

Mikro-BHKWs mit Stirlingmotor

Auf dem Weg in eine erfolgreiche Zukunft?

Der sich entwickelnde Trend, in Zukunft statt großer Kraftwerke vermehrt kleinere dezentrale Erzeugereinheiten mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zu nutzen, hat sich bereits bis in die Hausenergie-technik ausgedehnt – mit kleinen Blockheizkraftwerken für die gleichzeitige Versorgung mit Strom und Wärme. Wurden solche Mikro-BHKWs bislang in erster Linie mit Ottomotoren betrieben, drängen jetzt zunehmend Stirlingmotoren als Antriebsmaschinen in den Vordergrund.

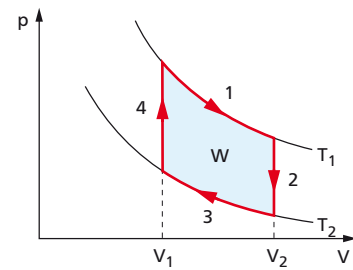
Die verstärkte Entwicklung kleinerer dezentraler Energiesysteme liegt vor allem in der staatlichen Förderung einer ökologisch nachhaltigen Energieversorgung begründet. Diese kommt nämlich nicht nur der Sonnen- und Windenergie zugute, sondern auch der Energieerzeugung nach dem KWK-Prinzip. Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) hat auf seiner Website (www.bafa.de) eine Liste der Anlagen, die gefördert werden können, und Hinweise auf die Höhe des Zuschusses veröffentlicht.

Das wesentliche Merkmal der KWK besteht darin, dass der Brennstoffkonversion (also der Umwandlung der chemisch gebundenen Energie eines Brennstoffs in heißes Rauchgas und der sich anschließenden Stromerzeugung) ein dritter Schritt folgt: nämlich die Nutzwärmeerzeugung (Bild 1). Damit ist die aus Gründen der Energieeffizienz gebotene Forderung nach einer höchstmöglichen Brennstoffausnutzung erfüllt: Der Gesamtwirkungsgrad der Energieerzeugungsanlage wird durch die Einbeziehung der bei der Stromerzeugung anfallenden Verlustwärme wesentlich erhöht.

In diesem Zusammenhang eine Anmerkung zu der Marketing-Idee, Mikro-BHKWs als „Strom erzeugende Heizung“ zu bezeichnen: Der Begriff mag zwar sehr werbewirksam sein und den Kunden wohl dazu verleiten, in erster Linie an die Wärmeerzeugung zu denken, also an eine Heizung mit der angenehmen Eigenschaft, nebenbei Strom zu erzeugen. Physikalisch und technisch gesehen ist es jedoch genau umgekehrt: Die Stromerzeugung steht bei einem BHKW notwendigerweise an erster Stelle; ohne Stromgenerator keine Heizung, wie die in Bild 1 aufgezeigten Prozessschritte zeigen.

Man müsste also korrekterweise von einem „heizenden Stromerzeuger“ sprechen.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas von der Hochschule Reutlingen verteidigt jedoch auf Nachfrage die erstgenannte Bezeichnung u. a. mit der Begründung, ein BHKW könne theoretisch so schlecht funktionieren, dass es zwar Wärme, aber keinen Strom produziere, weil dieser beispielsweise durch die Nebenaggregate aufgezehrt werde. Zudem sei der Begriff von der ASUE eingeführt und mittlerweile in Fachkreisen angenommen worden.



2 p-V-Diagramm zum Stirling-Kreisprozess

BHKWs mit Gas- oder Dieselmotor

Zunächst einmal – zum Vergleich – ein Blick auf BHKWs, deren Antriebsmaschine ein Otto- oder ein Dieselmotor ist. Diese sind starr oder über eine Kupplung mit einem Elektrogenerator verbunden und meistens mit diesem auf einem gemeinsamen Tragrahmen schwingungsarm montiert. Kleinere BHKWs (bis etwa 200 kW elektrischer Leistung) werden als anschlussfertige Einheiten geliefert: Alle Anlagenkomponenten sind in einem schallgeschützten Gehäuse untergebracht. Dazu zählen neben dem Motor und dem Generator mehrere Wärmetauscher für die Auskopplung von Abwärme aus dem Kühlmittel-, Abgas- und Schmierölkreislauf. Auch Regelung und Steuerung sind bei den markt gängigen Modellen in der Kompakteinheit enthalten.

Da Antriebsmotoren aus der Serienfertigung der Automobilindustrie nicht für jeden Einsatzbereich geeignet sind, haben die BHKW-Hersteller mittlerweile eigenständige Entwicklungen auf den Markt gebracht. Je nach Verwendungszweck nutzen sie unterschiedliche Hubkolbenmaschinen:

- Für Mikro-BHKWs genügen fast immer Einkolbenmotoren kleiner Leistung.
- In größeren BHKWs für gasförmige Brennstoffe steckt meistens ein Viertakt-Ottomotor, der in der Regel als Magermotor ausgelegt ist, weil sich so die vorgegebenen Grenzwerte für Schadstoffemissionen selbst ohne den Einsatz von Katalysatoren einhalten lassen. Er hat zudem den Vorteil, dass er nicht nur Erdgas verbrennen kann, sondern auch Gas mit Verunreinigungen durch Schwefel, Chlor oder Fluor.
- Standard für die Verbrennung von Heizöl und anderen flüssigen Stoffen ist der Viertakt-Dieselmotor. BHKWs mit Dieselmotoren erreichen einen dem Gasmotor-BHKW gegenüber höheren elektrischen Wirkungsgrad bei gleichem Gesamtwirkungsgrad. Im Nachteil sind Dieselmotoren bei dem Bemühen um die Verringerung von Schadstoffemissionen. Um die für Magermotoren geltenden Grenzwerte einhalten zu können, müssten sie mit zusätzlichen Katalysato-



1 Prozessschritte bei der Kraft-Wärme-Kopplung

ren ausgestattet werden, was jedoch mit unverändert hohen Kosten verbunden wäre. Deswegen erlauben die Vorschriften für kleinere Dieselmotoren höhere Schadstoffwerte. Die Dieselaggregate der meisten Hersteller sind heute mit einem Abgas-Rußfilter ausgerüstet.

Beide Motortypen lassen beim Einsatz in BHKWs Laufzeiten bis zu 100.000 h erwarten. Sie sind schon einige Zeit am Markt eingeführt und weisen mit Abstand die höchsten Verkaufszahlen auf.

Mikro-BHKWs mit Stirlingmotor

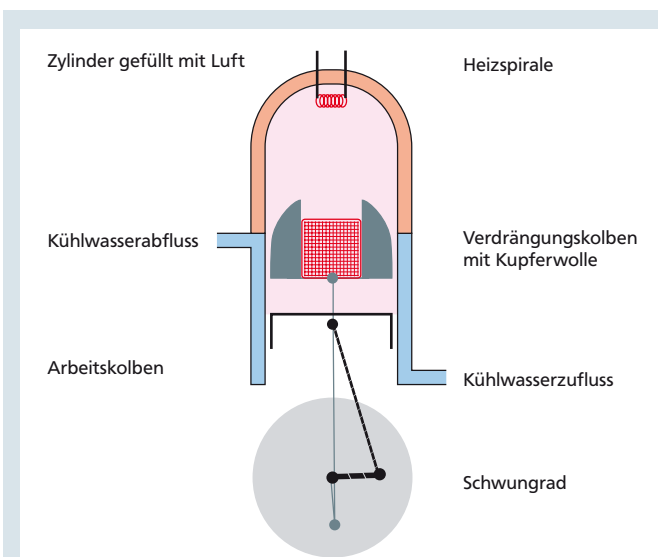
Neu und zum Teil erst in der Probephase sind Mikro-BHKWs mit Stirlingmotor, einer Maschine, die Wärme unterschiedlicher Temperatur (also ein Wärmegefälle) in mechanische Rotationsenergie umwandelt. Dabei wird die thermische Energie von außen an die Zylinder des Motors herangeführt, muss also nicht wie beim Benzin- oder Dieselmotor im Innern durch Verbrennung von Brennstoffen erzeugt werden. Damit öffnet sich eine Reihe von Möglichkeiten: Der Stirlingmotor, auch Heißluftmotor genannt, kann mit beliebigen Wärmequellen arbeiten, z. B. mit Sonnenenergie, mit der Abwärme technischer Prozesse oder mit Wärme aus der Verbrennung von Bio- oder Deponiegas, um nur einige zu nennen.

Stirlingmotoren verursachen verhältnismäßig wenig Emissionen und arbeiten geräuscharm. Das hat schon vor Jahrzehnten dazu geführt, dass Marinestreitkräfte vieler Staaten sie auf U-Booten einsetzten, wo besonders leise Aggregate vonnöten waren, um dem Gegner nicht unnötig den eigenen Standort zu verraten. Und ebenso gut könnten heute Stirling-BHKWs im Wohnbereich aufgestellt werden. Neben dem geräuscharmen und vibrationsfreien Lauf zeichnen sie sich durch einen nahezu verschleißfreien Betrieb aus, was die Wartungskosten stark reduzieren kann. Den geringen elektrischen Wirkungsgraden von etwa 15 % stehen dank geringer Wärmeverluste hohe thermische Wirkungsgrade gegenüber, so dass sich Gesamtwirkungsgrade von über 90 % einstellen können.

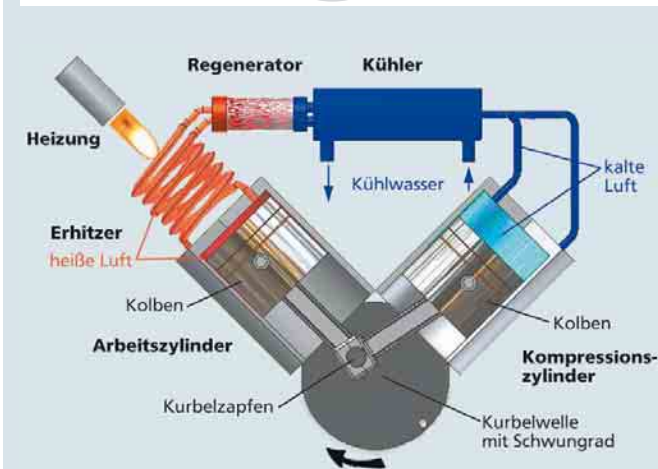
Unterschiedliche Ausführungen

Der ideale Stirling-Kreisprozess stellt eine Abfolge von Zustandsänderungen dar, die abwechselnd isotherm (ohne Temperaturveränderung) und isochor (ohne Volumenänderung) vonstatten gehen:

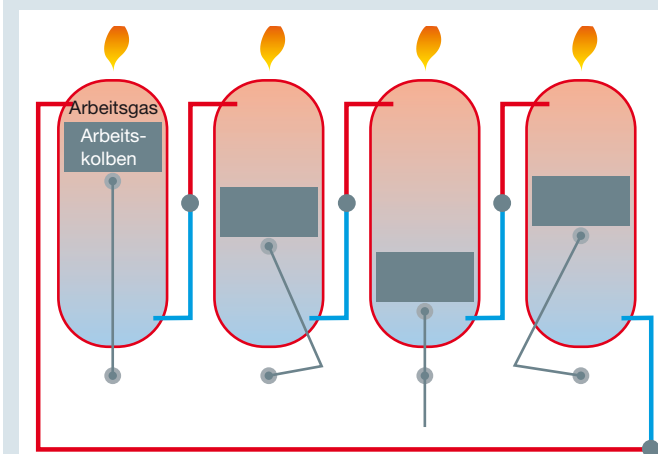
1. Einem Zylinder wird Gas mit der Temperatur T_1 Wärme zugeführt. Das Gas expandiert isotherm unter Verrichtung mechanischer Arbeit vom Volumen V_1 auf das Volumen V_2 (siehe Bild 2: p-V-Diagramm).
2. Das Gas wird isochor unter Abgabe von Wärme auf die Temperatur T_2 abgekühlt.



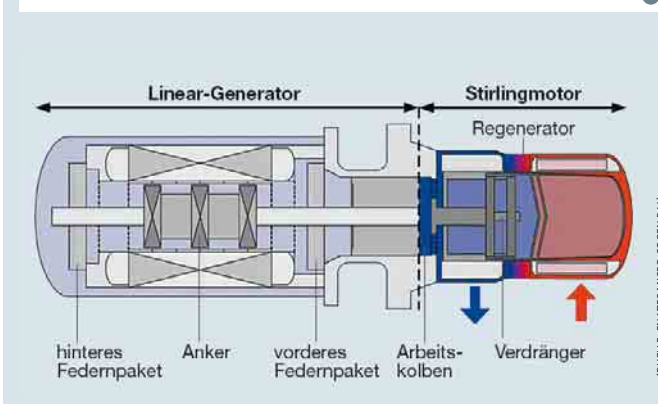
3 Funktionsprinzip eines Ein-Zylinder-Stirlingmotors (β-Typ)



4 Prinzipieller Aufbau eines Zwei-Zylinder-Stirlingmotors (α-Typ)



5 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines 4-Zylinder-Stirlingmotors, Bauart WhisperGen



6 Schema Freikolben-Stirlingmotor

3. Am Gas wird mechanische Arbeit verrichtet. Dabei wird es solange komprimiert, bis es das Ausgangsvolumen V_1 wieder erreicht hat. Bei der isothermen Kompression muss es Wärme an die Umgebung abgeben.
4. Durch Zufuhr von Wärme wird das Gas isochor auf die Anfangstemperatur T_1 erwärmt. Damit ist der Ausgangszustand wieder erreicht.

Einzyklindrische Ausführung

Es gibt bei Stirlingmotoren unterschiedliche Ausführungen. Der so genannte β -Typ (Bild 3) besteht aus einem Zylinder, in dem sich ein Arbeitskolben und ein Verdrängungskolben mit einer Phasenverschiebung von 90° bewegen. Im oberen Teil des Zylinders wird das Arbeitsmedium Luft erhitzt, im unteren abgekühlt (statt Luft kommt je nach Anlage auch Helium zum Einsatz). Der Verdrängungskolben hat die Aufgabe, die eingeschlossene Luft vom oberen in den unteren bzw. vom unteren in den oberen Teil des Zylinders zu verschieben. Der Verdrängerkolben besitzt eine Öffnung, die mit Kupferwolle ausgefüllt ist. Beim „Luftverdrängen“ strömt die Luft durch die Kupferwolle, die dabei je nach Position Wärmeenergie aufnimmt oder wieder abgibt. Wegen dieser Funktion wird die Kupferwolle Regenerator genannt. Das spezielle Merkmal dieser Ausführung ist, dass Verdränger- und Arbeitskolben in einem Raum untergebracht sind.

Es lassen sich analog zu dem oben aufgezeigten Kreisprozess folgende Phasen unterscheiden:

1. Takt, Expansionsphase: Im oberen Teil des Zylinders wird die Luft erhitzt, der dabei entstehende Druck bewegt den Arbeitskolben nach unten.
2. Takt: Der um eine Viertelperiode vorausseilende Verdrängungskolben bewegt sich nach oben, die Luft strömt durch die Kupferwolle des Regenerators in den unteren Teil des Zylinders, gibt dabei ihre Wärmeenergie an die Kupferwolle ab und kühlt sich dadurch ab.
3. Takt, Kompressionsphase: Der Arbeitskolben bewegt sich nach oben und komprimiert dabei die Luft. Die bei der Kompression entstehende Wärme wird sofort an den Kühlmantel abgegeben.
4. Takt: Der Verdrängungskolben drückt die Luft in den oberen Zylinderteil, wobei sie von der Kupferwolle im Regenerator Wärmeenergie aufnimmt.

Zweizyklindrige Ausführung

Für mittlere bis große Leistungen gedacht ist der α -Typ (Bild 4). Er arbeitet mit zwei V-förmig aufgebauten Zylindern. Der Motor verfügt über einen Verdichtungs- und einen Arbeitszylinder, zwischen denen das Arbeitsgas in einem geschlossenen Kreisprozess hin- und hergeschoben wird. Im Verdichtungszyklus erfolgt bei niedriger Temperatur unter Wärmeabfuhr an das

Kühlwasser die Kompression, beim isochoren Übertreiben in den Arbeitszylinder nimmt das Gas Wärme aus dem Regenerator und erwärmt sich dadurch auf etwa 650°C . Bei der isothermen Expansion im Arbeitszylinder wird ihm im Erhitzer Wärme zugeführt; danach erfolgt das Zurückschieben in den Kompressionszylinder, wobei es Wärme an den Regenerator abgibt und sich abkühlt.

Der Erhitzer besteht aus Röhrchen, die von der Wärmequelle auf etwa 700°C erwärmt werden, der Arbeitsgaskühler aus einem von Kühlwasser durchströmten Röhrchenbündel und der Regenerator, der einen thermischen Speicher zwischen den beiden Temperaturniveaus darstellt, aus einem Paket von Drahtsieben.

Um Strömungsverluste in den Wärmeübertragern zu verringern, wird als Arbeitsgas meist Helium verwendet.

Vierzylindrige Ausführung

Eine Weiterentwicklung ist die Vierzylinderausführung, die in Bild 5 schematisch dargestellt ist: Das Arbeitsgas in den Zylindern wird von außen erwärmt (z. B. über einen Erdgasbrenner), dehnt sich aus und presst den Arbeitskolben nach unten. Dadurch wird Arbeitsgas von der kalten Seite unterhalb des Kolbens auf die heiße Seite des folgenden Zylinders geschoben, wodurch diese heiße Seite abkühlt.

Durch den dabei entstehenden Unterdruck wird der Arbeitskolben wieder nach oben gesaugt.

Der Freikolben-Stirlingmotor

Der Freikolben-Stirlingmotor (auf englisch: Free Piston Stirling Engine – FPSE) ist eine Erfindung, die das bewährte Stirlingprinzip mit einem modernen Linear-Generator kombiniert (Bild 6). Auch hier hat der Stirlingmotor zwei bewegliche Teile: den Arbeitskolben und den Verdrängerkolben. Die erzeugte Leistung wird am Arbeitskolben freigesetzt, der anschließend den Anker des Linear-Generators antreibt. Über den Anker wird die mechanische Energie schließlich in Elektrizität umgesetzt. Alle beweglichen Teile machen eine schwingende Bewegung in axialer Richtung, kommen also ohne Rotation aus, was einen sehr geräusch- und wartungsarmen Betrieb gewährleistet.

Der Stirlingmotor selbst besteht aus einer warmen und einer kalten Zone. Die warme Zone (im Bild rot) wird von einem Gasbrenner erwärmt, die kalte Zone (blau) mit Wasser gekühlt. Das Arbeitsgas (Helium) wird vom Verdrängerkolben zwischen der warmen und kalten Zone hin- und hergeführt, wobei das Gas an der Grenze beider Zonen einen Regenerator durchquert. Der Regenerator funktioniert wie ein Wärmespeicher, der das kalte Gas erwärmt, wenn es in die heiße Zone strömt und abkühlt, wenn es wieder in die kalte Zone zurückgelangt.

In den Startlöchern

Da die für den Stirling-Kreisprozess benötigte thermische Energie von außen an die Zylinder des Motors herangeführt wird, lassen sich beliebige Wärmequellen bzw. Wärmeträger nutzen. In sehr vielen Fällen dürfte Erdgas oder Biogas eingesetzt werden; zurzeit, das zeigen die Reaktionen der Entwickler, wollen auch viele Kunden offensichtlich Holzpellets verfeuern. Für die Zukunft ist zudem die Verbrennung von Wasserstoff denkbar. Die in den folgenden Kapiteln genannten Technologien und Geräte sind in der Entwicklung oder befinden sich in der Markteinführung; die Aufzählung ist aber keinesfalls vollständig. Neuere Informationen gibt es möglicherweise auf der Website „www.stromerzeugende-heizung.de“, die hin und wieder aktualisierte Meldungen herausgibt.

Erdgasbetriebenes Mikro-BHKW mit 4-Zylinder-Stirlingmotor

Das Joint-Venture-Unternehmen „Efficient Home Energy“ – eine Partnerschaft der Whisper Tech Limited und der Gruppe Mondragón – startete Anfang Oktober vergangenen Jahres im nordspanischen Tolosa eine Serienproduktion erdgasbetriebener Stirling-Mikro-BHKWs der Marke WhisperGen (mit „4 cylinder double-acting Stirling cycle“). Nach Jahren der Forschung und Entwicklung ist das kleine Wärmekraftwerk für die Strom- und Wärmeerzeugung aus Erdgas jetzt marktreif. Zuvor waren bereits etwa 1000 dieser Maschinen in Feldtests in Großbritannien und den Niederlanden auf ihre Tauglichkeit überprüft worden – mit positivem Ergebnis. Damit steht der WhisperGen endlich auch in Deutschland vor der Markteinführung. Das elektrische Leistungsvermögen beträgt bis zu 1 kW_{el} , die Heizleistungen reichen von $7,5$ bis 12 kW_{th} . Von der Leistung her gesehen können die Aggregate damit Wohnhäuser sowie kleine Büro- und andere Zweckbauten problemlos mit Strom und Wärme versorgen.

Freikolben-Stirling mit Linear-Generator

Das Unternehmen Sunpower aus Athens (Ohio), Erfinder der Freikolben-Technologie für Stirlingmotoren und nach eigenen Angaben Weltmarktführer in diesem Segment, hat bereits eine Reihe dieser „Free Piston Stirling Engines“ (FPSE) mit Leistungen im Bereich von 35 W_{el} bis $7,5\text{ kW}_{\text{el}}$ entwickelt und ausgeliefert. Der Stirlingprozess lässt sich mit Biomasse, mit flüssigen und gasförmigen Energieträgern sowie mit Sonnenenergie betreiben. Für die Stromerzeugung sorgt ein Linear-Generator. Sunpower entwickelt auch Prototypen für OEMs und berücksichtigt dabei deren spezielle Wünsche.

Ebenfalls auf der Basis der Stirling-Freikolbentechnologie (von Infinia) wollen Bosch Thermotechnik, Enatec micro-cogen (Niederlande), Merloni TermoSanitari-MTS

(Italien) und Rinnai (Japan) gemeinsam ein Mikro-BHKW entwickeln. Die vier Unternehmen haben eine Kooperation vereinbart, um diese Form der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zur Marktreife zu führen. Die Produktion eines ersten Moduls erfolgt durch Rinnai. Die Kooperationsvereinbarung sieht vor, dass Bosch Thermotechnik und MTS von 2008 bis 2010 insgesamt mehr als 1000 mit Gas betriebene Geräte der ersten Generation im Rahmen eines europaweiten Feldversuchs installieren und testen. Dies wäre weltweit der bisher größte für die Stirling-Technologie unternommene Feldversuch. Darauf aufbauend wollen die vier Kooperationspartner gemeinsam ein mit Gas betriebenes Stirling-Heizgerät der zweiten Generation entwickeln. Rinnai verfolgt dabei das Ziel, ein speziell für Japan angepasstes System auf den Markt zu bringen. Bosch Thermotechnik und MTS fokussieren sich auf die Anpassung des Gesamtsystems an die Anforderungen des europäischen Markts. Die Serienproduktion des Stirling-Heizgeräts der zweiten Generation soll ebenfalls durch Rinnai erfolgen und ab 2011 anlaufen. Die Vermarktung wollen Bosch Thermotechnik, MTS und Rinnai jeweils getrennt vornehmen. Die Firma OTAG arbeitet in ihrem BHKW mit einem dampfgetriebenen Freikolben-

system, das ebenfalls einen integrierten Linien-Generator antreibt. Als Brennstoff dient Erdgas oder Flüssiggas, Geräte für andere Energieträger befinden sich noch in der Entwicklung. Die elektrische Leistung reicht von 0,3 bis 2,0 kW, die thermische von 3,0 bis 16,0 kW. Der gasbetriebene „lion-Powerblock“ ist bereits seit einiger Zeit lieferbar. Im vergangenen August stellte OTAG ein Aggregat für den Betrieb mit Pellets vor. Dieser „Pellet-lion“ wird im Jahr 2009 im Feldversuch erprobt und voraussichtlich ab April 2010 verfügbar sein. Für Ende 2009 ist vorgesehen, mit einem modulierenden Ölbrenner in den Feldtest zu gehen. Bei dieser Ausführung sollen sowohl Heizöle als auch Bioöle einsetzbar sein.

BHKWs für die Verfeuerung von Holzpellets

Ein Beispiel für den Betrieb eines Stirling-BHKWs mit Pellets liefert die Firma SPM-Stirling Power Module Energieumwandlungs GmbH aus Österreich. Gemeinsam mit der Firma KWB, einem Biomasse-Kesselhersteller, hat SPM in einigen Jahren Entwicklungsarbeit ein Konzept entwickelt, das die Umwandlung einer einfachen Pelletheizung zu einem Mikro-BHKW ermöglicht – durch die Kombination mit einem neu entwickelten 4-Zylinder-Stirling-

Modul. Der nachgeschaltete Generator hat eine Leistung von 1 kW_{el}, die thermische Leistung beträgt 15 kW.

Auch die Firma Sunmachine GmbH aus Wildpoldsried entwickelt und baut Mikro-BHKWs für die Beheizung mit Pellets. Der 1-zylindrische Stirlingmotor treibt den Generator zu einer elektrischen Leistung von 3 kW, die thermische wird im Datenblatt mit 10,5 kW angegeben. Die Sunmachine Pellet (so der Name des ersten marktreifen Produkts) wird seit Anfang August 2008 im nahe gelegenen Kaufbeuren in Serie produziert. Weitere Geräte wollen die Allgäuer im laufenden Jahr 2009 auf den Markt bringen: ein Sunmachine Bioerdgas, ein Sunmachine Kryo für die Erzeugung extremer Tiefsttemperaturen und ein Sunmachine Solar, das Strom und Wärme aus Sonnenlicht erzeugt.



Der Autor

*Wilhelm Wilming,
freier Fachjournalist,
Ahaus*