

Mikro-BHKW mit Stirlingmotor

H. Buers, Berlin

Stirlingmotoren haben lange gebraucht, bis sie den ihnen gebührenden Platz unter den innovativen Energieerzeugern gefunden haben. Sie werden vorzugsweise als Antriebsmaschinen in Blockheizkraftwerken eingesetzt und könnten damit einen Trend verstärken, der statt großer Kraftwerke kleinere Erzeugereinheiten wie Mikro-BHKW bevorzugt. Damit werden sie wie beispielsweise Windenergieanlagen und Solargeneratoren zu dezentralen Energieversorgungsanlagen, durch die sich die bestehenden Netzstrukturen ändern werden.

1 Einleitung

Bei der Vielfalt an Ratschlägen und Werbebotschaften aus dem Bereich erneuerbare Energien geht schnell die Übersicht verloren: Geht es um das Klima und das gefürchtete CO₂? Oder soll die Abhängigkeit von Energieimporten gemindert werden? Dienen Förderprogramme dazu, Technologien zum Durchbruch zu verhelfen oder sollen sie heimische Märkte stärken? Sind gar ethische Bedenken im Spiel, weil die Menschheit die Energievorräte plündert? Oder geht es ganz einfach nur um den Geldbeutel von Investoren und Produzenten? – Es ist schwer, im globalen Energie-Monopoly den Durchblick zu behalten. Gut beraten ist, wer trotz aller Appelle und Verlockungen einen klaren Kopf behält, die Spreu vom Weizen trennt und sich die Frage stellt, warum er überhaupt diesem oder jenem Versprechen einer Energiesparlösung Glauben schenken soll. Beim Thema dieses Beitrags – Mikro-BHKW mit Stirlingmotor in KWK-Technologie – muss die Frage ganz nüchtern lauten: Was bringt denn nun eine solche Anlage für die Energieversorgung meines Wohnhauses, Bürogebäudes oder kleinen Gewerbebetriebs? Die Antwort lautet: Ein Mini-BHKW, ob mit Otto- oder Stirlingmotor, nutzt den eingesetzten Brennstoff in der Regel zu einem höheren Grad aus, arbeitet also energieeffizienter als ein Strom- oder Wärmeerzeuger ohne die Technik der Kraft-Wärme-Kopplung. Bescheidene Aussichten also? Immerhin hat nach Ansicht vieler Experten die Erhöhung der Energieeffizienz die gleiche Priorität wie der Ausbau der erneuerbaren Energien, denn auf diese Weise kann zumindest die zeitliche Verfügbarkeit der fossilen Energieträger verlängert und die mit deren Umsetzung verbundene Umweltbelastung in Grenzen gehalten werden. Mit der Kraft-Wärme-Kopplung steht eine

energiesparende Technologie zur Verfügung, die mit der Entwicklung von Mikro-BHKW mit einer elektrischen Leistung unterhalb von 15 kW_{el} auch in sehr kleinen Einheiten und damit in Ein- und Zweifamilienhäusern einsetzbar ist. Ob das Hauptargument „hohe Energieeffizienz zu Gunsten einer längeren Verfügbarkeit fossiler Energieträger“ und andere ideale Gründe einem ansonsten profitorientierten Kunden genügen – die Amortisationszeiten für höhere Investitionskosten sind bei BHKW relativ hoch – soll hier nicht diskutiert werden.

Der Beitrag geht vielmehr zunächst der Frage nach, wie die bisherigen Strukturen der Strom- und Wärmeerzeugung aussehen und wie sie sich durch das Auftreten dezentraler Energieerzeuger ändern werden. Der zweite Teil beschäftigt sich mit Mikro-BHKW, wobei solche mit Stirlingmotoren im Vordergrund stehen werden.

2 Strukturen der Strom- und Wärmeerzeugung

Die staatliche Förderung einer ökologisch nachhaltigen Energieversorgung und die Folgen der Liberalisierung des Strommarktes

haben in jüngster Vergangenheit verstärkt zur Entwicklung von dezentralen Energiesystemen geführt. Diese können die bestehende Energieversorgungsstruktur aufgrund ihrer Flexibilität – und mehr und mehr auch aufgrund wirtschaftlicher und ökologischer Vorteile – schon jetzt sinnvoll ergänzen und in naher Zukunft teilweise sogar ersetzen.

2.1 Zentrale Stromversorgung – dezentrale Wärmeerzeugung

Zunächst aber noch ein Blick auf die Gegenwart und zurück in die jüngste Vergangenheit: Die Stromerzeugung des 20. Jahrhunderts war geprägt durch die Entwicklung sehr großer zentraler Kraftwerksanlagen, ausgelöst durch einen rasanten Anstieg des Strombedarfs im Verlauf der Industrialisierung. Nur eine solche Struktur konnte damals die gewünschte Versorgungssicherheit gewährleisten. Im Gegensatz dazu zeichnete sich der Wärmemarkt immer durch dezentrale Systeme aus. Hier wurde die Versorgung durch kleine standardisierte Einheiten sichergestellt, die eine hohe Wirtschaftlichkeit mit sich brachten. Zusammenfassend kann gesagt werden: Die wirtschaftliche Situation beider Energiesysteme, also sowohl die der zentralen Stromversorgung als auch die der dezentralen Wärmeerzeugung, waren bis in die Gegenwart hinein festgelegt durch Effizienz, Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit sowie Umweltverträglichkeit.

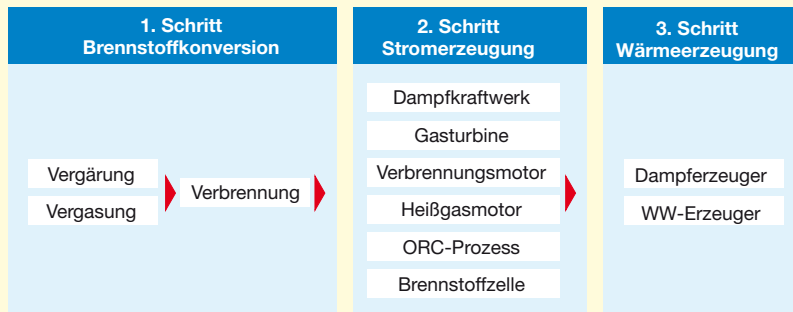
2.2 Auch die Stromerzeugung wird dezentral

Die Kriterien Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit könnten allerdings in Zukunft an Wert verlieren: Viele Experten stimmen darin überein, dass sich die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen derart verschieben und die Risiken des Rohstoffmarktes in einem solchen Maße wachsen werden, dass die Bereitschaft von Investoren, ihr Geld in kapitalintensiven Kraftwerken anzulegen, drastisch sinken könnte. Hinzu kommt eine schwindende Akzeptanz von großen Kohle- oder gar Kernkraftwerken durch weite Teile der Bevölke-

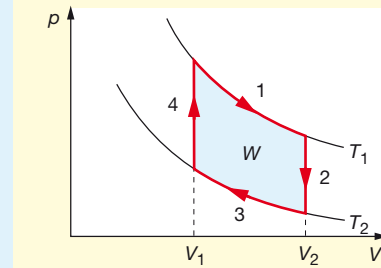
Autor

Hermann Buers ist freier Fachjournalist, Berlin.





① Prozessschritte bei der Kraft-Wärme-Kopplung



② p-V-Diagramm zum Stirlingischen Kreisprozess

rung; selbst der Bau von Überlandleitungen stößt vielfach auf Ablehnung. Ein dritter Grund für die sich abzeichnende Änderung bestehender Kraftwerksstrukturen besteht darin, dass zunehmend regenerative Energien genutzt werden, wobei die fluktuierende Energieabgabe von Windkraft- und Solargeneratoren durch dezentral angeordnete Energieerzeuger mit augenblicklich verfügbarer Leistung kompensiert werden müsste.

Auch hier ein Fazit: Alle bis hierher genannten Einflüsse – abnehmende Investitionsbereitschaft, nachlassende Akzeptanz auf Seiten der Bevölkerung und eine für die Zukunft geforderte höhere Anlagenflexibilität – werden den Neubau von großen Kraftwerken einschränken und stattdessen zu einer verstärkten Nachfrage nach dezentralen Energiesystemen mit den gebotenen Verteilstrukturen auch für die Stromerzeugung führen.

Kleinere dezentrale Stromerzeugungssysteme sind großen zentralen Anlagen in mehreren Punkten unterlegen: Sie haben eine wesentlich geringere thermodynamische Effizienz; sie bedingen höhere Investitions- und Wartungskosten, und sie verursachen spezifisch höhere Schadstoffemissionen. Glücklicherweise lassen sich diese Handicaps kompensieren, nämlich durch eine konsequente Verbesserung der Brennstoffausnutzung durch die Anwendung des Prinzips der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Diese Technologie kommt auch in Mikro-BHKW zur Wirkung, sodass sich mit deren Hilfe auch für kleinere Gebäudeeinheiten wirtschaftlich Strom erzeugen lässt, wobei die Verlustwärme für Heizzwecke genutzt werden kann. Die zukünftige Entwicklung könnte dahin gehen, die Stromerzeuger zu so genannten virtuellen Kraftwerken zusammenzuschließen, was eine weitgehende Dezentralisierung der Stromversorgung nach sich ziehen würde.

2.3 Kraft-Wärme-Kopplung in Mikro-BHKW

Das wesentliche Merkmal der KWK liegt 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 gerade erhobene 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 Marketingidee, Mikro-BHKW als „Stromerzeugende 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 unter anderem 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 (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch) eingeführt und mittlerweile in Fachkreisen angenommen worden.

2.4 BHKW mit Gas- oder Dieselmotor

Ein motorgetriebenes BHKW – man spricht häufig auch von einem MHKW, um diesen Typ von der Gasturbinenvariante zu unterscheiden – arbeitet in der Regel mit Gas (Ottomotor) oder Öl (Dieselmotor). Der Motor ist starr oder über eine Kupplung mit einem Elektrogenerator verbunden und meistens mit diesem auf einem gemeinsamen Tragrahmen schwingungsarm montiert. Kleinere BHKW (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 die Regelung und Steuerung sind bei den marktgängigen 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 **Ein- oder Zweikolbenmotoren** kleiner Leistung.
- Größere BHKWs für gasförmige Brennstoffe werden meistens mit einem **Viertakt-Ottomotor** betrieben. Er ist in der Regel als Magermotor ausgelegt, 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 wie Schwefel, Chlor oder Fluor.
- Standard für die Verbrennung von Heizöl und anderen flüssigen Stoffen ist der **Viertakt-Dieselmotor**. BHKW 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 Katalysatoren ausgestattet werden, was jedoch mit unverhältnismäßig 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 BHKW Laufzeiten bis zu 100 000 Stunden er-

warten. Sie sind schon einige Zeit am Markt eingeführt und weisen mit Abstand die höchsten Verkaufszahlen auf.

3 Mikro-BHKW mit Stirlingmotor

Neu und zum Teil erst in der Probephase sind Mikro-BHKW 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, zum Beispiel 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 Standort zu verraten. Und ebenso gut könnten heute Stirling-BHKW 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 Prozent stehen dank geringer Wärmeverluste hohe thermische Wirkungsgrade gegenüber, so dass Gesamtwirkungsgrade von über 90 Prozent einstellen können.

3.1 Unterschiedliche Ausführungen

Der ideale Stirling-Kreisprozess stellt eine Abfolge von Zustandsänderungen dar, die abwechselnd isotherm (ohne Temperturveränderung) und isochor (ohne Volumenänderungen) vonstatten gehen.

1. In 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).
2. Das Gas wird isochor unter Abgabe von Wärme auf die Temperatur T_2 abgekühlt.
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.

3.2 Einzylindrische Ausführung

Es gibt bei den Stirlingmotoren unterschiedliche Ausführungen. Bild 3 zeigt den Aufbau eines β -Typs. Er besteht aus einem Zylinder, in dem sich ein Arbeitskolben und ein sogenannter 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 auf-

nimmt 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.

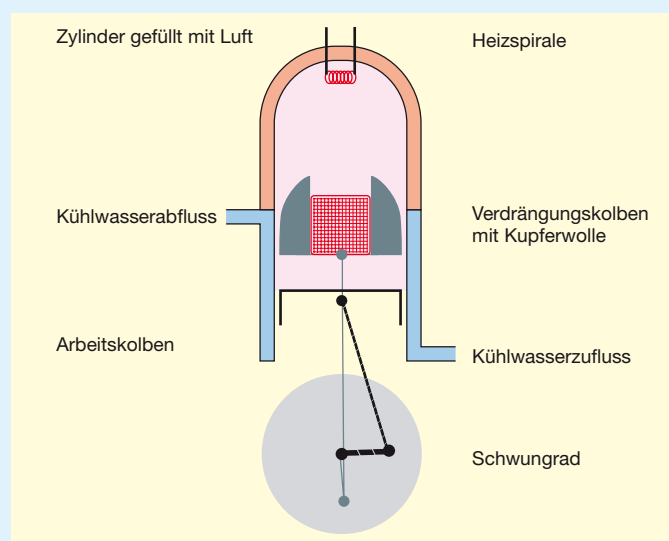
Es lassen sich analog zu dem oben aufgezeigten Kreisprozess folgende Phasen unterscheiden:

- **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 voraus-eilende 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.

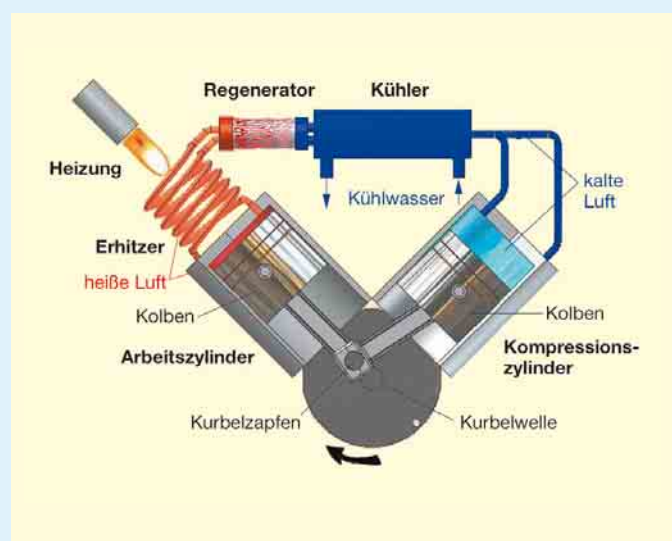
3.3 Zweizylindrige Ausführung

Für mittlere bis große Leistungen gedacht ist der α -Typ. Er arbeitet mit zwei V-förmig aufgebauten Zylindern (Bild 4). Als Beispiel soll hier der Solo Stirling 161 von Stirling Systems GmbH aus Sindelfingen dienen:

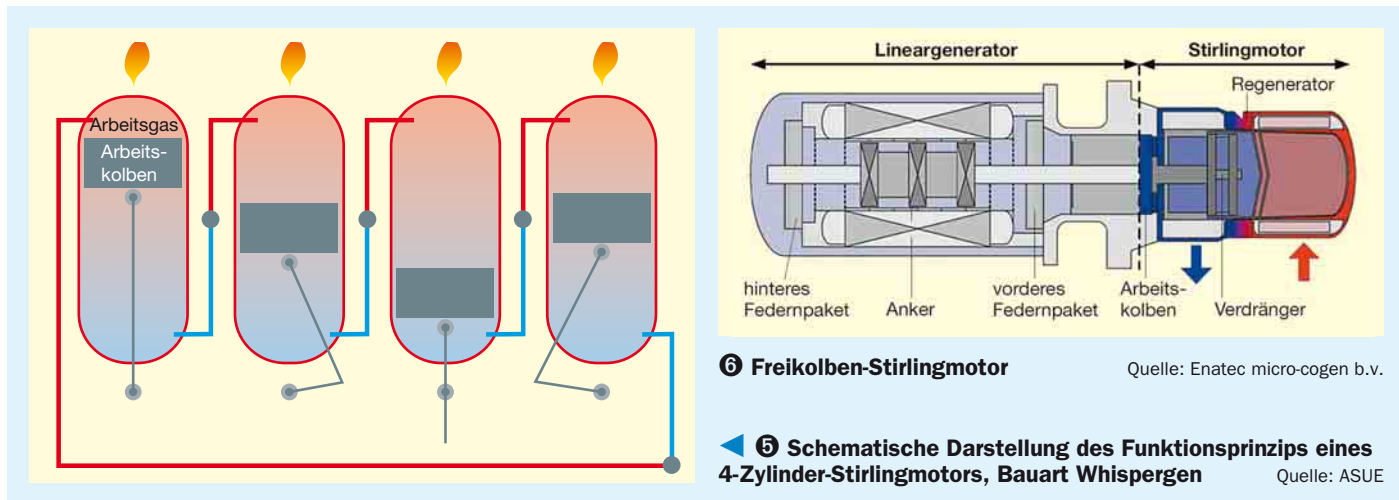
Der V-Zweizylindermotor verfügt über einen Verdichtungs- und einen Arbeitszylinder, zwischen denen das Arbeitsgas in einem geschlossenen Kreisprozeß hin- und hergeschoben wird. Im Verdichtungszyylinder erfolgt bei niedriger Temperatur unter Wärmeabfuhr an das Kühlwasser die Kompression, beim isochoren Übertreiben in den Arbeitszylinder



③ Einzylindrige Ausführung eines Stirlingmotors (β-Typ)



④ Prinzipieller Aufbau eines Zweizylinder-Stirlingmotors



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 Speicherspeicher zwischen den beiden Temperaturniveaus darstellt, aus einem Paket von Drahtsieben. Um Strömungsverluste in den Wärmeübertragern zu verringern, wird als Arbeitsgas meist Helium verwendet.

3.4 Vierzylindrige Ausführung

Eine Weiterentwicklung ist die Vierzylinder-ausführung, die in Bild 5 schematisch

dargestellt ist: Das Arbeitsgas in den Zylindern wird von außen erwärmt, zum Beispiel 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.

3.5 Freikolben-Stirlingmotor

Der Freikolben-Stirlingmotor (auf englisch: Free Piston Stirling Engine – FPSE) ist eine Erfindung, die das bewährte Stirlingprinzip mit einem modernen Lineargenerator kombiniert (Bild 6). Auch hier hat der Stirlingmotor zwei bewegliche Teile: den Arbeitskolben und den Verdrängerkolben. Die erzeugte Leistung wird am Arbeitskolben freigesetzt, der anschlie-

ßend den Anker des Lineargenerators 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.

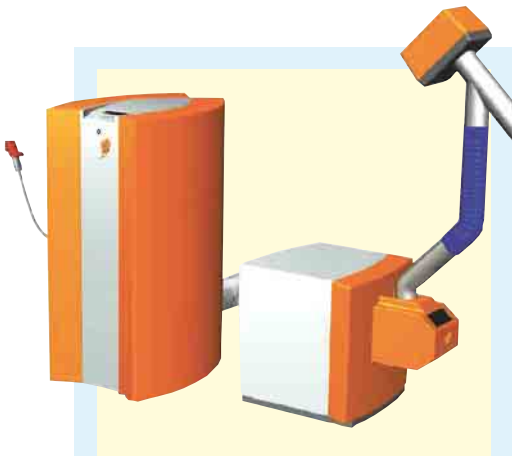
Der Stirlingmotor selbst besteht aus einer warmen und einer kalten Zone. Die warme Zone (im Bild rot) wird von einem Gasbrenner erwärmt, die kalte Zone (blau) mit Wasser gekühlt. Das Arbeitsgas (Helium) wird vom Verdrängerkolben zwischen der warmen und kalten Zone hin- und hergeführt, wobei das Gas an 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.

PHOTOVOLTAIK

ist unsere Sache!

Das Elektrohandwerk.

■ „ep-Photovoltaik“ informiert 6× jährlich speziell aus der Sicht des Elektrotechnikers, praxisnah und kompetent. Mehr unter: www.ep-Photovoltaik.de



7 Der Pellet-Lion von Otag



8 Pelletsheizung mit 4-Zylinder-Stirling-Modul der Fa. SPM-Stirling Power Module Energieumwandlung



9 Mikro-BHKW für die Beheizung mit Pellets, ausgestattet mit einem 1-zylindrischen Stirlingmotor

4 Weitere Entwicklungen

Da die für den Stirling-Kreisprozess benötigte thermische Energie von außen an die Zylinder des Motors herangeführt wird, lassen sich beliebige Wärmequellen beziehungsweise Wärmeträger nutzen. In sehr vielen Fällen dürfte Erdgas oder Biogas eingesetzt werden, aber in Zukunft ist auch die Verbrennung von Wasserstoff denkbar. Zurzeit aber, das zeigen die Reaktionen der Entwickler, wollen viele Kunden Holzpellets einsetzen. 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.

4.1 Erdgasbetriebenes Mikro-BHKW

Das Joint-Venture-Unternehmen „Efficient Home Energy“ (eHe) startet gerade im nordspanischen Tolosa eine Serienproduktion erdgasbetriebener Stirling-Mikro-BHKW der Marke Whisper-Gen (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 Whisper-Gen endlich auch in Deutschland vor der Markteinführung. Der mit dem Stirlingmotor angetriebene Elektrogenerator liefert nicht nur Strom, sondern auch Wärme, die mit Wärmetauschern aus dem Kühlmittel-, Abgas- und Schmierölkreislauf ausgekoppelt wird. Das elektrische Leistungsvermögen beträgt bis zu 1 kW_{el}, die Heizleistungen reichen von 7,5 kW_{th} 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.

4.2 Freikolben-Stirling mit Lineargenerator

Das Unternehmen Sunpower aus Athens (Ohio), nach eigenen Angaben Erfinder der Freikolben-Technologie für Stirlingmotoren und Weltmarktführer in diesem Segment, hat bereits eine Reihe von „Free Piston Stirling Engines“ (FPSE) mit Leistungen im Bereich von 35 W_{el} bis 7,5 kW_{el} entwickelt und ausgeliefert. Für die Stromerzeugung sorgt ein Lineargenerator. Kunden sind unter anderen europäische Heizkesselhersteller wie Remeha, Viessmann und Baxi. Sunpower entwickelt auch Prototypen für OEM und berücksichtigt dabei deren spezielle Wünsche. Auch der niederländische Hersteller Enatec hat sich dieser äußerst wartungsarmen Technologie verschrieben und bereits 2002 und 2003 mit einem im eigenen Haus entwickelten Stirling-BHKW Feldtests durchgeführt. Ende 2004 knüpfte man erste Kontakte mit

Rinnai, einem japanischen Hersteller effizienter Gasgeräte für Haushalt und Gewerbe, mit dem Ziel einer engen Partnerschaft. Man kam überein, dass Rinnai in Zukunft für Enatec die Stirlingmotoren produzieren wird. Gemeinsam arbeitet man außerdem zurzeit daran, das Stirlingaggregat mit einem Brennwertheizgerät zu kombinieren. Als Vertriebspartner ist die zur Bosch-Gruppe gehörende BBT Thermo-technik im Gespräch. Diese hatte ihrerseits auf der ISH 2005 ein Studienobjekt mit einer modulierenden elektrischen Leistung zwischen 0,2 und 0,4 kW vorgestellt. Dieses Kleinst-BHKW mit Freikolben-Stirling habe bereits in zwei Testeinsätzen seine Funktionstüchtigkeit bewiesen, hieß es damals. Die Firma Otag arbeitet in ihrem BHKW mit einem dampfgetriebenen Freikolbensystem, das ebenfalls einen integrierten Lineargenerator antreibt. Als Brennstoff dient Erdgas oder Flüssiggas, Geräte für andere Energieträger befinden sich noch in der Entwicklung. Die elektrische Leistung reicht von 0,3 kW bis 2,0 kW, die thermische von 3,0 kW 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“ (Bild 7) 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.

4.3 BHKW für die Verfeuerung von Holzpellets

Ein Beispiel für den Betrieb eines Stirling-BHKW 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 Pelletsheizung zu einem Mikro-BHKW ermöglicht – durch die Kombination mit einem neu entwickelten 4-Zylinder-Stirling-Modul (Bild 8). 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 (Bild 9). 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 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. ■