

# Gasaufbereitung und Verwertungs- möglichkeiten



Biogas wird hauptsächlich in Verbrennungsmotoren, die einen Generator zur Stromerzeugung antreiben, genutzt. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Biogas in Mikrogasturbinen, Brennstoffzellen und Stirlingmotoren einzusetzen. Auch diese Techniken dienen in erster Linie dazu, das gewonnene Biogas zu verstromen. Eine weitere Nutzungsmöglichkeit besteht in der alleinigen thermischen Nutzung in dafür geeigneten Brennern bzw. Heizkesseln. Auch der Einsatz von Biogas als Treibstoff zum Antrieb von Kraftfahrzeugen oder aber die Einspeisung in das Erdgasnetz sind Nutzungsoptionen. Auf Grund verschiedener Hemmnisse sind die unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten zum heutigen Zeitpunkt nur zum Teil realisierbar. Daher wird der Schwerpunkt dieses Kapitels auf die derzeit fast ausschließliche motorische Nutzung durch Kraft-Wärme-Kopplung zur gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Wärme gelegt.

Die direkte Nutzung des gewonnenen Rohgases ist wegen verschiedener im Gas vorhandener biogasspezifischer Inhaltsstoffe wie z. B. Schwefelwasserstoff in der Regel nicht möglich. Das Biogas wird aus diesem Grund einer Reinigung unterzogen, die als Voraussetzung für die Nutzung betrachtet wird.

## 5.1 Gasaufbereitung

Biogas ist wasserdampfgesättigt und beinhaltet neben Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) u. a. auch Spuren von Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Schwefelwasserstoff ist toxisch und riecht unangenehm nach faulen Eiern. In Verbindung mit dem im Biogas enthaltenen Wasserdampf kommt es zur Schwefelsäurebildung. Die Säuren greifen die zur Verwertung des Biogases verwendeten Motoren sowie vor- und nachgeschaltete Bauteile (Gasleitung, Abgasleitung usw.) an.

Aus diesen Gründen wird bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen normalerweise eine Entschwefelung und Trocknung des gewonnenen Biogases durchgeführt. In Abhängigkeit von den im Biogas enthaltenen Begleitstoffen und von der verwendeten Nutzungstechnologie (z. B. Brennstoffzelle) kann es allerdings notwendig sein, eine weiterreichende Gasaufbereitung durchzuführen. Die Hersteller der BHKW stellen Mindestanforderungen an die Eigenschaften der eingesetzten Brenngase. Dies gilt auch bei der Verwendung von Biogas. Die Brenngaseigenschaften sollten eingehalten werden, um verkürzte Wartungsintervalle oder eine Schädigung der Motoren zu vermeiden. Ein Beispiel für solche Mindesteigenschaften des eingesetzten Brenngases ist in Tabelle 5-1 gegeben.

### 5.1.1 Entschwefelung

Bei der Entschwefelung kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Unterschieden werden kann zwischen biologischen, chemischen und physikalischen Entschwefelungsverfahren.

Neben der Gaszusammensetzung spielt vor allem die Durchströmungsrate des Biogases durch die Entschwefelungseinrichtung eine wesentliche Rolle. Die Durchströmungsrate kann in Abhängigkeit von der Prozessführung erheblich schwanken. Besonders hohe temporäre Biogasfreisetzungsraten und damit verknüpft hohe Durchströmungsraten können nach der Beschickung des Fermenters mit frischem Substrat und während des Betriebes der Rührwerke beobachtet werden. Kurzfristige Durchströmungsraten von 50 % über dem Mittelwert können auftreten. Um eine zuverlässige Entschwefelung zu gewährleisten, ist es notwendig, im Vergleich zum Belastungsdurchschnitt überdimensionierte Entschwefelungsanlagen einzusetzen.

Tabelle 5-1: Mindesteigenschaften für Brenngase, Bezugssauerstoffgehalt 5 % /5-1/

Heizwert (unterer Heizwert)	H <sub>u</sub>	≥ 4 kWh/m <sup>3</sup>
Schwefelgehalt (gesamt) oder H <sub>2</sub> S-Gehalt	S H <sub>2</sub> S	≤ 2,2 g/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ≤ 0,15 Vol.-%
Chlorgehalt (gesamt)	Cl	≤ 100,0 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Fluorgehalt (gesamt)	F	≤ 50,0 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Summe Chlor und Fluor	(Cl + F)	≤ 100,0 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Staub (3 ... 10 µm)		≤ 10,0 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
relative Feuchte (bei tiefster Ansaugluft-Temperatur, d.h. keine Kondensation in Ansaugrohr und Gasregelstrecke)	φ	< 90 %
Fließdruck vor Eintritt in die Gasregelstrecke	p <sub>Gas</sub>	20 ... 100 mbar
Gasdruckschwankungen		< ± 10 % des Einstellwertes
Gastemperatur	T	10 ... 50°C
Kohlenwasserstoffe (> C5)		< 0,4 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Silizium (bei Si > 5 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> Ölanalysen auf Metallgehalte < 15 mg/kg Öl beachten)	Si	< 10,0 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Methanzahl (Biogas MZ ca. 135)	MZ	>135

### 5.1.1.1 Biologische Entschwefelung im Fermenter

Die biologische Entschwefelung wird häufig im Fermenter durchgeführt. Zur Durchführung der biologischen Entschwefelung müssen Sauerstoff und das Bakterium *Sulfobacter oxydans* vorhanden sein. Das Bakterium wandelt Schwefelwasserstoff in der Gegenwart von Sauerstoff in elementaren Schwefel um. Dazu benötigt es Nährstoffe, die im ausreichenden Umfang im Fermenter vorhanden sind. Die Bakterien

sind omnipräsent, weshalb sie nicht zusätzlich zugeführt werden müssen. Der benötigte Sauerstoff wird über Einblasung von Luft, beispielsweise mittels eines Kleinstkompressors, in den Fermenter eingetragen. Eigenschaften der biologischen Entschwefelung im Fermenter zeigt Tabelle 5-2, ein Beispiel ist in Abb. 5-1 dargestellt.



Abb. 5-1: Gasregelung für die Lufteinblasung in den Fermentergasraum; Foto: Institut für Energetik und Umwelt gGmbH



Abb. 5-2: Externe biologische Entschwefelungskolonnen, rechts neben einem Gasspeicher; Fotos: S&H GmbH & Co. Umweltengineering KG

Tabelle 5-2: Kennwerte und Einsatzparameter der biologischen Entschwefelung im Fermenter

Kennwerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftzufuhr ca. 3-5 % der freigesetzten Biogasmenge</li> </ul>
Eignung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Fermenter mit Gasraum über dem Fermenter, am besten bei Fermentern mit Gasspeicher über dem Fermenter</li> </ul>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ sehr kostengünstig</li> <li>+ wartungs- und störfallarme Technik</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine Orientierung an der real freigesetzten Schwefelwasserstoffmenge</li> <li>- keine gezielte Optimierung des Schwefelwasserstoffabbaues möglich</li> <li>- mögliche Prozessbeeinträchtigung durch Sauerstoffeintrag</li> <li>- starke Korrosion an allen Bauteilen im Gasraum</li> <li>- Tag-Nacht- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen im Gasraum können ungünstig für die Entschwefelung sein</li> <li>- auf Schwankungen in der freigesetzten Gasmenge kann nicht reagiert werden</li> </ul>
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufwuchsflächen für die Schwefelbakterien sollten vorhanden sein oder zusätzlich geschaffen werden, da die vorhandene Oberfläche meist für die Entschwefelung nicht ausreicht; es eignen sich vor allem Holzkonstruktionen wie z. B. eine Balkendecke</li> <li>• Optimierung durch Regelung der Sauerstoffzufuhr in den Reaktor und kontinuierliche Schwefelwasserstoffmessung möglich</li> <li>• Explosionsschutz aufgrund der Möglichkeit der Bildung explosiver Gemische notwendig</li> </ul>
Bauformen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kleinstkompressor oder Aquarienpumpe mit nachgeschaltetem Regelventil und Durchflussanzeige zur manuellen Steuerung des Gasflusses</li> </ul>
Wartung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kaum notwendig</li> </ul>

### 5.1.1.2 Biologische Entschwefelung außerhalb des Fermenters

Zur Vermeidung der oben genannten Nachteile kann die biologische Entschwefelung auch außerhalb des Fermenters durchgeführt werden. Einige Firmen bieten hierfür in separaten Behältern angeordnete biologische Entschwefelungskolonnen an. Es besteht so die Möglichkeit, die für die Entschwefelung notwendigen Randbedingungen wie Luft- bzw. Sauerstoffzufuhr

genauer einzuhalten. Um die Düngewirkung des vergorenen Substrats zu erhöhen, kann der anfallende Schwefel dem vergorenen Substrat im Gärrestlager wieder zugeführt werden. Kennwerte und Einsatzparameter externer biologischer Entschwefelungsanlagen sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst. Beispiele sind in Abb. 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-3: Kennwerte und Einsatzparameter externer biologischer Entschwefelungsanlagen

Kennwerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• über 99 % Reinigungsleistung möglich (z.B. von 6000 ppm auf &lt;50 ppm)</li> <li>• Technik für alle Biogasanlagendimensionen erhältlich</li> <li>• Systeme für Gasflüsse zwischen 10 und 1200 Nm<sup>3</sup>/h verfügbar</li> </ul>
Eignung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Biogasgewinnungssysteme</li> </ul>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Dimensionierung auf die real freigesetzte Schwefelwasserstoffmenge möglich</li> <li>+ gezielte automatisierte Optimierung des Schwefelwasserstoffabbaues durch Nährstoff-, Luftzufuhr- und Temperaturmanagement möglich</li> <li>+ keine Prozessbeeinträchtigung durch Sauerstoffeintrag</li> <li>+ Vermeidung starker Korrosion an Bauteilen im Gasraum des Fermenters</li> <li>+ kein Chemikalieneinsatz notwendig</li> <li>+ bei ausreichender Dimensionierung wirken sich kurzfristige Schwankungen in der Gasmenge nicht negativ auf die Gasqualität aus</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zusätzliches, mit Kosten verbundenes Aggregat notwendig</li> <li>- zusätzlicher Wartungsaufwand</li> </ul>
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Explosionsschutz aufgrund der Möglichkeit der Bildung explosiver Gemische notwendig</li> </ul>
Bauformen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• als Säulen, Kessel oder Container aus Kunststoff oder Stahl, freistehend, gefüllt mit Trägerkörpern, z. T. mit Rückspülung einer Mikroorganismenemulsion</li> </ul>
Wartung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• z. T. sind biologische Mikroorganismenemulsionen in größeren Zeitabständen nachzufüllen oder Trägerkörper langfristig auszutauschen</li> </ul>



Tabelle 5-4: Kennwerte bei der internen chemischen Entschwefelung; nach /5-3/

Kennwerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>chemische Substanzen zur Abscheidung können Eisensalze (Eisen-III-chlorid, Eisen-II-chlorid) sein, es eignet sich auch Raseneisenerz</li> <li>Verbrauch z.B. 0,023 Liter Eisen-III-chlorid pro m<sup>3</sup> Biogas</li> </ul>
Eignung	<ul style="list-style-type: none"> <li>alle Systeme der Nassvergärung</li> </ul>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ sehr gute Abscheideraten</li> <li>+ kein zusätzliches Aggregat zur Entschwefelung notwendig</li> <li>+ kein zusätzlicher Wartungsaufwand entsteht</li> <li>+ auf die Eingangssubstratmasse bezogene Dosierung möglich</li> <li>+ keine Prozessbeeinträchtigung durch Sauerstoffeintrag</li> <li>+ Vermeidung starker Korrosion an Bauteilen im Gasraum des Fermenters (im Vgl. zur internen biologischen Entschwefelung)</li> <li>+ Schwankungen in der Gasfreisetzungsrates verursachen keine Qualitätseinbußen im Biogas</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensionierung auf den Schwefelgehalt der Eingangssubstrate schwierig</li> <li>- Erhöhung der laufenden Kosten und des Aufwandes durch kontinuierlichen Chemikalienverbrauch</li> </ul>
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>die chemische Entschwefelung im Fermenter wird z. T. eingesetzt, wenn die biologische Entschwefelung im Gasraum des Fermenters nicht ausreicht</li> <li>entstehendes Eisensulfid kann die Eisenkonzentrationen im Boden nach der Ausbringung des Gärrestes stark steigern</li> </ul>
Bauformen	<ul style="list-style-type: none"> <li>manuelle oder automatisierte Dosierung durch zusätzliche Kleinfördertechnik</li> <li>Einbringung als Lösung oder in Form von Presslingen und Körnern</li> </ul>
Wartung	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Wartung notwendig</li> </ul>

#### 5.1.1.3 Chemische Entschwefelung im Fermenter

Bei der chemischen Entschwefelung wird dem Gärsubstrat eine chemische Substanz zugeführt, die Schwefel chemisch bindet und damit die Freisetzung von Schwefelwasserstoff unterbindet. Die Substanz geht nicht verloren, sondern findet sich im vergorenen Substrat wieder /5-2/. Kennwerte zur chemischen Entschwefelung sind in Tabelle 5-4 enthalten.

#### 5.1.1.4 Chemische Entschwefelung außerhalb des Fermenters

Bei der externen chemischen Entschwefelung wird eine Gaswäsche außerhalb des Fermenters mit einer Lauge (meist Natriumhydroxid) durchgeführt. Die Eigenschaften werden in Tabelle 5-5 erläutert.

### 5.1.2 Trocknung

Um die Gasverwertungsaggregate vor hohem Verschleiß und Zerstörung zu schützen, muss Wasserdampf aus dem Biogas entfernt werden. Die Menge Wasser bzw. Wasserdampf, die Biogas aufnehmen kann, ist von der Gastemperatur abhängig. Die relative Feuchte von Biogas beträgt im Fermenter 100 %, das Biogas ist somit wasserdampfgesättigt. Durch Kühlung des Gases fällt ein Teil des Wasserdampfes als Kondensat aus.

Die Kühlung des Biogases wird häufig in der Gasleitung durchgeführt. Durch ein entsprechendes Gefälle beim Verlegen der Gasleitung wird das Kondensat in einem am tiefsten Punkt der Gasleitung eingebauten Kondensatabscheider gesammelt. Wird die Gasleitung unterirdisch geführt, ist der Kühleffekt höher. Voraussetzung für die Kühlung des Biogases in der Gasleitung ist allerdings eine ausreichende Länge der Gasleitung. Bei der unterirdischen Leitungsführung muss zwingend darauf geachtet werden, dass Setzungen nicht zur Wassersackbildung führen können. Voraussetzung dafür ist eine ausreichende Verdichtung des Leitungsbettes. Neben dem Wasserdampf wird durch das Kondensat ein Teil weiterer unerwünschter Inhaltsstoffe wie wasserlösliche Gase und Aerosole aus dem Biogas entfernt. Die Kondensatabscheider müssen regelmäßig entleert werden, weshalb sie gut zugänglich sein müssen. Das Einfrieren der Kondensatabscheider muss durch frostfreien Einbau unbedingt verhindert werden.

Bei einigen Anlagen findet die Gastrocknung durch eine Kühlung des Biogases in elektrisch betriebenen Gaskühlern statt. Durch die hierbei herrschenden niedrigen Temperaturen unter 10 °C kann viel Feuchtigkeit abgeschieden werden. Zur Minimierung der relativen Luftfeuchte, nicht jedoch der absoluten Luftfeuchte, kann das Gas nach der Kühlung wieder erwärmt werden, wodurch eine Kondensatbildung im weiteren Verlauf der Gasleitung verhindert werden kann.

Tabelle 5-5: Kennwerte und Einsatzparameter externer chemischer Entschwefelungsanlagen

Kennwerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mit Natronlauge oder Eisenhydroxid möglich</li> <li>• in Abhängigkeit der Abstimmung von Rohgasmenge und Anlagengröße sehr hohe Reinigungsgrade oberhalb 95 % möglich</li> </ul>
Eignung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Biogasgewinnungssysteme</li> </ul>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Dimensionierung auf die real freigesetzte Schwefelwasserstoffmenge möglich</li> <li>+ gezielte automatisierte Optimierung der Schwefelwasserstoffabscheidung durch Laugen- und Temperaturmanagement möglich</li> <li>+ keine Prozessbeeinträchtigung durch Sauerstoffeintrag</li> <li>+ Vermeidung starker Korrosion an Bauteilen im Gasraum des Fermenters (im Vgl. zur internen biologischen Entschwefelung)</li> <li>+ Schwankungen in der Gasfreisetzungsrate verursachen keine Qualitätseinbußen im Biogas bei Überdimensionierung der Entschwefelung</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zusätzliches, mit Kosten verbundenes Aggregat</li> <li>- es entsteht ein Chemikalienbedarf</li> <li>- zusätzlicher Eintrag von Frischwasser zur Laugenverdünnung notwendig (nicht bei Eisenhydroxid)</li> <li>- zusätzlicher Wartungsaufwand</li> </ul>
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entsorgung der verbrauchten Lauge in Kläranlagen notwendig, aber aus chemischer Sicht unproblematisch (nur bei Natronlauge)</li> </ul>
Bauformen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• als Säulen oder Kessel aus Kunststoff, freistehend, gefüllt mit Trägerkörpern, mit Rückspülung der Lauge</li> </ul>
Wartung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• die Chemikalien sind in größeren Zeitabständen nachzufüllen</li> <li>• Eisenhydroxid lässt sich durch Belüftung mit Umgebungsluft mehrfach regenerieren, wobei die starke Wärmefreisetzung bis zur Entzündung führen kann</li> </ul>



## 5.2 Nutzung durch Kraft-Wärme-Kopplung

Unter Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird die gleichzeitige Erzeugung von Kraft (bzw. Strom) und Wärme verstanden. Fast ausschließlich werden hierzu Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Verbrennungsmotoren, die mit einem Generator gekoppelt sind, verwendet. Die Motoren laufen mit konstanter Drehzahl (1500 U/min), damit der direkt gekoppelte Generator elektrische Energie, die kompatibel zur Netzfrequenz ist, bereitstellt. Zum Generatorantrieb bzw. zur Stromerzeugung können alternativ zu den üblichen Zündstrahl- und Gas-Otto-Motoren Mikrogasturbinen, Stirlingmotoren oder Brennstoffzellen eingesetzt werden. Da diese Techniken sich jedoch noch weitestgehend in der Entwicklungs- oder Prototypenphase befinden, werden hier vorrangig BHKW mit Verbrennungsmotor vorgestellt.

### 5.2.1 Blockheizkraftwerke mit Verbrennungsmotoren

Das BHKW-Modul besteht neben dem Verbrennungsmotor und einem darauf abgestimmten Generator aus Wärmetauschersystemen zur Rückgewinnung der Wärmeenergie aus Abgas, Kühlwasser- und Schmierölkreislauf, hydraulischen Einrichtungen zur Wärme-

verteilung und elektrischen Schalt- und Steuereinrichtungen zur Stromverteilung und zur BHKW-Steuerung. Als Motor werden Gas-Otto-, Gas-Diesel- oder Zündstrahlmotoren verwendet, wobei letztere derzeit noch häufiger zum Einsatz kommen. Gas-Diesel-Motoren (Gasmotoren auf der Basis eines umgerüsteten marktüblichen Dieselmotorblocks, vgl. Kapitel 5.2.1.1) und Gas-Ottomotoren werden nach dem Ottoprinzip ohne zusätzliches Zündöl betrieben, der Unterschied liegt lediglich in der Verdichtung. Beide Motoren werden daher im weiteren Text als Gas-Otto-Motoren bezeichnet. Der schematische Aufbau eines Biogas-BHKW und Beispiele sind in Abb. 5-3 und 5-4 dargestellt.

#### 5.2.1.1 Gas-Ottomotoren

Gas-Ottomotoren sind speziell für den Gasbetrieb entwickelte Motoren, die nach dem Ottoprinzip arbeiten. Die Motoren werden zur Minimierung der Stickoxidemissionen als Magermotoren mit hohem Luftüberschuss betrieben. Bei Magerbetrieb wird weniger Brennstoff im Motor umgesetzt, was zu einer Leistungsminderung der Motoren führt. Diese wird durch die Aufladung der Motoren mittels Abgasturbolader

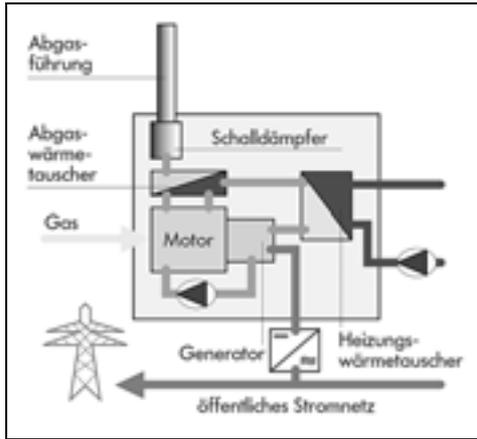


Abb. 5-3: Schematischer Aufbau eines BHKW;  
Schema: ASUE

ausgeglichen. Gas-Ottomotoren sind auf einen Mindestgehalt an Methan im Biogas von ca. 45 % angewiesen. Bei geringeren Methangehalten schalten sie ab.

Bei kleineren Motoren bis zu einer Grenze von etwa 100 kW<sub>el</sub> werden Motorblöcke eingesetzt, die als Ottomotoren konzipiert worden sind. Bei höheren elektrischen Leistungen kommen umgebaute Dieselaggregate, die mit Zündkerzen ausgestattet werden, zum Einsatz. Beide Motortypen werden hier als Gas-Otto-Motoren bezeichnet, da sie nach dem Otto-Prinzip arbeiten.

Sollte kein Biogas zur Verfügung stehen, können Gas-Ottomotoren auch mit anderen Gasarten wie z. B.

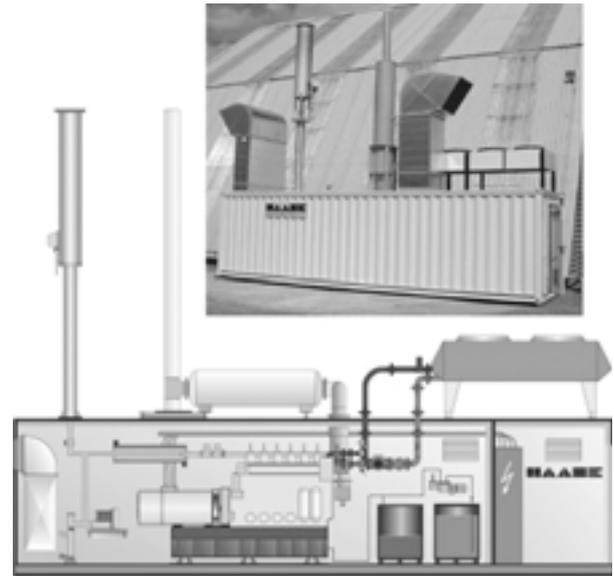


Abb. 5-4: Biogas-BHKW, Komplettmodul in Kompaktbauweise mit Notfackel; Abb.: Haase Energietechnik AG

Erdgas betrieben werden /5-1/. Dies kann z. B. zum Anfahren der Biogasanlage nützlich sein, um über die Motorabwärme die benötigte Prozesswärme zur Verfügung zu stellen. Neben der Gasregelstrecke für das Biogas muss dafür zusätzlich eine Strecke für das Ersatzgas installiert werden.

Die wesentlichen Kenndaten von Gas-Otto-Motoren, die für die Anwendung bei der Biogasnutzung relevant sind, werden in Tabelle 5-6 dargestellt.

Tabelle 5-6: Kennwerte und Einsatzparameter von Gas-Otto-Motoren

Kennwerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elektrische Leistung bis &gt; 1 MW, unter 100 kW nur selten anzutreffen</li> <li>• Wirkungsgrade elektrisch 34-40 % (bei elektrischen Nennleistungen &gt; 300 kW)</li> <li>• Standzeit: ca. 60.000 Betriebsstunden</li> <li>• ab ca. 45 % Methangehalt einsetzbar</li> </ul>
Eignung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• grundsätzlich alle Biogasanlagen, wirtschaftlicher Einsatz eher in größeren Anlagen</li> </ul>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ speziell für die Gasverwertung konstruiert</li> <li>+ Emissionsgrenzwerte werden sicher eingehalten</li> <li>+ geringer Wartungsaufwand</li> <li>+ Gesamtwirkungsgrad höher als bei Zündstrahlmotoren</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- leicht erhöhte Kosten gegenüber Zündstrahlmotoren</li> <li>- höhere Kosten durch Fertigung in geringen Stückzahlen</li> <li>- im unteren Leistungsbereich geringerer elektrischer Wirkungsgrad als bei Zündstrahlmotoren</li> </ul>
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• für den Fall der Überhitzung bei geringem Wärmebedarf ist ein Notkühler vorzusehen</li> <li>• Leistungsregelung in Abhängigkeit von der Gasqualität ist möglich und empfehlenswert</li> </ul>
Bauformen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• als einzeln stehendes Aggregat in einem Gebäude oder Kompaktbauweise im Container</li> </ul>
Wartung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• siehe Kapitel Wartung</li> </ul>

Tabelle 5-7: Kennwerte und Einsatzparameter von Zündstrahlmotoren

Kennwerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bis zu 10 % Zündölanteil zur Verbrennung</li> <li>• elektrische Leistung bis ca. 250 kW</li> <li>• Standzeit: ca. 35.000 Betriebsstunden</li> <li>• Wirkungsgrade elektrisch 30- &lt; 40% (Wirkungsgrade um 30 % nur bei kleinen Anlagen)</li> </ul>
Eignung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• grundsätzlich alle Biogasanlagen, wirtschaftlicher Einsatz eher in kleineren Anlagen</li> </ul>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ preisgünstiger Einsatz von Standard-Motoren</li> <li>+ im unteren Leistungsbereich erhöhter elektrischer Wirkungsgrad im Vergleich zu Gas-Otto-Motoren</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verkoken der Einspritzdüsen führt zu erhöhten Abgasbelastungen (NO<sub>x</sub>) und häufigeren Wartungsarbeiten</li> <li>- keine für Biogas spezifische Entwicklung der Motoren</li> <li>- Gesamtwirkungsgrad geringer als bei Gas-Otto-Motoren</li> <li>- es muss ein zusätzlicher Brennstoff (Zündöl) eingesetzt werden</li> <li>- der Schadstoffausstoß überschreitet häufig die in der TA Luft vorgegebenen Grenzwerte</li> </ul>
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• für den Fall der Überhitzung bei geringem Wärmebedarf ist ein Notkühler vorzusehen</li> <li>• Leistungsregelung in Abhängigkeit der Gasqualität ist möglich und empfehlenswert</li> </ul>
Bauformen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• als einzeln stehendes Aggregat in einem Gebäude oder Kompaktbauweise im Container</li> </ul>
Wartung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• siehe Kapitel Wartung</li> </ul>

### 5.2.1.2 Zündstrahlmotoren

Zündstrahlmotoren arbeiten nach dem Dieselpinzip. Verwendet werden häufig Motoren aus dem Schlepper- und Lastkraftwagenbau. Sie sind nicht immer speziell für den Gasbetrieb entwickelt und werden z. T. durch Modifizierungen an den Gasbetrieb angepasst. Das Biogas wird über einen Gasmischer der Verbrennungsluft beigemischt und durch das über eine Einspritzanlage dem Brennraum zugeführte Zündöl gezündet. Die Einstellungen werden normalerweise so vorgenommen, dass der Zündölanteil maximal 10 % der zugeführten Brennstoffleistung beträgt. Durch die relativ geringe Menge eingespritzten Zündöls besteht wegen fehlender Kühlung der Einspritzdüsen die Gefahr, dass diese verkoken /5-1/ und damit schneller verschleifen. Auch Zündstrahlmotoren werden mit hohem Luftüberschuss betrieben. Die Lastregelung wird über die Regelung der zugeführten Zündölmenge oder Gasmenge realisiert.

Bei Ausfall der Biogasversorgung können die Zündstrahlmotoren mit reinem Zündöl oder Diesel betrieben werden. Die Umstellung auf Ersatzbrennstoffe ist problemlos möglich und kann beim Anfahren der Biogasanlage zur Prozesswärmebereitstellung notwendig sein.

Als Zündöl kommt derzeit in der Regel Dieselöl oder Heizöl zum Einsatz. Als Alternative im Sinne der Nutzung regenerativer Energien kann auch Raps-Mehtyl-Ester (Biodiesel) oder Pflanzenöl eingesetzt werden. Die Anwendung von regenerativem Zündöl (Raps-Methyl-Ester oder anerkannte Biomasse nach EEG) wird laut aktuellem Entwurf zum

Erneuerbare-Energien-Gesetz ab 2007 für Neuanlagen sogar vorgeschrieben. Bei der Anwendung sind die Qualitätsanforderungen der Motorenhersteller einzuhalten, wobei zu beachten ist, dass nicht alle Motorenhersteller die volle Gewährleistung bei Einsatz von Biodiesel als Zündöl übernehmen. Als Vorteil von regenerativen Zündölen können geringere Kohlenstoffmonoxidemissionen und die Schwefelfreiheit festgestellt werden. Aus ökologischer Sicht stellen sich die vollständige Energiebereitstellung aus regenerativen Energieträgern und die biologische Abbaubarkeit des Zündöls (im Havariefall) als vorteilhaft dar. Aus Sicht der Motortechnik ist mit einem höheren Filterverschleiß, einer Düsenverharzung und einer geringeren Viskosität des Pflanzenöls zu rechnen. Nachteilig ist weiterhin die vermehrte Freisetzung von Lachgas.

Kennwerte und Einsatzparameter von Zündstrahlmotoren sind Tabelle 5-7 zu entnehmen.

### 5.2.1.3 Schadstoffreduzierung und Abgasreinigung

Stationäre Verbrennungsmotoranlagen für den Einsatz von Biogas sind vom Gesetzgeber als genehmigungsbedürftig eingestuft, wenn die Feuerungswärmeleistung 1 MW oder mehr beträgt. Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft) gibt für diesen Fall Grenzwerte vor, die eingehalten werden müssen. Liegt die installierte Feuerungswärmeleistung unter 1 MW, handelt es sich um eine nicht genehmigungspflichtige Anlage. In diesem Fall sind die



Tabelle 5-8: Emissionsgrenzwerte der TA-Luft vom 30.07.2002 für Verbrennungsmotoranlagen nach Nr. 1.4 (einschl. 1.1 u. 1.2) 4. BImSchV /5-6/

Schadstoff	Einheit	Gas-Otto-motoren		Zündstrahl-motoren	
		< 3 MW	≥ 3 MW	< 3 MW	≥ 3 MW
Kohlenstoffmonoxid	mg/m <sup>3</sup>	1000	650	2000	650
Stickstoffoxid	mg/m <sup>3</sup>	500	500	1000	500
Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid angegeben als Schwefeldioxid	mg/m <sup>3</sup>	350	350	350	350
Gesamtstaub	mg/m <sup>3</sup>	20	20	20	20
organische Stoffe: Formaldehyd	mg/m <sup>3</sup>	60	20	60	60

in der TA-Luft vorgeschriebenen Werte als Richtwerte bei der Prüfung der Einhaltung der Betreiberpflichten, also der Pflicht, nach Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkung auf ein Mindestmaß zu beschränken, heranzuziehen, was durch die Genehmigungsbehörden unterschiedlich gehandhabt wird /5-5/. Die in der TA-Luft vorgegebenen Grenzwerte nehmen eine Unterscheidung für Zündstrahl- und Gas-Otto-Motoren vor. In Tabelle 5-8 sind die geforderten Grenzwerte der TA-Luft vom 30. Juli 2002 aufgeführt.

Die Bereitstellung eines gut gereinigten Brenngases kann zur Minimierung der Schadstoffgehalte im Abgas führen. Schwefeldioxid entsteht z. B. bei Verbrennung des im Biogas enthaltenen Schwefelwasserstoffs (H<sub>2</sub>S). Sind die Konzentrationen nicht erwünschter Spurenstoffe im Biogas gering, ist auch die im Abgas vorhandene Konzentration an deren Verbrennungsprodukten gering.

Zur Minimierung der Stickstoffoxidemissionen werden die Motoren im Magerbetrieb (vgl. Kapitel 5.2.1.1) betrieben. Durch Magerbetrieb ist es möglich, die Verbrennungstemperatur abzusenken und dadurch die Entstehung von Stickstoffoxiden zu verringern.

Katalysatoren kommen bei mit Biogas betriebenen BHKW normalerweise nicht zum Einsatz. Die im Biogas enthaltenen Begleitstoffe wie z. B. Schwefelwasserstoff führen zur Deaktivierung und Zerstörung der Katalysatoren.

Magerbetriebene Gas-Ottomotoren halten normalerweise die in der TA-Luft geforderten Grenzwerte problemlos ein. Zündstrahlmotoren haben in der Regel schlechtere Abgaswerte als Gas-Ottomotoren.

Vor allem die Stickstoffoxid- (NO<sub>x</sub>) und Kohlenstoffmonoxidemissionen (CO) können u. U. die in der TA-Luft festgelegten Grenzwerte überschreiten. Durch das zur Zündung der Motoren verwendete Zündöl befinden sich im Abgas außerdem Rußpartikel /5-5/, /5-7/, /5-8/.

#### 5.2.1.4 Generatoren

Bei den in Blockheizkraftwerken verwendeten Generatoren handelt es sich um Asynchron- oder Synchrongeneratoren. Asynchrongeneratoren werden nur bei kleineren Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis etwa 100 kW eingesetzt /5-9/. Bei Biogasanlagen werden daher normalerweise Synchrongeneratoren verwendet.

#### 5.2.1.5 Elektrische Wirkungsgrade und Leistung

Der Wirkungsgrad eines Blockheizkraftwerks ist ein Maß dafür, wie effektiv die ihm zugeführte Energie genutzt wird. Der Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus der Summe des elektrischen und des thermischen Wirkungsgrades zusammen und liegt im Normalfall zwischen 80 und 90 %. Als Faustregel für Gas-Otto- und Zündstrahlmotoren kann angenommen werden, dass der elektrische Wirkungsgrad  $\frac{1}{3}$  und der thermische Wirkungsgrad  $\frac{2}{3}$  des Gesamtwirkungsgrades beträgt /5-1/.

Der elektrische Wirkungsgrad setzt sich aus dem mechanischen Wirkungsgrad des Motors und dem Wirkungsgrad des Generators zusammen und ergibt sich durch Multiplikation der beiden Wirkungsgrade. Die elektrischen Wirkungsgrade von mit Zündstrahlmotoren betriebenen BHKW liegen zwischen 30 und 40 % und sind zumindest im unteren Leistungsbereich bei gleicher elektrischer Leistung höher als die von mit Gas-Ottomotoren betriebenen BHKW (Abb. 5-5). Die Wirkungsgrade von mit Gas-Ottomotoren betriebenen BHKW liegen zwischen 34 und 40 %. Mit zunehmender elektrischer Leistung nehmen die elektrischen Wirkungsgrade sowohl bei Zündstrahl- als auch bei Gas-Ottomotoren zu. Da die Wirkungsgrade von den BHKW-Herstellern unter Prüfstandsbedingungen (Dauerlauf mit Erdgas) ermittelt werden, sind die im praktischen Einsatz an der Biogasanlage erzielten Werte meist geringer als die Herstellerangaben. Insbesondere ist zu beachten, dass in der Praxis nur in den seltensten Fällen durchgängig Volllast gefahren werden kann und die Wirkungsgrade im Teillastbetrieb geringer als im Volllastbetrieb sind. Diese Abhängigkeit ist aggregatspezifisch und



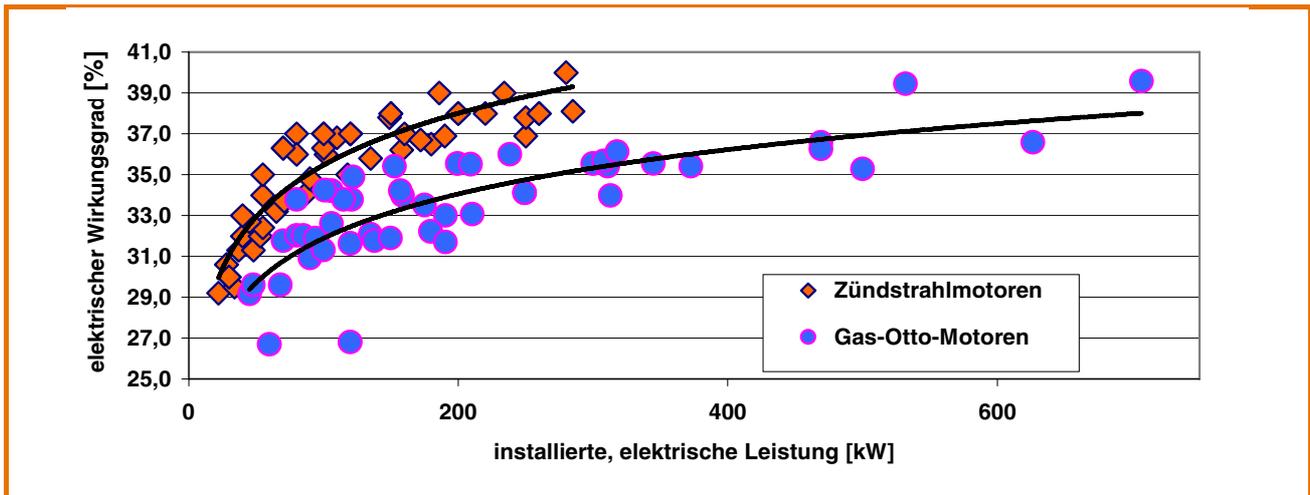


Abb. 5-5: Elektrischer Wirkungsgrad von Biogas-BHKW nach Herstellerangaben; nach [5-25], erweitert

kann aus den technischen Datenblättern abgeleitet werden. Dabei ist wieder zu beachten, dass die in Datenblättern angegebenen Wirkungsgrade in der Regel bei Einsatz von Erdgas unter Prüfstandsbedingungen ermittelt wurden.

#### 5.2.1.6 Wärmeauskopplung

Zur Nutzung der bei der Stromproduktion anfallenden Wärme ist es notwendig, eine Auskopplung über Wärmetauscher vorzusehen. In einem mit Verbrennungsmotor betriebenen BHKW fällt die Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus an. Die größte Wärmemenge kann über das Kühlwassersystem des Verbrennungsmotors gewonnen werden. Auf Grund ihres Temperaturniveaus kann sie zur Bereitstellung von Heiz- bzw. Prozessenergie verwendet werden. Einen Heizverteiler zeigt Abb. 5-6. Zur Auskopplung der Wärme aus dem Kühlwasserkreislauf kommen meist Plattenwärmetauscher zum Einsatz [5-3]. Die ausgekoppelte Wärme wird anschließend über einen Verteiler an die einzelnen Heizkreisläufe verteilt.

Das Temperaturniveau der Abgase beträgt ungefähr 460 bis 550 °C. Zum Auskoppeln der Abgaswärme kommen Abgaswärmetauscher aus Edelstahl, die meistens als Rohrbündelwärmetauscher ausgeführt sind, zum Einsatz [5-3].

Im eigenen Betrieb kann der Wärmebedarf aus der Abwärme der BHKW recht schnell gedeckt werden. Er ist in der Regel nur im Winter hoch, im Sommer dagegen muss der Notkühler die meiste Überschusswärme freisetzen. Neben der für die Fermenterheizung benötigten Wärme, die ca. 25 bis 40 % der gesamten anfallenden Wärmemenge beträgt, können zusätzlich die Substrathygienisierung betrieben und z. B. Betriebs-



Abb. 5-6: Heizverteiler; Foto: MT-Energie-GmbH

oder Wohnräume beheizt werden. BHKWs sind voll kompatibel mit der üblichen Heiztechnik und daher leicht an den Heizkreislauf anzuschließen. Für den Fall des Ausfalles des BHKW sollte der oft bereits vorhandene Heizkessel zum Notbetrieb vorgehalten werden. Der darüber hinausgehende Wärmebedarf ist stark von der Betriebsstruktur abhängig (Schweinemast, Geflügelhaltung etc.). Zur Prozessvereinfachung, z. B. zum Ausmisten kann eine zusätzliche Fußbodenheizung in Ställen das Festfrieren von Mist am Boden sehr hilfreich vermeiden. Meist ist damit jedoch die verfügbare Wärme noch nicht in einem hohen Maße ganzjährig ausgenutzt [5-3].

Aus diesem Grund kann die Suche nach Wärmeabnehmern außerhalb der Grenzen des eigenen Betriebes zum wirtschaftlichen Wärmeeinsatz führen. Wenn sich günstige Möglichkeiten für den Wärmeabsatz bieten, kann auch durch bessere Fermenterdämmung oder effektiveren Wärmeeintrag in den Fermenter eine Wärmeeinsparung im Betrieb sinnvoll

sein. Zu beachten ist beim Wärmeverkauf jedoch die z. T. notwendige Kontinuität der Wärmelieferung, so dass häufig Wartungsintervalle und Ausfallzeiten überbrückt werden müssen. Potenzielle Wärmenutzer sind nahegelegene gewerbliche und kommunale Einrichtungen (Gartenbaubetriebe, Fischzuchtbetriebe, Milchverarbeitung, Holztrocknung u. a.) oder Wohnhäuser. Ein besonderes Potenzial für die Wärmenutzung bieten Veredlungs- und Trocknungsprozesse mit hohem Wärmeenergieeinsatz. Eine weitere Alternative stellt die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung dar (siehe Kapitel 5.3).

In der weiteren Wärmenutzung wird derzeit ein großes Potenzial gesehen, jedoch sind wirtschaftlich tragbare Konzepte und Projekte bisher eher die Ausnahme. Durch den Absatz der Wärme können zusätzliche Einkommensquellen erschlossen werden, die erheblich zur Wirtschaftlichkeit der Anlage beitragen können.

Die Kühlung der BHKW-Motoren muss auch bei fehlender Wärmeabnahme der Verbraucher im Heizkreislauf (z. B. im Sommer) sichergestellt werden, um eine Überhitzung und damit verbundene Schädigung zu vermeiden. Hierfür werden Notkühler mit in den Heizkreislauf der Motoren eingebunden, über die die nicht benötigte Wärme an die Umgebung abgegeben werden kann.

### 5.2.1.7 Gasregelstrecke

Um das Biogas effektiv nutzen zu können, stellen Gasmotoren Anforderungen in Bezug auf die physikalischen Eigenschaften des Gases. Dies sind insbesondere der Druck, mit dem das Biogas dem Gasmotor zugeführt wird (meist 100 mbar) und ein definierter Volumenstrom. Falls diese Parameter die Vorgaben nicht erfüllen können, beispielsweise wenn nicht ausreichend Gas im Fermenter freigesetzt wird, werden die Motoren abgeschaltet oder in den Teillastbetrieb umgeschaltet. Um die Vorgaben sehr konstant einzuhalten und Sicherheitsanforderungen gerecht zu werden, wird eine Gasregelstrecke direkt vor dem BHKW installiert.

Die Gasregelstrecke sollte einschließlich der gesamten Gasleitung nach den Richtlinien der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) zugelassen sein. Alle Gasleitungen müssen entweder durch gelbe Farbe oder gelbe Pfeile kenntlich gemacht werden. Die Regelstrecke muss zwei selbständig schließende Ventile (Magnetventile), ein Absperrventil außerhalb des Aufstellraumes, eine Flammendurchschlagsicherung und einen Unter-



Abb. 5-7: BHKW mit Gasregelstrecke (helle Leitungen);  
Foto: MT-Energie GmbH

druckwächter enthalten. Sinnvoll ist es, einen Gaszähler zur Bestimmung der Gasmenge und einen Feinfilter zum Abtrennen von Partikeln aus dem Biogas mit in die Gasstrecke zu integrieren. Wenn notwendig, wird ein Verdichter in die Strecke integriert. In Abb. 5-7 ist ein Beispiel für eine Gasregelstrecke zu sehen.

**Von besonderer Bedeutung für die Installation der Gasleitungen ist die Integration von Einrichtungen zum Kondensatablass**, da bereits geringe Kondensatmengen auf Grund der geringen Gasdrücke zum Verschluss der Gasleitung führen können.

### 5.2.1.8 Betrieb, Wartung, Service und Aufstellräume

Die Nutzung von Biogas in BHKW setzt bestimmte Rahmenbedingungen voraus, die eingehalten werden müssen. Neben dem eigentlichen Betrieb sind hierbei auch vorgegebene Wartungsintervalle und Anforderungen an den Aufstellraum der BHKW-Anlage zu beachten.

#### **Betrieb**

BHKW-Anlagen arbeiten auf Grund von verschiedenen Regel-, Überwachungs- und Steuerungsmaßnahmen in der Regel weitgehend automatisch. Um eine Beurteilung des Betriebes des BHKW sicherzustellen, sollten folgende Daten zur Erstellung von Trends in einem Betriebstagebuch festgehalten werden:

- erreichte Betriebsstunden,
- Anzahl der Starts,
- elektrische Leistung,
- Motorkühlwassertemperatur,
- Vor- und Rücklauftemperatur des Heizwassers,
- Kühlwasserdruck,

- Öldruck,
- Abgastemperatur,
- Abgasgegendruck,
- Brennstoffverbrauch,
- erzeugte Leistung (thermisch und elektrisch).

Die Daten können in der Regel über die BHKW-Steuerung erfasst und dokumentiert werden. Eine Kopplung der BHKW-Steuerung mit den Regelkreisen der Biogasanlage sowie der Datenaustausch mit einem zentralen Leitsystem bzw. die Datenfernübertragung per Modem, die auch die Ferndiagnose durch den Hersteller ermöglicht, kann häufig realisiert werden. Eine tägliche Begehung und Sichtkontrolle der Anlage sollte allerdings trotz aller elektronischen Überwachungen durchgeführt werden.

Bei BHKW mit Zündstrahlmotoren sollte neben der verbrauchten Gasmenge auch der Zündölverbrauch gemessen werden. Um die Vergütung des eingespeisten Stroms nach EEG sicherzustellen, darf die zugeführte Zündstrahlmenge nicht mehr als 10 % der Brennstoffleistung betragen /5-10/. Es kann nötig sein, einen Nachweis über die Höhe der eingesetzten Zündstrahlmenge zu erbringen, was sich ohne ein geeichtes Messsystem als schwierig erweisen kann. Diese Forderungen werden durch Netzbetreiber erhoben, entbehren jedoch einer gesetzlichen Grundlage.

Um eine Aussage über den thermischen Wirkungsgrad des BHKW machen zu können, sollte neben der produzierten Strommenge auch die produzierte Wärmemenge durch Wärmemengenzähler gemessen werden. So ist es außerdem möglich, eine relativ genaue Aussage über die benötigte Prozesswärme oder über die von anderen an den Heizkreislauf des BHKW angeschlossenen Verbrauchern (ggfs. Ställe usw.) benötigte Wärmemenge zu treffen.

Damit die Motoren ausreichend mit Gas versorgt werden, muss ein entsprechender Fließdruck vor Eintritt in die eigentliche Gasregelstrecke gewährleistet sein. Bei druckloser Biogasspeicherung ist hierfür eine Gasdruckerhöhung durch entsprechende Gasverdichter vorzunehmen.

Eine große Rolle für den sicheren Betrieb der Motoren spielt das Schmieröl. Durch das Schmieröl werden die im Motor entstehenden Säuren neutralisiert. Ein Austausch des Schmieröls ist infolge von Alterung, Verschmutzung und Nitrierung bzw. der Abnahme des Neutralisationsvermögens in regelmäßigen Abständen in Abhängigkeit von der Motorart, des Öls und der Betriebsstundenanzahl durchzuführen. Neben regelmäßigen Ölwechselintervallen sollte vor dem Ölwechsel eine Ölprobe entnommen werden. Die Ölprobe wird in einem darauf spezialisierten

Labor untersucht. Anhand der Laborergebnisse kann eine Aussage über die Länge der nötigen Ölwechselintervalle sowie über den Verschleiß des Motors gemacht werden /5-1/. Um die Ölwechselintervalle zu verlängern, wird häufig die verwendete Ölmenge durch Ölwannevergrößerungen erhöht, die von vielen Herstellern angeboten werden.

### Wartung

Der Betrieb eines BHKW mit Biogas setzt voraus, dass die vorgegebenen Wartungsintervalle eingehalten werden. Dazu zählt auch die vorbeugende Instandhaltung wie z. B. Ölwechsel und Austausch von Verschleißteilen. Eine ungenügende Wartung und Instandhaltung kann zur Schädigung des BHKW führen und somit erhebliche Kosten verursachen /5-1/, /5-11/.

Jeder BHKW-Hersteller stellt einen Inspektions- und Wartungsplan zur Verfügung. Anhand dieser Pläne ist zu erkennen, welche Tätigkeiten in welchen Zeitabständen zur Instandhaltung und Pflege der Module durchgeführt werden müssen. Der zeitliche Abstand der verschiedenen Maßnahmen ist von Faktoren wie dem Motortyp etc. abhängig. Durch Schulungen, die vom BHKW-Hersteller angeboten werden, besteht die Möglichkeit, einige Arbeiten in Eigenregie durchzuführen /5-11/.

Neben den Wartungsplänen werden auch Serviceverträge angeboten. Vor dem Kauf des BHKW sollten die Einzelheiten der Serviceverträge geklärt sein, wobei insbesondere folgende Punkte beachtet werden sollten:

- welche Arbeiten führt der Betreiber durch,
  - welche Form des Servicevertrages wird vereinbart,
  - wer liefert die Betriebsmaterialien,
  - in welchem Zeitraum erfolgt eine Reparatur,
  - welche Laufzeit hat der Vertrag,
  - schließt der Vertrag eine große Revision mit ein,
  - wie werden außerplanmäßige Probleme behandelt.
- Welche Leistungen in den Servicevertrag aufgenommen werden, ist unter anderem auch davon abhängig, welche Eigenleistungen vom Betreiber ausgeführt werden können. Von der Fachgemeinschaft Kraftmaschinen des VDMA wurden eine Spezifikation und ein Vertragsmuster für Wartungs- und Instandhaltungsverträge entwickelt. Basierend auf dieser Spezifikation entstand die VDI-Richtlinie 4680 „BHKW-Grundsätze für die Gestaltung von Serviceverträgen“. Hier können entsprechende Informationen über Inhalt und Aufbau der Verträge eingeholt werden /5-12/. Gemäß VDMA können verschiedene Vertragsformen von Serviceverträgen definiert werden.



Der **Inspektionsvertrag** umfasst alle Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes der zu inspizierenden Anlage. Die Vergütung kann in Form einer Pauschale geleistet werden oder wird nach Aufwand bemessen, wobei zu klären ist, ob Inspektionen einmalig oder regelmäßig stattfinden.

Der **Wartungsvertrag** enthält erforderliche Maßnahmen zur Erhaltung des Soll-Zustandes. Die durchzuführenden Tätigkeiten sollten in einer Liste beschrieben werden, die durch Bezugnahme Vertragsbestandteil wird. Die Tätigkeiten können periodisch oder zustandsabhängig durchgeführt werden. Die Vertragspartner können eine Vergütung nach Aufwand oder als Pauschale vereinbaren. Je nach Vertragsvereinbarung kann auch das Beheben von Störungen, die nicht vom Bediener beseitigt werden können, mit zu den Leistungen gehören.

Der **Instandsetzungsvertrag** umfasst alle erforderlichen Maßnahmen zum Wiederherstellen des Soll-Zustandes. Die durchzuführenden Tätigkeiten ergeben sich aus den Bedingungen des Einzelfalls. Die Vergütung wird normalerweise nach Aufwand festgelegt /5-12/.

Der **Instandhaltungsvertrag**, auch Vollwartungsvertrag genannt, umfasst Maßnahmen, die zur Erhaltung eines sicheren Betriebs notwendig sind (Wartungs- und Reparaturarbeiten, Ersatzteilinstallation und Betriebsstoffe außer Brennstoff). Eine sogenannte Generalüberholung ist auf Grund der Vertragsdauer (in der Regel 10 Jahre) ebenfalls enthalten. Dieser Vertrag entspricht weitestgehend einer Garantieleistung. Die Vergütung erfolgt meistens in Form einer Pauschale /5-12/.

Die Standzeit von Zündstrahlmotoren beträgt durchschnittlich 35 000 Betriebsstunden /5-13/, was bei 8000 Betriebsstunden im Jahr ca. 4½ Jahren entspricht. Danach ist eine Generalüberholung des Motors nötig, wobei meist der gesamte Motor getauscht wird, da sich eine Generalüberholung wegen der niedrigen Motorpreise nicht lohnt. Bei Gas-Ottomotoren kann von einer durchschnittlichen Standzeit von 45 000 Betriebsstunden bzw. ca. 5½ Jahren ausgegangen werden. Danach wird eine Generalüberholung des Motors durchgeführt. Hier werden fast alle Teile bis auf Motorblock und Kurbelwelle ausgetauscht. Nach der Generalüberholung ist eine Laufzeit in gleicher Höhe zu erwarten /5-12/. Die Standzeiten sind u. a. sehr von der Wartung und Pflege der Motoren abhängig, weswegen sie sehr stark variieren können.

### Aufstellräume

Blockheizkraftwerke sollten nur in dafür geeigneten Gebäuden aufgestellt werden. Zur Verringerung der Geräuschemissionen sollten die Gebäude mit Schallschuttmaterial oder die BHKW-Module selbst mit einer Schallschutzhaube versehen werden. Neben ausreichend Platz zum Durchführen von Wartungsarbeiten muss auf eine ausreichende Luftversorgung geachtet werden, um den Luftbedarf der Motoren decken zu können. Hierfür kann es notwendig sein, entsprechende Zu- und Abluftgebläse zu verwenden. Weitere detaillierte Anforderungen an Aufstellräume von BHKW können den Sicherheitsregeln für landwirtschaftliche Biogasanlagen entnommen werden.

Für die Aufstellung im Freien werden BHKW-Module, die in schallgedämmte Container eingebaut sind, angeboten. In diesen Containern sind normalerweise die Anforderungen an Aufstellräume vom BHKW-Hersteller realisiert. Ein weiterer Vorteil der Containerbauweise stellt die Komplettmontage der Anlage beim BHKW-Hersteller mit einem anschließenden Test dar. So lassen sich die Zeiten von der Aufstellung bis zur Inbetriebnahme auf ein bis zwei Tage reduzieren. Beispiele für die Aufstellung von BHKW zeigt Abb. 5-8.

#### 5.2.1.9 Kosten

Die Kosten von Blockheizkraftwerken sind stark von den verwendeten Motortypen abhängig. Bei Zündstrahlmotoren handelt es sich häufig um Motoren, die anders als Gas-Ottomotoren in Serienproduktion hergestellt werden, weswegen sie in der Anschaffung günstiger sind. Als grober Netto-Richtpreis können für ein BHKW mit Zündstrahlmotor mit einer elektrischen Leistung von 200 kW etwa 550 €/kW und bei einem BHKW mit Gas-Ottomotor bei gleicher elektrischer Leistung ca. 800 €/kW dienen (vgl. Abb. 5-9). Die spezifischen Kosten nehmen mit zunehmender elektrischer Leistung der BHKW ab. Bei der Beurteilung muss auf jeden Fall der Wirkungsgrad der Anlage beachtet werden. BHKW mit höheren Wirkungsgraden weisen höhere Kosten auf, die aber durch den erhöhten Mehrerlös aus dem Stromverkauf wieder ausgeglichen werden können.

Bei Zündstrahlmotoren fallen zusätzlich Kosten für das zum Betrieb notwendige Zündöl und dessen Bevorratung (Vorratsbehälter) an. Zündstrahlaggregate sind bei gleicher anfallender Biogasmenge größer zu wählen als Gas-Ottomotoren, da zusätzlich zum Biogas noch der Energiegehalt des Zündöls berücksichtigt werden muss /5-1/.



Abb. 5-8: BHKW-Container bzw. Aufbau eines BHKW in einem Gebäude; Fotos: Seva Energie AG

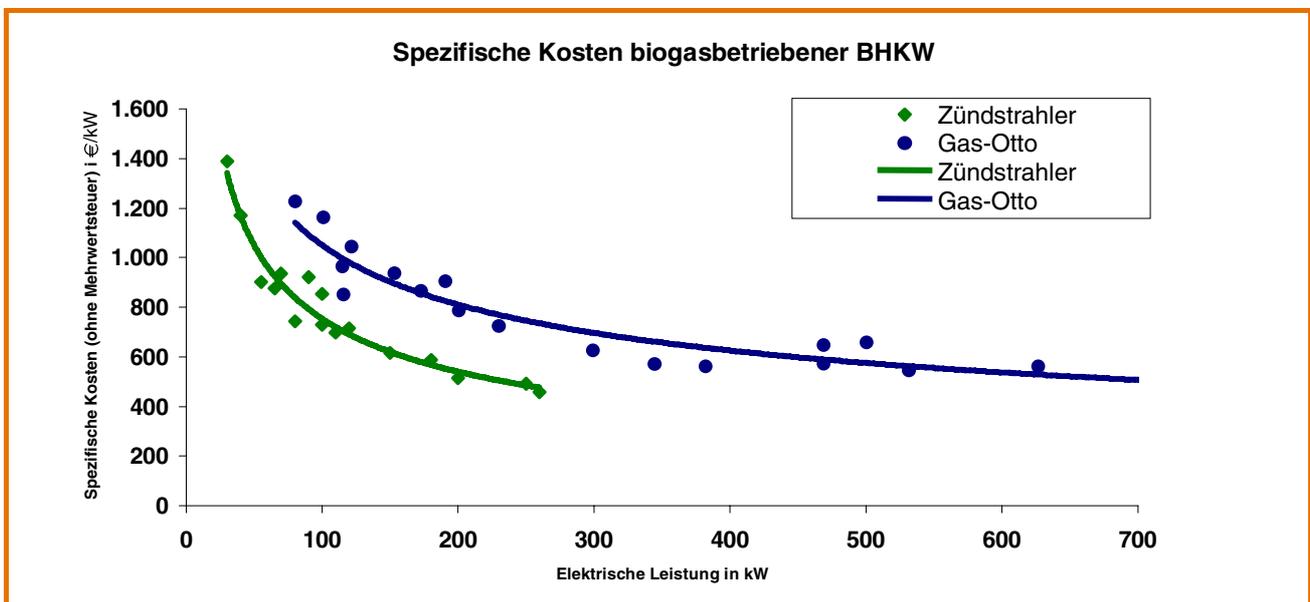


Abb. 5-9: Spezifische Kosten von Biogas-BHKW

Preisvergleiche zwischen einzelnen BHKW können sich als schwierig erweisen, da sich der Umfang der einzelnen Angebote sehr stark unterscheidet. Um eine Vergleichbarkeit herstellen zu können, ist die Einholung von Angeboten mit einer sehr detaillierten Angebotsanfrage empfehlenswert. Trotzdem ist die sorgfältige Prüfung der Angebotsinhalte sehr wichtig, um ggf. das günstigste Angebot vom billigsten unterscheiden zu können.

Neben den Anschaffungskosten sollten auch Kosten für Wartung und Instandhaltung mit berücksichtigt werden. Die Kosten sind stark von den angebotenen Leistungen bzw. Vertragsinhalten abhängig (vgl. Kapitel 5.2.1.8). Als grober Richtpreis können ungefähr 1 bis 1,8 Cent pro erzeugte kWh<sub>el</sub> für Vollwartungsverträge veranschlagt werden /5-11/. Abb. 5-10 zeigt eine Übersicht über Preise für Vollwar-

tungsverträge in Abhängigkeit der installierten Motorleistung. Da die BHKW allerdings nicht immer in Volllast laufen, was zur Reduzierung der eingespeisten Kilowattstunden führt, legen viele Hersteller die Kostenpauschale nach Betriebsstunden fest.

Zum Kauf des BHKW stellt das Contracting eine Alternative dar. Contracting wird von vielen BHKW-Herstellern in unterschiedlichen Varianten angeboten. Je nach Variante werden Teile des unternehmerischen Risikos vom Biogasanlagenbetreiber auf den Contractor verlagert. Das verbleibende Restrisiko wird vertraglich zwischen beiden Parteien geregelt. So besteht z. B. die Möglichkeit, dass der Contractor Planung, Finanzierung, Bau und Wartung sowie die Betriebsführung der BHKW-Anlage übernimmt und damit ihr Betreiber ist. Ein Teil der Vergütung, die der Contractor (Betreiber) für den einge-



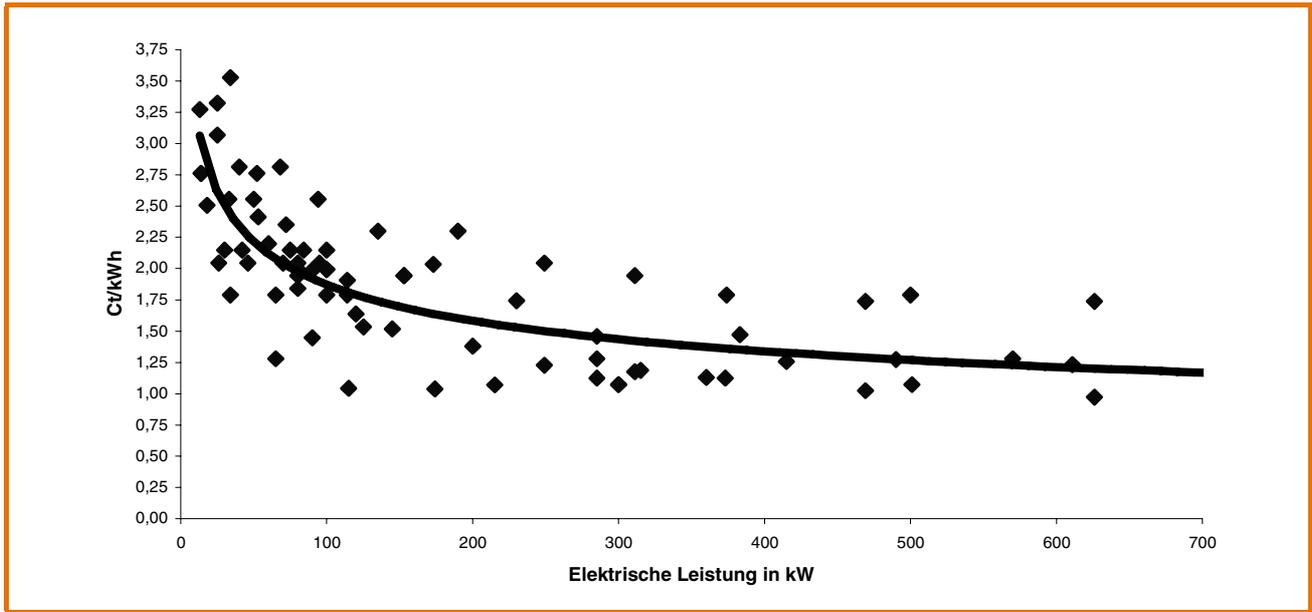


Abb. 5-10: Richtpreise für Instandhaltungsverträge [5-12]

speisten Strom bekommt, gibt er an den Nutzer (Biogasanlagenbetreiber) weiter. Contracting bietet die verschiedensten Varianten, die individuell zwischen Contractor und Nutzer ausgehandelt werden können.

### 5.2.2 Nutzung in Stirlingmotoren

Der Stirlingmotor gehört zu den Heißgas- oder Expansionsmotoren. Hier wird der Kolben nicht – wie bei Verbrennungsmotoren – durch die Expansion von Verbrennungsgasen aus einer inneren Verbrennung bewegt, sondern durch die Ausdehnung (Expansion) eines eingeschlossenen Gases, welches sich infolge Energie- bzw. Wärmezufuhr einer externen Energiequelle ausdehnt. Durch diese Entkopplung der Energie- bzw. Wärmequelle von der eigentlichen Krafterzeugung im Stirlingmotor kann die benötigte Wärme aus unterschiedlichen Energiequellen, wie z. B. einem Gasbrenner, der mit Biogas betrieben wird, zur Verfügung gestellt werden.

Das grundlegende Prinzip des Stirlingmotors basiert auf dem Effekt, dass ein Gas bei einer Temperaturänderung eine gewisse Volumenänderungsarbeit verrichtet. Wird dieses Arbeitsgas zwischen einem Raum mit konstant hoher Temperatur und einem Raum mit konstant niedriger Temperatur hin- und herbewegt, ist ein kontinuierlicher Betrieb des Motors möglich. Damit wird das Arbeitsgas im Kreislauf geführt. Das Arbeitsprinzip ist in Abb. 5-11 dargestellt.

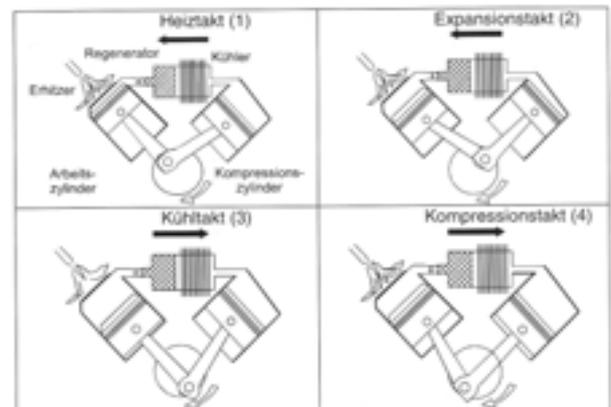


Abb. 5-11: Arbeitsweise eines Stirlingmotors aus [5-14] nach [5-24]

Auf Grund der kontinuierlichen Verbrennung weisen Stirlingmotoren geringe Schadstoff- und Geräuschemissionen sowie einen geringen Wartungsaufwand auf. Sie lassen wegen der geringen Bauteilbelastungen und des geschlossenen Gaskreislaufs geringe Wartungskosten erhoffen. Die elektrischen Wirkungsgrade sind im Vergleich mit herkömmlichen Gas-Ottomotoren geringer und liegen zwischen 24 und 28 %. Die Leistung von Stirlingmotoren ist vorrangig im Bereich unter 50 kW<sub>el</sub> angesiedelt. Die Abgastemperaturen liegen zwischen 250 und 300 °C.

Auf Grund der äußeren Verbrennung werden geringe Ansprüche an die Qualität des Biogases gestellt, weswegen auch Gase mit geringen Methangehalten verwendet werden können [5-14/].

Erdgasbetriebene Stirlingmotoren sind in sehr kleinen Leistungsklassen am Markt verfügbar. Um Stirlingmotoren konkurrenzfähig in der Biogastechnologie einzusetzen, bedarf es allerdings noch diverser technischer Weiterentwicklungen. Der Stirlingmotor würde wie Zündstrahl- oder Gas-Otto-Aggregate in BHKW eingesetzt werden können. Derzeit laufen in Deutschland Versuche mit einem 40-kW-Stirlingmotor, der mit Biogas betrieben wird. In Österreich wird der Pilotbetrieb eines Stirlingmotors gerade aufgenommen.

### 5.2.3 Nutzung in Mikrogasturbinen

In Gasturbinen wird Luft aus der Umgebung angesaugt und durch einen Verdichter auf hohen Druck verdichtet. Die Luft gelangt in eine Brennkammer, wo sie unter Zugabe von Biogas verbrannt wird. Die dabei stattfindende Temperaturerhöhung bewirkt eine Volumenausdehnung. Die heißen Gase gelangen in eine Turbine, wo sie entspannt werden, wobei sie deutlich mehr Leistung abgeben als für den Antrieb des Verdichters benötigt wird. Mit der nicht zum Verdichterantrieb benötigten Energie wird ein Generator zum Zweck der Stromerzeugung angetrieben.

Als Mikrogasturbinen oder Mikroturbinen werden kleine, schnelllaufende Gasturbinen mit niedrigen Brennkammertemperaturen und -drücken im unteren elektrischen Leistungsbereich bis 200 kW bezeichnet. Als Basis der Mikrogasturbinentechnik dienen die Turboladertechnologie aus dem Kraftfahrzeugbereich und Entwicklungen aus der Luftfahrt. Momentan gibt es verschiedene Hersteller von Mikrogasturbinen in den USA und in Europa. Mikrogasturbinen besitzen zur Verbesserung des Wirkungsgrades im Gegensatz zu „normalen“ Gasturbinen einen Rekuperator, in dem die Verbrennungsluft vorgewärmt wird. Der Aufbau einer Mikrogasturbine ist in Abb. 5-12 dargestellt.

Bei einer Drehzahl von ca. 96 000 U/min wird ein hochfrequenter Wechselstrom erzeugt, der über eine Leistungselektronik so bereitgestellt wird, dass er in das Stromnetz eingespeist werden kann. Sollen Mikrogasturbinen für Biogas verwendet werden, sind gegenüber dem Erdgasbetrieb u. a. Änderungen an der Brennkammer und den Brennstoffdüsen erforderlich /5-15/. Die Schallemissionen der Mikrogasturbinen liegen in einem hohen Frequenzbereich und lassen sich gut dämmen.

Da das Biogas in die Brennkammer der Mikrogasturbine eingebracht werden muss, in der ein Überdruck von mehreren bar herrschen kann, ist eine

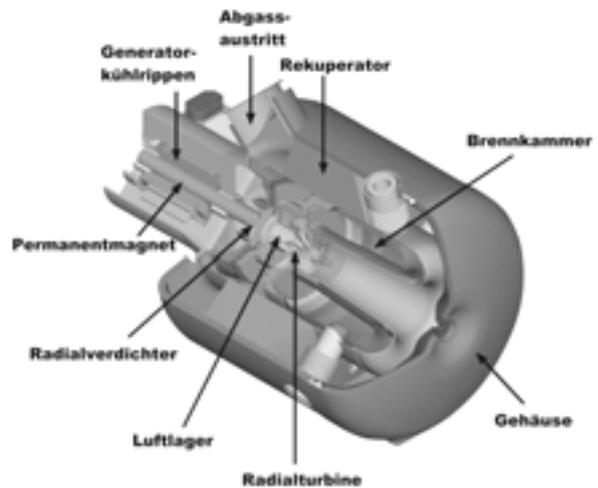


Abb. 5-12: Aufbau einer Mikrogasturbine;  
Bild: G.A.S. Energietechnologie GmbH

Gasdruckerhöhung notwendig. Neben dem Brennkammerdruck sind strömungs- und massenstrombedingte Druckverluste über die Gasleitung, Ventile und Brenner zu berücksichtigen, so dass die Druckerhöhung bei bis zu 6 bar atmosphärischem Überdruck liegt. Hierzu wird der Mikrogasturbine brennstoffseitig ein Verdichter vorgeschaltet.

Unerwünschte Begleitstoffe im Biogas können die Mikrogasturbinen schädigen, weshalb eine Gasreinigung und -trocknung durchgeführt werden muss. Mikrogasturbinen können Methangehalte von 35 bis 100 % verkraften /5-15/, /5-7/.

Durch kontinuierliche Verbrennung mit Luftüberschuss und geringen Brennkammerdrücken weisen Mikrogasturbinen deutlich geringere Abgasemissionen als Motoren auf. Dies ermöglicht neue Wege der Abgasnutzung wie z. B. die direkte Futtermittel-trocknung oder CO<sub>2</sub>-Düngung von Pflanzen im Unterglasbau. Die Abwärme ist auf einem relativ hohen Temperaturniveau verfügbar und wird nur über die Abgase transportiert. Damit kann die anfallende Wärme kostengünstiger und technisch einfacher genutzt werden als bei Verbrennungsmotoren /5-15/, /5-16/, /5-17/.

Die Wartungsintervalle sind zumindest bei mit Erdgas betriebenen Mikrogasturbinen deutlich länger als bei Motoren. So wird bei mit Erdgas betriebenen Mikrogasturbinen von einem Wartungsintervall von bis zu 8.000 (Luftlager) bzw. 6.000 Betriebsstunden (mit ölgeschmierten Lagern) ausgegangen /5-15/. Einige Hersteller gehen bei mit Biogas betriebenen Mikrogasturbinen von Wartungsintervallen von 4000 Betriebsstunden aus. Praxiswerte für den Betrieb mit Biogas liegen momentan noch nicht ausreichend vor,



so dass die angegebenen Wartungsintervalle nur als Schätzung angesehen werden können.

Ein Nachteil der Mikrogasturbinen ist der mit ca. 28 % relativ geringe elektrische Wirkungsgrad. Auch der Gesamtwirkungsgrad liegt mit ca. 82 % /5-17/ häufig etwas unter dem von Gas-Otto- und Zündstrahlmotoren. Zur Zeit werden Versuche mit biogasbetriebenen Mikrogasturbinen durchgeführt. Die Investitionskosten liegen verglichen mit leistungsäquivalenten, auf Motoren basierenden Biogas-Nutzungskonzepten um 15 bis 20 % höher /5-16/. Es wird allerdings eine Kostensenkung erwartet, wenn Mikrogasturbinen stärker im Markt vertreten sind.

### 5.2.4 Nutzung in Brennstoffzellen

Die Wirkungsweise der Brennstoffzelle unterscheidet sich grundsätzlich von den herkömmlichen Arten der Energieumwandlung. Die Umwandlung der chemischen Energie des Biogases in Strom findet direkt statt. Die Brennstoffzelle garantiert hohe elektrische Wirkungsgrade bis zu 50 % bei nahezu emissionsfreier Betriebsweise.

Das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle ist mit der Umkehrung der Elektrolyse des Wassers vergleichbar. Bei der Elektrolyse wird unter Zufuhr elektrischer Energie das Wassermolekül in Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) aufgespalten. In einer Brennstoffzelle reagieren hingegen  $H_2$  und  $O_2$  unter Abgabe von elektrischer Energie und Wärme zu Wasser ( $H_2O$ ), sie benötigt somit für die elektrochemische Reaktion Wasserstoff und Sauerstoff als „Brennstoff“ /5-18/. Ein Funktionsbeispiel zeigt Abb. 5-13.

Biogas muss grundsätzlich für den Einsatz in Brennstoffzellen aufbereitet werden.  $H_2S$  wird durch biologische Entschwefelung oder katalytische Spal-

tung an dotierter Aktivkohle entfernt. Anschließend erfolgt eine Methananreicherung durch Gaswäsche mit Wasser- oder Druckwechseladsorption mit Molekularsieben, falls dies für den Brennstoffzellentyp notwendig ist. Gleichzeitig erfolgt die Gasfeinreinigung zur Entfernung von  $H_2S$  und anderer im Biogas enthaltener Spurenstoffe. Mit Hilfe der katalytischen Dampfreformierung wird Methan in Wasserstoff überführt, wobei dieser Prozessschritt bei einigen Brennstoffzellen zellintern erfolgen kann. Die Brennstoffzellen-Typen sind nach Art der verwendeten Elektrolyten benannt und lassen sich in Nieder- (AFC, PEM), Mittel- (PAFC) und Hochtemperatur-Brennstoffzellen (MCFC, SOFC) unterteilen. Welche Zelle am besten für den Einsatz geeignet ist, hängt von der Art der Wärmeverwertung und den verfügbaren Leistungsklassen ab.

Die Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) Brennstoffzelle stellt eine Möglichkeit für den Einsatz in Biogasanlagen dar. Durch ihre Betriebstemperatur ( $80\text{ }^\circ\text{C}$ ) lässt sich die Wärme direkt in ein vorhandenes Warmwassernetz einspeisen. Die Art des verwendeten Elektrolyten lässt eine hohe Lebensdauer der PEM erwarten, sie ist jedoch sehr empfindlich gegenüber Verunreinigungen im Brenngas einschließlich Kohlenstoffdioxid, daher ist der Aufwand für die Gasreinigung hoch. Die Integration einer PEM wird zur Zeit in der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) erprobt.

Am weitesten entwickelt ist die PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell). Sie wird unter Verwendung von Erdgas weltweit am häufigsten eingesetzt. Gegenüber anderen Brennstoffzellen ist der elektrische Wirkungsgrad geringer. Die PAFC ist allerdings weniger empfindlich gegenüber Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid.

Die MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) wird mit einer flüssigen Karbonschmelze als Elektrolyt betrieben und ist unempfindlich gegenüber Kohlenstoffmonoxid und toleriert Kohlenstoffdioxid bis 40 % Volumenanteil. Auf Grund ihrer Arbeitstemperatur ( $600\text{-}700\text{ }^\circ\text{C}$ ) kann die Umwandlung von Methan in Wasserstoff, auch Reformierung genannt, zellintern stattfinden. Ihre Abwärme kann beispielsweise in nachgeschalteten Turbinen weiter genutzt werden. Eine MCFC-Brennstoffzelle wird in einem von E.ON Energie AG und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. finanzierten Projekt der Schmack Biogas AG zur Verwertung von aufbereitetem Biogas eingesetzt.

Eine weitere Hochtemperatur-Brennstoffzelle ist die SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). Sie arbeitet bei Tem-

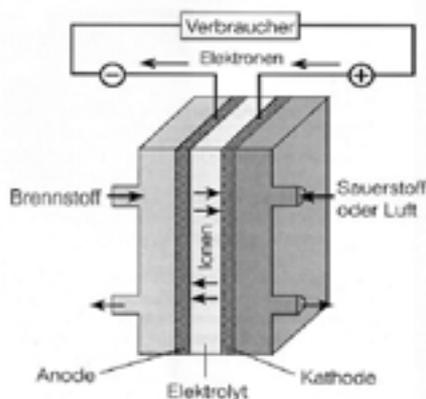


Abb. 5-13: Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle;  
Zeichnung: FAL Braunschweig

peraturen zwischen 750 und 1000 °C. Sie hat hohe elektrische Wirkungsgrade und auch hier kann die Reformierung von Methan zu Wasserstoff zellintern stattfinden. Sie weist eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Schwefel auf, was einen Vorteil bei der Verwertung von Biogas darstellt.

Für alle Brennstoffzellentypen sind die Investitionskosten von 12 000 €/kW /5-19/ sehr hoch und noch weit von motorisch betriebenen BHKW entfernt. Inwieweit sich die Investitionskosten nach unten entwickeln und noch z. T. bestehende technische Probleme ausgeräumt werden können, wird in verschiedenen Pilotvorhaben untersucht. Ausgehend vom aktuellen Entwicklungsstadium ist in den nächsten Jahren nicht mit marktauglichen Systemen zu rechnen.

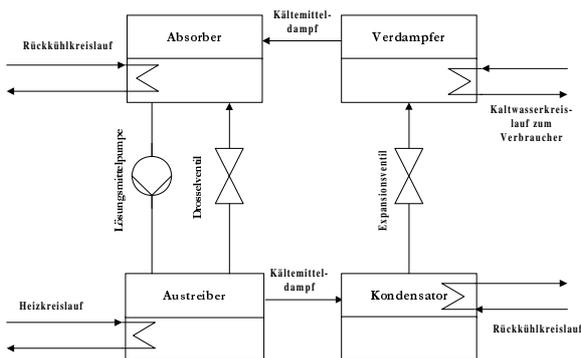


Abb. 5-14: Funktionsschema einer Absorptionskältemaschine



Abb. 5-15: Beispiel einer Absorptionskältemaschine an einer Biogasanlage; Foto: Institut für Energetik und Umwelt gGmbH

### 5.3 Nutzung durch Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Eine kontinuierliche Abnahme der bei der Nutzung von Biogas in einem BHKW anfallenden Wärme ist nur in Ausnahmefällen gegeben. Die Nutzung der anfallenden Wärme kann allerdings ein entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage sein. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, ein entsprechendes Wärmenutzungskonzept in die Planung der Anlage mit einzubeziehen. Gesichert nutzbar ist immer nur der Teil der anfallenden Wärme, der für den Prozess der Biogaserzeugung (Heizung des Fermenters) selbst benötigt wird. Das sind allerdings nur ca. 25 bis 40 %, der Rest wird häufig ungenutzt über Notkühler an die Umgebung abgegeben.

Bei der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung wird Kälte aus Wärme gewonnen. Die Umwandlung der Wärme in Kälte geschieht durch das sogenannte Sorptionsverfahren, welches in Adsorptions- und Absorptionskälteverfahren unterschieden wird. Beschrieben werden soll auf Grund der höheren Relevanz das Absorptionsverfahren bzw. eine Absorptionskältemaschine, wie sie prinzipiell aus alten Kühlschränken bekannt ist. Das Verfahrensprinzip wird in Abb. 5-14 dargestellt. Ein Realisierungsbeispiel an einer Biogasanlage ist in Abb. 5-15 zu sehen.

Zur Kälteerzeugung wird ein Arbeitsstoffpaar bestehend aus Kälte- und Lösungsmittel verwendet. Das Lösungsmittel absorbiert ein Kältemittel und wird anschließend wieder von ihm getrennt. Als Arbeitsstoffpaar können Wasser (Kältemittel) und Lithiumbromid (Lösungsmittel) für Temperaturen über 0 °C oder Ammoniak (Kältemittel) und Wasser (Lösungsmittel) für Temperaturen bis zu -60 °C verwendet werden.

Lösungs- und Kältemittel werden im Ausreiber voneinander getrennt. Dafür muss die Lösung erhitzt werden, wofür die vom BHKW zur Verfügung gestellte Wärme verwendet wird. Das Kältemittel verdampft auf Grund seines niedrigeren Siedepunktes zuerst und gelangt in den Kondensator. Das jetzt kältemittelarme Lösungsmittel gelangt in den Absorber. In dem Kondensator wird das Kältemittel abgekühlt und dadurch verflüssigt. Anschließend wird es in einem Expansionsventil auf den der gewünschten Temperatur entsprechenden Verdampfungsdruck entspannt. Im Verdampfer wird das Kältemittel anschließend unter Aufnahme von Wärme verdampft. Hier findet die eigentliche Kühlung des Kältekreislaufes, an den die Verbraucher angeschlossen sind, statt. Der dabei entstehende Kältemitteldampf strömt zum



Absorber. Im Absorber wird das Kältemittel vom Lösungsmittel aufgenommen (absorbiert), womit der Kreislauf geschlossen ist /5-3/, /5-23/.

Das einzige mechanisch bewegliche Bauteil ist die Lösungsmittelpumpe, wodurch der Verschleiß und damit der Wartungsaufwand dieser Anlagen sehr gering ist. Ein weiterer Vorteil von Absorptionskälteanlagen besteht in ihrem geringeren Stromverbrauch gegenüber Kompressionskälteanlagen. Außerdem kann zusätzlich die bei der KWK anfallende Wärme genutzt werden. Zum Einen kann so Strom eingespart und zum Anderen die vom BHKW bereitgestellte Wärme genutzt werden /5-20/.

Die Anwendung von KWK-Anlagen in der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung wird derzeit bereits an einigen Standorten als Pilotprojekt betrieben.

## 5.4 Weitere Nutzungsmöglichkeiten

Die Nutzung des Biogases bietet sich über die KWK hinaus für die direkte Wärmeenergieerzeugung, als Kraftstoff oder Substitut von Erdgas an.

### 5.4.1 Thermische Nutzung von Biogas

Die Verbrennung von Biogas zur Wärmebereitstellung ist problemlos möglich. Die hierfür eingesetzten Brenner sind häufig Allgasgeräte, die auf verschiedene Brennstoffe umgestellt werden können. Es muss lediglich eine Anpassung der Geräte an den Biogasbetrieb erfolgen. Bei Geräten, die Teile aus Buntmetall und niederen Stahllegierungen enthalten, ist durch den im Biogas enthaltenen Schwefelwasserstoff mit Korrosion zu rechnen, weswegen diese Metalle ausgetauscht werden müssen.

Es kann zwischen atmosphärischen Brennern und Gebläseburnern unterschieden werden. Atmosphärische Geräte beziehen die Verbrennungsluft durch Selbstansaugung aus der Umgebung. Der benötigte Gasvordruck liegt bei ungefähr 8 mbar und kann häufig von der Biogasanlage bereitgestellt werden. Bei Gebläseburnern wird die Verbrennungsluft durch ein Gebläse zugeführt. Der benötigte Vordruck des Brenners liegt bei mindestens 15 mbar. Zur Bereitstellung des benötigten Gasvordruckes ist u. U. die Verwendung von Gasverdichtern notwendig /5-3/.

Das Biogas kann bei entsprechenden Brennern auch anderen Brennstoffen zugefeuert werden. Die Nutzung von Biogas zur reinen Wärmeerzeugung ist allerdings in Deutschland nicht weit verbreitet und

hat gegenüber der Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken an Bedeutung verloren. Dies kann sich im Zuge der Entwicklung von Wärmenutzungskonzepten, in denen der Abstand zwischen Biogasanlage und Verbraucher für die Wärmeleitung zu groß, aber die Versorgung direkt mit Biogas ohne Energieverlust wirtschaftlich ist, ändern.

### 5.4.2 Einspeisung in das Erdgasnetz

Die Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz könnte zukünftig eine weitere Nutzungsmöglichkeit darstellen. Biogas würde nicht mehr vor Ort in BHKW zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genutzt, sondern direkt in das vorhandene Erdgasnetz eingespeist werden. Hierfür ist es allerdings notwendig, noch bestehende rechtliche Hemmnisse und technisch-wirtschaftliche Barrieren zu überwinden.

Aus rechtlicher Sicht schreibt eine EU-Gasrichtlinie den ungehinderten Zugang zum Gasnetz für jeden Gaslieferanten vor (Richtlinie zur Öffnung der Gasnetze für Biogase und Gas aus Biomasse; Europäisches Parlament; 13.03.2001) /5-3/. In Deutschland wäre eine Einleitungs- bzw. Durchleitungsverordnung als Ergänzung des Energiewirtschaftsgesetzes notwendig /5-21/.

Bei einer beabsichtigten Einspeisung des Biogases würde sich grundsätzlich an der Konfiguration der Biogasanlage, bis auf den Wegfall des BHKW, nichts ändern. Durch das fehlende BHKW müssten Alternativen bei der Bereitstellung von Prozessstrom und -wärme berücksichtigt werden. Der Prozessstrom kann aus dem Netz entnommen, die Beheizung des Fermenters könnte beispielsweise über Heizkessel realisiert werden. Eine weitere Möglichkeit wäre der parallele Betrieb eines BHKW, das so ausgelegt ist, dass die benötigte Prozessenergie zur Verfügung gestellt werden kann. Das verbleibende Biogas würde zur Einspeisung genutzt werden können.

Um Biogas in das Erdgasnetz einspeisen zu können, besteht die Notwendigkeit der Reinigung bzw. Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität (DVGW Richtlinie G 260). Um die geforderten Kennwerte zu erreichen, muss das Biogas getrocknet und von Schwefelwasserstoff befreit werden. Des Weiteren ist eine Trennung von Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) durchzuführen. Neben der eigentlichen Aufbereitung ist eine Druckerhöhung des einzuspeisenden Gases auf den vorherrschenden Druck in der Erdgasleitung vorzunehmen. Außerdem muss der Transport des Biogases über Leitungen zur eigentlichen Einspeisestelle sichergestellt sein.

In der Praxis existieren Biogaseinspeiseanlagen in Schweden, den Niederlanden und der Schweiz. In Deutschland wird gerade an den ersten Anlagen gearbeitet, wobei bisher noch keine Standardtechnik für die Umsetzung der Aufbereitungsschritte angeboten wird. Darüber hinaus gibt es noch erhebliche Probleme bei der ökonomischen Umsetzung derartiger Anlagen.

#### 5.4.3 Treibstoff für Kraftfahrzeuge

In Schweden und der Schweiz wird Biogas schon seit längerer Zeit als Treibstoff für Busse und Lastkraftwagen eingesetzt. Auch in Deutschland wurden mehrere Projekte durchgeführt, eine breite Umsetzung hat die Technologie allerdings noch nicht gefunden.

Soll Biogas als Treibstoff für Fahrzeuge eingesetzt werden, muss es auf eine für den Einsatz in derzeit üblichen Kfz-Motoren akzeptable Qualität aufbereitet werden. Neben den auf den Motor korrosiv wirkenden Stoffen wie z. B. Schwefelwasserstoff muss auch der Kohlenstoffdioxidanteil ( $\text{CO}_2$ ) sowie Wasserdampf aus dem Biogas entfernt werden. Da es sich bei den angebotenen Fahrzeugen meist um Erdgasfahrzeuge handelt, ist eine Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität (vgl. Kapitel 5.4.2) ratsam.

Grundsätzlich sind gasbetriebene Fahrzeuge am Markt verfügbar und werden von allen namhaften Kfz-Herstellern angeboten. Das Angebot erstreckt sich hierbei auf Modelle mit monovalenter oder bivalenter Betriebsweise. Monovalente Fahrzeuge werden nur mit Gas betrieben. Bei bivalenter Betriebsweise kann der Motor mit Gas oder wahlweise mit Benzin angetrieben werden /5-22/. Mit unkomprimiertem Biogas ist wegen der beträchtlichen Volumina keine nennenswerte Reichweite zu erzielen. Aus diesem Grund wird das Biogas in Druckgasbehältern bei ungefähr 200 bar im Heck der Fahrzeuge gespeichert.

Seit Juni 2002 sind Biotreibstoffe steuerbefreit, wodurch die notwendige Planungssicherheit für den Bau von Biogastankstellen besteht. Die Kosten für die Aufbereitung des Biogases, die vom angestrebten Reinheitsgrad abhängen, sind schwer abzuschätzen. Wegen des erforderlichen Technikaufwandes und der zu erwartenden Investitionskosten eignen sich hierfür vor allem Anlagen mit einer Biogasproduktion von mindestens 2500 m<sup>3</sup> pro Tag /5-19/.



## 5.5 Literaturverzeichnis

- /5-1/ Heinze, U.; Rockmann, G.; Sichtung, J.: Energetische Verwertung von Biogas, Bauen für die Landwirtschaft, Heft Nr. 3, 2000
- /5-2/ Helms, P.: Biologische Entschwefelung, Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft 2002/2003; Band 5, 1. Auflage Dezember 2002, Verlag für landwirtschaftliche Publikationen, Zeven
- /5-3/ Jäkel, K.: Managementunterlage "Landwirtschaftliche Biogaserzeugung und -verwertung", Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 1998 / 2002
- /5-4/ Mitterleitner, H.: Zündstrahler oder Gasmotor: Welches BHKW kommt in Frage, Biogas Strom aus Gülle und Biomasse, top agrar Fachbuch, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, 2002
- /5-5/ Termath, S.: Zündstrahlmotoren zur Energieerzeugung Emissionen beim Betrieb mit Biogas, Elfte Symposium Energie aus Biomasse Biogas, Pflanzeöl, Festbrennstoffe, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg, Tagungsband, 11/2002
- /5-6/ Novellierung der TA-Luft beschlossen, Biogas Journal Nr. 1/2002, Fachverband Biogas e.V., 2002
- /5-7/ Dielmann, K.P.; Krautkremer, B.: Biogasnutzung mit Mikrogasturbinen in Laboruntersuchungen und Feldtests, Stand der Technik und Entwicklungschancen, Elfte Symposium Energie aus Biomasse Biogas, Pflanzeöl, Festbrennstoffe, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg, Tagungsband, 11/2002
- /5-8/ Schlattmann, M.; Effenberger, M.; Gronauer, A.: Abgasemissionen biogasbetriebener Blockheizkraftwerke, Landtechnik, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 06/2002
- /5-9/ schmitt-enertec GmbH,  
[http://www.schmitt-enertec.de/bhkw/biogas\\_bhkw\\_beschreib.htm](http://www.schmitt-enertec.de/bhkw/biogas_bhkw_beschreib.htm), Zugriff 10.02.2003
- /5-10/ Verband der Netzbetreiber VDN e.V.: Auslegung des Gesetzes für den Vorrang erneuerbarer Energien vom 29.03.2000 durch den VDN; Stand: 1.1.2003
- /5-11/ Rank, P.: Wartung und Service an biogasbetriebenen Blockheizkraftwerken, Biogas Journal Nr. 2/2002, Fachverband Biogas e.V., 2002
- /5-12/ Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), Energiereferat der Stadt Frankfurt Referat 79A.2, BHKW-Kenn-daten 2001
- /5-13/ Schnell, H-J.: Schulungen für Planer- und Servicepersonal, Biogas Journal Nr. 2/2002, Fachverband Biogas e.V., 2002
- /5-14/ Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.: Energie aus Biomasse Grundlagen, Techniken und Verfahren, Springer-Verlag, 2001
- /5-15/ Dielmann K.P.: Mikrogasturbinen Technik und Anwendung, BWK Das Energie- Fachmagazin, 06/2001, Springer VDI Verlag, 2001
- /5-16/ Willenbrink, B.: Einsatz von Micro-Gasturbinen zur Biogasnutzung, Erneuerbare Energien in der Land(wirt)schaft 2002/2003 – Band 5, 1. Auflage Dezember 2002, Verlag für land(wirt)schaftliche Publikationen, Zeven
- /5-17/ Willenbrink, B.: Einsatz von Micro-Gasturbinen zur Biogasnutzung, Firmenschrift PRO2
- /5-18/ Mikro-KWK Motoren, Turbinen und Brennstoffzellen, ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Verlag Rationeller Erdgaseinsatz
- /5-19/ Weiland, P.: Neue Trends machen Biogas noch interessanter, Biogas Strom aus Gülle und Biomasse, top agrar Fachbuch, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, 2002
- /5-20/ <http://www.asue.de/>, Kühlen mit Erdgas, Zugriff 15.03.2003
- /5-21/ Tentscher, W.: Biogas über das Erdgasnetz direkt verkaufen?, Biogas Journal Nr. 3/2000, Fachverband Biogas e.V., 2000
- /5-22/ <http://www.umweltbundesamt.de/gasantrieb/tat/index.htm>, Zugriff 30.01.2003
- /5-23/ Wie funktioniert eine Absorptionskältemaschine, <http://www.bhkw-info.de/kwkk/funktion.html>, Zugriff 20.01.2003
- /5-24/ Raggam, A.: Ökologie-Energie; Skriptum zur Vorlesung; Institut für Wärmetechnik; Technische Universität Graz 1997
- /5-25/ Mitterleitner, Hans: persönliche Mitteilung 2004