

Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung mit Stirling-Motoren

Wie weit ist die Entwicklung?

von [Martin Dehli](#)

e-mail: Martin.Dehli@energie-fakten.de

Hier die Fakten - vereinfachte Kurzfassung

Der Stirling-Motor ist eine Kolbenmaschine, mit der Hochtemperatur-Wärme zu einem Teil in erwünschte Arbeit umgewandelt werden kann, die sich mit einem elektrischen Generator zur Stromerzeugung nutzen lässt. Allerdings wird die Wärme nicht wie beim Otto-Motor durch eine explosionsartige Verbrennung im Motor selbst freigesetzt, sondern wird von außen einem im geschlossenen Kreislauf geführten Arbeitsmittel – zum Beispiel Helium, Stickstoff oder Luft – zugeführt. Wie beim Verbrennungsmotor oder beim Dampfkraftwerk muss derjenige Teil der Wärme, der nicht nutzbringend in wertvolle Arbeit umgewandelt wird, als Niedertemperatur-Wärme abgeführt werden. Diese kann noch z. B. zum Heizen verwendet werden, wenn ein entsprechender Bedarf vorhanden ist; ansonsten muss sie als nutzlose Abwärme der Umgebung zugeführt werden.

Kolbenmaschine mit Arbeitsgas in einem geschlossenen Kreislauf

Das Arbeitsprinzip des Stirling-Motors besteht darin, ein geschlossenes Gasvolumen zu erhitzen und dabei gleichzeitig zu entspannen sowie im Weiteren zu kühlen und dabei gleichzeitig zu komprimieren; bei diesen Schritten kann über einen Kolben – den Arbeitskolben – eine Kurbelwelle bewegt werden. Um das Arbeitsgas immer unter dem periodisch veränderlichen erwünschten Volumen zu halten, wird noch ein zweiter Kolben – der Verdrängerkolben – eingesetzt, der ebenfalls mit der Kurbelwelle verbunden ist. Bei einem abgewandelten Typ des Stirling-Motors können sich die beiden Kolben aber auch – statt mit einer Kurbelwelle gekoppelt zu sein – als Freikolben bewegen.

Für die praktische Anwendung gibt es verschiedene Bauarten. Bei einer bestimmten Bauart befinden sich der Arbeitskolben und der Verdrängerkolben in einem Zylinder. Bei einer anderen

Bauart werden Arbeitskolben und Verdrängerkolben in verschiedenen Zylindern geführt; die beiden Kolben sind auf der Kurbelwelle um eine Vierteldrehung gegeneinander versetzt. Das Arbeitsmittel wird bei den aufeinander folgenden Arbeitstakten durch die Baugruppen Erhitzer (für die Hochtemperatur-Wärmezufuhr von außen), Regenerator, Kühler (für die Niedertemperatur-Wärmeabfuhr) und wiederum Regenerator geschoben. Der Regenerator hat dabei die Aufgabe, abwechselnd Wärme vom Arbeitsgas aufzunehmen bzw. wieder an das Arbeitsgas abzugeben; dies verbessert den Wirkungsgrad des Stirling-Motors.

Vor- und Nachteile

Otto- und Dieselmotoren haben im Verhältnis zur Leistung ein geringeres Volumen und Gewicht als Stirling-Motoren; sie lassen sich auch besser regeln, da dort die Hochtemperatur-Wärme über die Kraftstoffverbrennung zeitgenau dosiert im Zylinderinneren

freigesetzt werden kann und nicht wie beim Stirling-Motor thermisch etwas träge von außen zugeführt wird. Stirlingmotoren laufen am Besten bei konstanter Drehzahl.

Auf der anderen Seite bietet der Stirling-Motor eine Reihe von Vorteilen: Bei der stetigen äußeren Verbrennung entstehen weniger Schadstoffe als bei der inneren Verbrennung im Otto- oder Dieselmotor. Außerdem läuft der Stirling-Motor vergleichsweise leise und vibrationsarm. Da im Inneren nichts verbrennt, bilden sich auch keine Ablagerungen. Dies gewährleistet eine sehr hohe Lebensdauer. Der Wartungsaufwand ist gering, da es keine Ventile und Zündeinrichtungen gibt und auch kein Ölwechsel erforderlich ist. Aus thermodynamischer Sicht hat der Stirling-Motor ein deutlich größeres Wirkungsgrad-Potenzial als Otto- und Dieselmotor; dieser Vorzug konnte jedoch bisher noch nicht ausgeschöpft werden.

Heutige Stirling-Motoren sind auf die verschiedensten Energiequellen hin ausgelegt: Technisch am einfachsten ist die Nutzung von Brenngasen hoher Qualität – also von Erdgas, Bioerdgas oder Flüssiggas. Aufwendiger, aber technisch ebenfalls machbar ist die Verfeuerung von Holz-Presslingen (Pellets), Holzhackschnitzeln oder Scheitholz. Die Übertragung der Wärme aus dem Abgasstrom einer Biomassefeuerung auf das Arbeitsgas im Stirling-Motor ist dabei die größte Herausforderung. Dabei konnten in letzter Zeit gute technische Lösungen erreicht

werden. Mit dem Stirlingmotor lässt sich in Gegenden mit hoher Sonneneinstrahlung auch Solarenergie in mechanische und elektrische Energie umsetzen. Dazu werden Parabolspiegel verwendet, die eine konzentrierte Solarstrahlung mit hoher Temperatur erzeugen, mit der dem Stirling-Motor die erforderliche Hochtemperaturwärme für seinen Antrieb zugeführt wird.

Ölpreisanstieg und Klimadiskussion erweckten den Stirlingmotor aus dem Dornröschenschlaf

Der Ölpreisanstieg der letzten Jahre, aber auch die aktuelle Diskussion über die globale Klimaentwicklung haben der Suche nach effizienteren Energietechniken, die zugleich vom Öl unabhängiger machen können, Auftrieb gegeben; dabei kommt u. a. auch dem Stirling-Motor Bedeutung zu. Als künftiges Einsatzgebiet des Stirling-Motors gilt der ortsfeste Einsatz: vor allem die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) – also die energiesparende gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme in Kleinanlagen. Statt in Ein- und Mehrfamilienhäusern, Großgebäuden oder kleineren Gewerbebetrieben mit einem normalen Kessel nur Wärme zu erzeugen, könnte der Stirling-Motor zugleich Strom und Wärme produzieren. Damit könnte im Bestfall der Wärmebedarf voll und der Strombedarf „vor Ort“ teilweise gedeckt werden. Wenn der Wärmebedarf stark schwankt, kann der Stirling-Motor durch einen normalen Kessel ergänzt werden; dieser kann dann die Spitzen des

Wärmebedarfs abdecken und dem Stirling-Motor die Grundlast bei der Wärmeversorgung überlassen, so dass dieser gleichmäßig laufen kann. Solche kleinen Stirling-Heizkraftanlagen sind von einzelnen „Pionier-Firmen“ in den letzten Jahren ausgiebig erprobt worden.

„Stromerzeugende Heizung“ mit Stirling-Motor

Die Wirtschaftlichkeit einer Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage – z. B. mit Stirling-Motor – kann nur dann erreicht werden, wenn der Wärmeverbraucher die Wärme möglichst gleichmäßig und über eine möglichst lange jährliche Laufzeit abnimmt: 4000 bis 5000 Vollbetriebsstunden im Jahr sollten mindestens erreicht werden. Eine weitere Bedingung ist ein ausreichend hoher Grundleistungs-Strombedarf. Für dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen) – insbesondere auf Basis erneuerbarer Energien – werden in Deutschland zum Teil hohe Subventionierungen gewährt: Entsprechend dem novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetz kann ab 2009 mit Vergütungen von 11,67 bis zu 20,67 Ct je Kilowattstunde ins Netz eingespeisten Stroms aus Biomasse gerechnet werden. Fachleute erwarten, dass Mikro- und Klein-KWK-Aggregate mit Stirling-Motor als „Stromerzeugende Heizung“ erheblich schneller als Brennstoffzellen-Heizgeräte auf den Markt kommen. Die Preisentwicklung bei fossilen Brennstoffen rückt dabei insbesondere Entwicklungen auf der Basis fester Biomasse in den Blickpunkt.

Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung mit Stirling-Motoren

Wie weit ist die Entwicklung?

von [Martin Dehli](#)

e-mail: Martin.Dehli@energie-fakten.de

Hier die Fakten - Langfassung

Der Stirling-Motor ist eine Kolben-Wärmekraftmaschine wie der Otto- oder Dieselmotor. Mit ihr kann Hochtemperatur-Wärme, die durch Verbrennung von Energieträgern freigesetzt wird, zu einem Teil in erwünschte Arbeit umgewandelt werden, die zum Beispiel zum Antrieb eines Fahrzeugs oder in einem Generator zur Stromerzeugung genutzt wird. Allerdings entsteht die Wärme nicht wie beim Otto-Motor durch eine explosionsartige Verbrennung im Motor selbst, sondern wird von außen einem im geschlossenen Kreislauf geführten Arbeitsmittel – zum Beispiel Helium, Stickstoff oder Luft – zugeführt. In dieser Hinsicht ähnelt der Stirling-Motor einem Dampfkraftwerk, bei dem die erforderliche Wärme ebenfalls in einem Kessel erzeugt und einem Arbeitsmittel – in diesem Fall Wasser und Wasserdampf – von außen zugeführt wird. Wie beim Verbrennungsmotor oder beim Dampfkraftwerk muss derjenige Teil der Wärme, der nicht nutzbringend in wertvolle Arbeit umgewandelt

wird, als Niedertemperatur-Wärme abgeführt werden. Diese kann noch z. B. zum Heizen verwendet werden, wenn ein entsprechender Bedarf vorhanden ist; ansonsten muss sie als nutzlose Abwärme der Umgebung zugeführt werden.

Kolbenmaschine mit Arbeitsgas in einem geschlossenen Kreislauf

Das Arbeitsprinzip des Stirling-Motors besteht darin, ein geschlossenes Gasvolumen zu erhitzen und dabei gleichzeitig zu entspannen sowie im Weiteren zu kühlen und dabei gleichzeitig zu komprimieren; bei diesen Schritten kann über einen Kolben – den Arbeitskolben – eine Kurbelwelle angetrieben werden. Um das Arbeitsgas immer unter dem periodisch veränderlichen erwünschten Volumen zu halten, wird noch ein zweiter Kolben – der Verdrängerkolben – eingesetzt, der ebenfalls mit der Kurbelwelle verbunden ist. Bei einem abgewandelten Typ des Stirling-Motors können sich die beiden Kolben aber

auch – statt mit einer Kurbelwelle gekoppelt zu sein – als Freikolben bewegen.

Bauarten

Für die praktische Anwendung gibt es verschiedene Bauarten. Bei einer bestimmten Bauart befinden sich der Arbeitskolben und der Verdrängerkolben in einem Zylinder. Bei einer anderen Bauart, wie sie z. B. von der Firma Solo entwickelt wurde, werden Arbeitskolben und Verdrängerkolben in verschiedenen Zylindern geführt; die beiden Kolben sind auf der Kurbelwelle um eine Vierteldrehung gegeneinander versetzt. Das Arbeitsmittel Helium steht unter einem mittleren Druck von 30 bar und erreicht einen Höchstdruck von bis zu 150 bar; die höchste Arbeitsmittel-Temperatur beträgt rund 650 °C. Das Arbeitsmittel wird bei den aufeinander folgenden Arbeitstakten durch die Baugruppen Erhitzer (Heizwärmeübertrager für die Hochtemperatur-Wärmezufuhr von außen), Regenerator, Kühler (Kühlwärmeübertrager für die Nieder-

LANGFASSUNG

temperatur-Wärmeabfuhr) und wiederum Regenerator geschoben. Der Regenerator hat dabei die Aufgabe, abwechselnd Wärme vom Arbeitsgas aufzunehmen bzw. wieder an das Arbeitsgas abzugeben; dies verbessert den Wirkungsgrad des Stirling-Motors. Die Prozessführung beim Solo-Stirling-Motor ist so geregelt, dass der Arbeitskolben bei hohem Druck nach unten gedrückt wird und sich bei niedrigem Druck nach oben bewegt. So entsteht an der Kurbelwelle nutzbare Arbeit.

Vor- und Nachteile

Erfunden wurde die Grundform des Stirling-Motors bereits 1816 von dem schottischen Pfarrer Robert Stirling. Im 19. Jahrhundert fand er vor allem in der Landwirtschaft einige Verbreitung, weil man ihn mit jedem Brennstoff, also auch mit Holz und Stroh, betreiben kann. Nach 1900 wurde er jedoch fast vollständig von Otto- und Dieselmotoren verdrängt. Diese haben im Verhältnis zur Leistung ein geringeres Volumen und Gewicht; sie lassen sich auch besser regeln, da dort die Hochtemperatur-Wärme über die Kraftstoffverbrennung zeitgenau dosiert im Zylinderinneren freigesetzt werden kann und nicht wie beim Stirling-Motor thermisch etwas träge von außen zugeführt wird. Stirlingmotoren laufen am Besten bei konstanter Drehzahl.

Auf der anderen Seite bietet der Stirling-Motor eine Reihe von Vorteilen: Bei der stetigen äußeren Verbrennung entstehen weniger Schadstoffe als bei der inneren Verbrennung im Otto-

oder Dieselmotor. Außerdem läuft der Stirling-Motor vergleichsweise leise und vibrationsarm. Da im Inneren nichts verbrennt, bilden sich auch keine Ablagerungen. Dies gewährleistet eine sehr hohe Lebensdauer. Der Wartungsaufwand ist gering, da es keine Ventile und Zündeinrichtungen gibt und auch kein Ölwechsel erforderlich ist.

Heutige Stirling-Motoren sind auf die verschiedensten Energiequellen hin ausgelegt: Technisch am einfachsten ist die Nutzung von Brenngasen hoher Qualität – also von Erdgas, Bioerdgas oder Flüssiggas. Aufwendiger, aber technisch ebenfalls machbar ist die Verfeuerung von Holz-Presslingen (Pellets), Holzhackschnitzeln oder Scheitholz. Mit dem Stirlingmotor lässt sich in Gegenden mit hoher Sonneneinstrahlung auch Solarenergie in mechanische und elektrische Energie umsetzen. Dazu werden Parabolspiegel verwendet, die eine konzentrierte Solarstrahlung mit hoher Temperatur erzeugen, mit der dem Stirling-Motor die erforderliche Hochtemperaturwärme für seinen Antrieb zugeführt wird.

Thermodynamisch besonders vorteilhafter Kreisprozess

Der ideale Vergleichsprozess für den Stirlingmotor ist der rechtslaufende Stirling-Prozess, der aus zwei isothermen Zustandsänderungen (einer Hochtemperatur-Entspannung und einer Nieder-temperatur-Verdichtung bei jeweils gleich bleibender Temperatur) sowie zwei isochoren Zustandsänderungen (einer

Erwärmung und einer Abkühlung bei jeweils gleich bleibendem Rauminhalt) besteht. Bei den beiden isochoren Zustandsänderungen wird eine prozessinterne Wärmeübertragung verwirklicht. Der gesamte Kreisprozess besteht aus der Abfolge von isothermer Nieder-temperatur-Verdichtung, isochorer Erwärmung, isothermer Hochtemperatur-Entspannung und isochorer Abkühlung. Aus thermodynamischer Sicht erreicht der Stirling-Prozess den gleich großen, thermodynamisch höchstmöglichen Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses; sein Wirkungsgrad-Potenzial ist damit höher als das des Otto-Prozesses oder des Diesel-Prozesses. Anders als beim Carnot-Prozess ist die technische Umsetzung beim Stirling-Prozess leichter. Weitere thermodynamische Kenngrößen – die mechanischen und die thermischen Anstrengungsverhältnisse – sind wesentlich günstiger als beim Carnot-Prozess sowie beim Otto- und beim Diesel-Prozess; daher stellt sich der Stirling-Prozess für den Thermodynamiker als besonders günstig dar.

Ölpreisanstieg und Klimadiskussion: Erweckten den Stirlingmotor aus dem Dornröschenschlaf

Der Ölpreisanstieg der letzten Jahre, aber auch die aktuelle Diskussion über die globale Klimaentwicklung haben inzwischen energietechnischen und energie-wirtschaftlichen Themen eine erhöhte Bedeutung verliehen. Auf der Suche nach effizienteren Energietechniken, die zugleich vom Öl unabhängiger machen

LANGFASSUNG

können, beschäftigen sich die Ingenieure wieder verstärkt mit dem Stirling-Motor. Als künftiges Einsatzgebiet des Stirling-Motors gilt nicht der Fahrzeugantrieb, sondern der ortsfeste Einsatz: vor allem die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) – also die energiesparende gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme zur gleichen Zeit in Kleinanlagen. Statt in Ein- und Mehrfamilienhäusern, Großgebäuden oder kleineren Gewerbebetrieben mit einem normalen Kessel nur Wärme zu erzeugen, könnte der Stirling-Motor zugleich Strom und Wärme produzieren. Damit könnte im Bestfall der Wärmebedarf voll und der Strombedarf „vor Ort“ teilweise gedeckt werden. Wenn der Wärmebedarf stark schwankt, kann der Stirling-Motor durch einen normalen Kessel ergänzt werden; dieser kann dann die Spitzen des Wärmebedarfs abdecken und dem Stirling-Motor die Grundlast bei der Wärmeversorgung überlassen, so dass dieser gleichmäßig laufen kann. Solche kleinen Stirling-Heizkraftanlagen sind von einzelnen „Pionier-Firmen“ in den letzten Jahren ausgiebig erprobt worden.

Erdgasbefeuerte Anlagen

- Ein Beispiel hierfür ist die schwäbische Firma Solo, die einen Zweizylinder-Stirling-Motor entwickelt hat, der auf Erdgasbasis eine elektrische Leistung von 2 bis 9 Kilowatt und eine thermische Leistung von 8 bis 16 Kilowatt bereitstellen kann. Der elektrische Wirkungsgrad wird mit 24 Prozent, der Gesamtwirkungsgrad

(bei Nutzung von Strom und Wärme) mit bis zu 96 Prozent angegeben. In einem Dauer-einsatz in einer Berliner Feuerwache erproben die Gasversorgungsunternehmen Gasag und VNG die Tauglichkeit dieses Stirling-Aggregats.

- Das Mannheimer Energieversorgungsunternehmen MVV erprobt erdgasbetriebene Kleinaggregate der neuseeländischen Firma Whispergen, die etwa so groß wie eine Waschmaschine sind und es auf eine elektrische Leistung von 0,7 bis 1,1 Kilowatt sowie eine thermische Leistung von 6 bis 8 Kilowatt bringen. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt – eher bescheidene – 11 Prozent, der Gesamtwirkungsgrad (bei gleichzeitiger Nutzung von Strom und Wärme) bis zu 95 Prozent. Diese „stromerzeugende Heizung“ kann den – zeitlich stark schwankenden – Strombedarf eines Einfamilienhauses nicht voll, sondern zu 25 bis 50 Prozent decken. Feldtests mit diesen Aggregaten laufen auch in Großbritannien und den Niederlanden. Der Hersteller Whispergen bereitet zurzeit die Serienproduktion vor.
- Auch große Hersteller sind dabei, in umfassenden Feldtests die Tauglichkeit von Stirling-Konzepten zu erproben: Der größte europäische Produzent von Heiztechniken, das Unternehmen Bosch-Thermotechnik, testet die Bauart eines erdgasbetriebenen Freikolben-Stirling-Aggregats mit einem Lineargenerator zur Stromerzeugung. Die Wärmeleistung

bei Nur-Stirling-Betrieb kann zwischen 3 und 7 Kilowatt modulieren und parallel dazu zwischen rund 0,4 und 1 Kilowatt elektrische Leistung erzeugen. Der elektrische Wirkungsgrad erreicht etwa 13 Prozent. Über ein zusätzliches Brennwertgerät kann eine gesamte Wärmeleistung von bis zu 24 kW zur Verfügung stehen. Bosch schätzt den Reifegrad seines Vorseeriengerätes als hoch ein. Durch einen Feldtest mit 500 Bosch-Thermotechnik-Geräten und weiteren 500 Geräten des Kooperationspartners MTS mit gleichem Stirlingmotor will man die Marktreife absichern und dann – u. a. zusammen mit dem japanischen Hersteller Rinnai - die Serienfertigung aufnehmen. Bosch Thermotechnik hat seine „stromerzeugende Heizung“ in Abmessung und Leistung auf den Gebäudebestand abgestimmt. Aus Sicht des Unternehmens muss eine solche Technik ähnlich einfach zu warten sein wie ein wandhängender Erdgas-Brennwertkessel.

Biomassebefeuerte Anlagen

Langfristig könnte der Markterfolg der Stirling-Technik nicht zuletzt in der Möglichkeit liegen, kostengünstige erneuerbare Energieträger auf Biomassebasis zu nutzen. Beim Einsatz von Bioerdgas kann dieselbe Technik verwendet werden wie bei der Verwendung von Erdgas. Wesentlich kostengünstigere erneuerbare Energien sind jedoch Holzpellets, Holzhackschnitzel

LANGFASSUNG

und Scheitholz; damit könnte nicht nur ein wachsender Markt in waldreichen Ländern Europas und Nordamerikas, sondern auch in Entwicklungs- und Schwellenländern erschlossen werden. Deshalb konzentrieren sich die Entwicklungsaktivitäten am Stirling-Motor inzwischen auch auf feste Holzbrennstoffe. Die Übertragung der Wärme aus dem Abgasstrom einer Biomassefeuerung auf das Arbeitsgas im Stirling-Motor ist dabei die größte Herausforderung.

Da die Wärmeübertrager mit den aschebeladenen Abgasen direkt beaufschlagt werden, muss der Aufbau einer Ascheschicht verhindert oder zumindest verzögert werden, um einer Verminderung der Wärmeübertragung und damit des Wirkungsgrads vorzubeugen. Zudem hat die Praxis gezeigt, dass die – sich auf der Wärmeübertrageroberfläche ablagernden – Ascheanteile korrosiv wirken können. Um die Wärmeübertragerverschmutzung und -korrosion zu begrenzen, sehen die meisten Hersteller asche- und chlorarme Brennstoffe vor; im größeren Leistungsbereich werden auch automatische Reinigungssysteme erprobt.

Für die Wirtschaftlichkeit einer holzbasierten Anlage zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung ist eine sorgfältige, individuelle Anlagenauslegung entscheidend. Zum Beispiel sind die ersten mit Holz bzw. mit Holzpellets befeuerten Geräte mit einer Wärmeleistung von 12,5 Kilowatt für den Einsatz in einem Standard-Einfamilienhaus

deutlich zu groß, denn die Anlagen sollten wegen ihrer noch vergleichsweise hohen Investitionskosten mindestens 4000 bis 5000 Stunden im Jahr mit Volllast betrieben werden können – also in der Grundlast des Wärmebedarfs. Dies ist bei Geräten mit einer Wärmeleistung von 12,5 Kilowatt nur bei größeren Wärmeverbrauchern, beispielsweise bei größeren Mehrfamilienhäusern oder bei Gewerbebetrieben, zu erwarten.

Was bietet der Markt?

- Der in Liechtenstein beheimatete Wärmetechnik-Hersteller Hoval hat ein Stirling-Aggregat mit einer elektrischen Leistung von etwa 1 Kilowatt entwickelt, das die erforderliche Hochtemperatur-Wärme aus einem Stückholz-Kessel bekommt; dabei wird ein im Markt bewährter Standard-Stückholz-Heizkessel eingesetzt. Ein Teil der freigesetzten Heizenergie wird für den teilintegrierten Stirling-Motor genutzt. Der Heizkessel arbeitet mit einem dreistufigen Verbrennungsverfahren und verfeuert Stückholz mit bis zu 15 Zentimetern Durchmesser und bis zu 0,5 Metern Länge sowie Grobhackgut bzw. Holzbriketts. Beim Start wird das Stückholz getrocknet und erhitzt. Hierbei entsteht Holzgas, das zusammen mit der vorgewärmten Sekundärluft in die Brennkammer gelangt. Die Verbrennung findet vor dem Wärmeübertragerkopf des Stirling-Motors statt, wobei die Sekundärluft für einen

vollständigen Ausbrand mit Hilfe einer Lambda-Sonden-Regelung zugemischt wird. Weil der mit dem Stirling-Motor gekoppelte Generator auch als Anlasser fungiert, kann der Stromerzeuger in Abhängigkeit von der Erhitzertertemperatur technisch einfach gestartet werden. Eine Pilotanlage wurde im Jahr 2007 in Sulzbach in Betrieb genommen und inzwischen betriebstechnisch optimiert – vor allem um ein unerwünschtes häufiges Takten des Stirling-Motors zu begrenzen.

- Eine weitere Entwicklung wurde von der österreichischen Firma Mawera vorangetrieben, die vollständig im Besitz des deutschen Heiztechnik-Großunternehmens Viessmann ist. Bei dieser dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage wird ein Vierzylinder-Stirling-Motor mit einer elektrischen Leistung von 35 Kilowatt verwendet, der vom Unternehmen Stirling Denmark vertrieben wird. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzentrierten sich auf die Gestaltung der Biomasse-Feuerung, die von Mawera in Zusammenarbeit mit Bios Bioenergiesysteme, Graz, konzipiert wurde. Durch die Verwirklichung einer Hochtemperaturfeuerung bei 1300 °C wurden die Voraussetzungen für einen vertretbar guten elektrischen Wirkungsgrad von 18 Prozent geschaffen. Um bei diesen hohen Temperaturen eine

LANGFASSUNG

Verschlackung des Erhitzer-Wärmeübertragers des Stirling-Motors zu unterbinden, werden hier nur Brennstoffe mit hohem Ascheschmelzpunkt und niedrigem Chlorgehalt verwendet - insbesondere Hackschnitzel, Holzpellets und Sägespäne mit einem geringen Rindeanteil. Zusätzlich wurde der Erhitzer-Wärmeübertrager mit einem automatischen Abreinigungssystem auf Druckluftbasis ausgerüstet. Nach dem Wärmeübertrager des Stirling-Motors weist das Rauchgas noch eine Temperatur von etwa 800 bis 850 °C auf. Sie wird zur Vorwärmung der Verbrennungsluft genutzt. Die restliche Wärmemenge wird in einem nachgeschalteten weiteren Wärmeübertrager an ein Prozesswärme- oder Heizsystem abgegeben. Die Wärmeabfuhr im Kühler-Wärmeübertrager des Stirlingmotors erfolgt durch eine Vorwärmung des Heizungsrücklaufs.

- Das Unternehmen Stirling Denmark zielt mit seinen Entwicklungen ganz auf die Verfeuerung von Biomasse; das Stirling-Aggregat mit einer elektrischen Leistung von 35 Kilowatt ist beispielsweise für Nahwärmekonzepte zur Wärmeversorgung von rund 50 Einfamilienhäusern vorgesehen. Dieses Aggregat soll nach Firmenangaben noch 2008 in Serienfertigung gehen. Als Entwicklungsziel strebt das Unternehmen eine modulare Baureihe bis zu einer elektrischen Leistung von 500 Kilowatt an. Vorgesehen

sind auch Varianten für die Nachrüstung von bestehenden Biomasse-Feuerungsanlagen.

- Die deutsche Firma Sunmachine hat eine Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage mit Stirlingmotor entwickelt, die mit Holzpellets befeuert wird und eine elektrische Leistung von bis zu 3 Kilowatt erzeugt. Hierzu wurde eine spezielle Verbrennungstechnik entwickelt: Die Holzpellets werden über eine Förderschnecke vom Vorratsbehälter auf einen Heizrost gebracht und dort vollständig in ein Brenngas umgewandelt. Dieses Gas wird über eine Unterdrucksteuerung nach unten gesaugt, entzündet und in einem Sturzbrenner bei einer Temperatur von etwa 850 °C verbrannt. Die Flamme überträgt Wärme unmittelbar auf den Erhitzerkopf der Einzylinder-Stirlingmaschine, in der Stickstoff als Arbeitsmittel eingesetzt wird. Die Stromerzeugung erfolgt



Bild 1: Pellet-befeuerte Stirling-Micro-KWK von Sunmachine

über einen – in den druckdichten Bereich integrierten – Generator in einem Leistungsbereich zwischen 1,5 und 3 Kilowatt. Als thermische Leistung stehen zwischen 4,5 und 10,5 Kilowatt zur Verfügung. Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage wird mit etwa 90 Prozent angegeben.



Bild 2: Vierzylinder-Stirlingmotor mit einer elektrischen Leistung von 1 kW zur Nachrüstung auf Pelletkesseln von KWB und Ökofen

- Um das Stirling-Konzept auch für den Einfamilienhausbereich zu nutzen, arbeitet die österreichische Firma Stirling Power Module Energieumwandlungs GmbH an einem Vierzylinder-Stirlingmotor mit einer elektrischen Leistung von 1 Kilowatt. Dieser wird voraussichtlich zunächst als Nachrüstmodul für Pellet-Heizkessel angeboten (Hersteller: KWB Biomasseheizungen und Ökofen). Der Vertriebsbeginn ist für Mitte 2009 angekündigt.

LANGFASSUNG

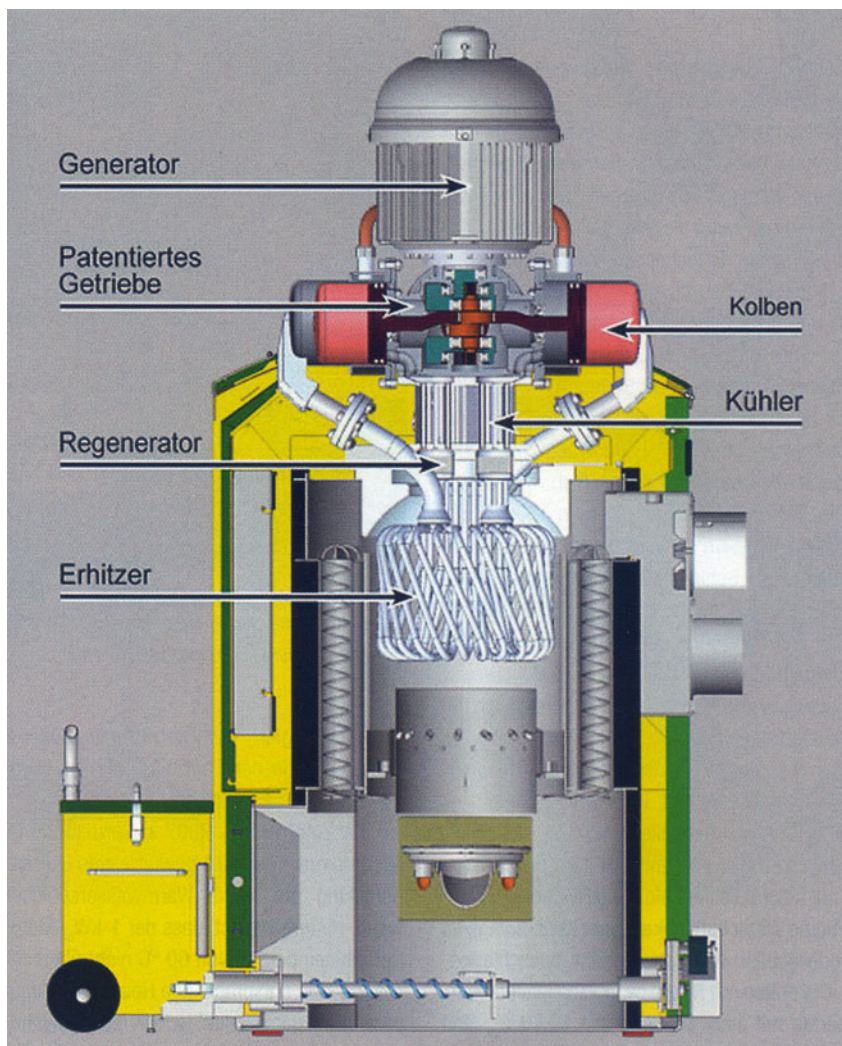


Bild 3: Schnittbild des Vierzylinder-Stirlingmotors von SPM auf einem KWB-Pelletkessel

Wie steht es mit der Wirtschaftlichkeit?

Die Wirtschaftlichkeit einer Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage kann nur dann erreicht werden, wenn der Wärmeverbraucher die Wärme möglichst gleichmäßig und über eine möglichst lange jährliche Laufzeit abnimmt: 4000 bis 5000 Vollbetriebsstunden im Jahr sollten mindestens erreicht werden. Eine weitere Bedingung ist ein ausreichend hoher Grundleistungs-Strombedarf, weil unter normalen Bedingungen eine Verminderung des Strombezugs günstiger als die

Netzeinspeisung ist. Mit bisher am Markt verfügbaren Geräten ist eine Wirtschaftlichkeit in Einfamilienhäusern nur schwer zu erzielen. Bei größeren Gebäuden – etwa größeren Mehrfamilienhäusern und Verwaltungsgebäuden – ist bei sachgerechter Dimensionierung wegen der höheren Wärme-Grundlast eine Wirtschaftlichkeit erheblich einfacher zu erreichen.

Für dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen) – insbesondere auf Basis erneuerbarer Energien – werden

zum Teil hohe Subventionierungen gewährt: Entsprechend dem novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetz gelten ab Anfang 2009 die folgenden Regelungen: KWK-Anlagen bis zu einer elektrischen Leistung von 150 kW erhalten eine Grundvergütung von 11,67 Ct je Kilowattstunde eingespeisten Stroms. Hinzu kommen bei Nutzung der abgegebenen Wärme ein KWK-Bonus sowie beim Stirling-Motor ein Technologiebonus in Höhe von jeweils 3,0 Ct/kWh. Für Stirling-Klein-KWK-Anlagen kann damit ab 2009 mit einer Vergütung von 17,67 Ct/kWh gerechnet werden. Für den Fall, dass zur Befuerung des Stirling-Motors nachwachsende Rohstoffe nach den Bestimmungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes eingesetzt werden, erhält der Nutzer ab 2009 einen zusätzlichen Bonus von 3,0 Ct/kWh, woraus sich eine maximale Stromvergütung von 20,67 Ct/kWh ergibt.

Die Investition für eine Klein-KWK-Anlage kann zudem im Rahmen des CO₂-Programms der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) mit zinsgünstigen Krediten und Investitionszuschüssen gefördert werden. Unter Umständen können auch Förderprogramme der Länder und regionale Initiativen der Energieversorger in Anspruch genommen werden.

Zusammenfassende Bewertung

Die hohen Fördersätze begünstigen die Markteinführung von dezentralen KWK-Anlagen mit

LANGFASSUNG

Stirling-Motor – nicht nur auf Erdgas-Basis, sondern vor allem auch auf Biomasse-Basis. Fachleute erwarten, dass Mikro- und Klein-KWK-Aggregate mit Stirling-Motor als „stromerzeugende Heizung“ erheblich schneller als Brennstoffzellen-Heizgeräte auf den Markt kommen. Die Preisentwicklung bei fossilen Brennstoffen rückt dabei insbesondere Entwicklungen auf der Basis fester Biomasse in den Blickpunkt. Allerdings sollten zunächst keine überzogenen Erwartungen in die Markterschließung und -durchdringung gesetzt werden: So hat es beispielsweise über 25 Jahre gedauert, bis in Deutschland die – technisch relativ einfache und betriebssichere – Brennwertechnik bei Heizkesseln auf Gas- und

Ölbasis einen Anteil von rund 15 Prozent im Bestand von Haus-Heizungsanlagen erreicht hat.

Aus technischer Sicht weist der Stirling-Motor noch ein erhebliches Potenzial auf, da die Entwicklung bisher mit begrenztem Aufwand vor allem von Kleinfirmen vorangetrieben wurde. So sind z. B. die bisher erreichten, meist recht begrenzten elektrischen Wirkungsgrade noch wesentlich verbesserungsfähig. Die Entwicklung anderer Kolbenmotorenbauarten – vor allem Otto- und Diesel-Motoren – wurde dagegen wegen deren Vorteilen beim Einsatz in Kraftfahrzeugen über lange Zeiträume mit großem technischem und finanziellem Aufwand vorangetrieben; dabei wurden eine hohe Effizienz und ein guter Reifegrad

erreicht. Aus diesem Blickwinkel kann längerfristig ebenso der technische Stand des Stirling-Motors noch deutlich erhöht werden. Dabei könnten neue Werkstoffe – etwa auch keramische Werkstoffe – bei der Steigerung von Leistung und Wirkungsgrad eine wichtige Rolle spielen. Die Entwicklungsingenieure hoffen, dass in absehbarer Zeit Stirling-Motoren auch als kleine Motoren und auch im Teillastbereich höhere Wirkungsgrade als bisher erreichen können. ■

Abbildungen:

Verwendung von Bild 1 mit freundlicher Genehmigung der Sunmachine GmbH.

Verwendung der Bilder 2 und 3 mit freundlicher Genehmigung der SPM GmbH (www.stirlingpowermodule.com).