitionskosten. Die hohen Betriebs- und Wartungskosten, der Schmiermittelbedarf und die höheren Schall- und Abgasemissionen sind jedoch zu beachtende Nachteile.

Bei der Biogasanlagenplanung wird die Mikrogasturbine zukünftig eine gute Alternative zum Gasmotor werden, wenn das Auswahlkriterium nicht nur der elektrische Wirkungsgrad ist. Sie wird vielseitig eingesetzt werden, da sie im Gegensatz zum Gasmotor die Möglichkeit zum Schwachgasbetrieb besitzt.

5 LITERATUR

Linke, B.: Biogas. Internet: www.atb-potsdam.de/hauptseite-deutsch/ATB-Schriften/Sonstige/Kap_1_bis_3.pdf

Firma GE Jenbacher: Gaszusammensetzung und Wasseranteil.pdf, Quelle: Bala

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2009): Biogas – eine Einführung (6. Auflage). Internet: www.fnr.de

Dr. Herdin, G. R.: Gasmotoren Grundlagen, Internet: http://vkm-thd.tugraz.at/lehre/herdin08/Gasmotoren_Herdin_Status_08.pdf

Dr. Herdin, G. R.: Standesanalyse des Gasmotors im Vergleich zu den Zukunftstechniken. Internet: images.energieportal24.de/dateien/downloads/gasmotoren-analyse.pdf

Krautkremer, B.: Anforderungen an die Qualität von Biogas beim Einsatz von Mikrogasturbinen. Internet: www.fnr-server.de/ftp/pdf/GF_21_Biogas/Krautkremer.pdf

DI Fröhlich, F. (2005): Blockheizkraftwerke für Biogasanlagen. Quelle: Bala

Firma GE Jenbacher: Kraft-Wärme-Kopplung mit Gasmotoren, Quelle: Bala

Eder, B. und Schulz, H. (2006): Biogas Praxis, erweiterte Auflage

Bioenergie Serviceagentur (11.10.09). Internet: gas-bhkw.bioenergie-serviceagentur.de/home.html

VTA Engineering und Umwelttechnik GmbH (09.10.09). Internet: www.vta.cc

Firma GE Jenbacher: Gasmotoren Baureihe 4, Quelle: Bala

Bohl, W. (1998): Strömungsmaschinen 1 Aufbau und Wirkungsweise, 7. Auflage

E-quad Power Systems (09.10.09). Internet: www.microturbine.de

DI Simader, G., DI Ritter, H., DI Benke, G. und DI Pinter, H. (09.10.09): Bericht Micro-KWK. Internet: www.energyagency.at

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2002): TA-Luft. Internet: <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/taluft.pdf>

Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (2003): Technische Grundlage für die Beurteilung von Biogasanlage. Internet: www.biogas-netzeinspeisung.at/downloads/beurteilung-biogasanlagen.pdf

Dr. Herdin, G. R. (2000): Increasing Gas Engine Efficiency. Quelle: Bala

Kaltschmitt, Hartmann, Hofbauer (2009): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Auflage.