

Kompakt und montagefreundlich

Stirling-Mikro-BHKW für den Einsatz im Einfamilienhaus

Die Firma Enerlyt entwickelt zurzeit in Potsdam eine Mikro-KWK-Anlage auf Basis eines Stirling-Motors. Gegenüber konventionellen Stirling-Motoren weist die Eigenentwicklung einen deutlich verlustärmeren thermodynamischen Kreisprozess auf. So sind etwa die Expansionskolben größer ausgelegt als die Kompressionskolben. Ein Betrieb ist mit unterschiedlichen Brennstoffen möglich. Der Autor beschreibt Funktionsweise und derzeitigen Entwicklungsstand.

Mikro-BHKW können im Grundlastbetrieb einen großen Anteil der Strom- und Wärmeleitung eines Einfamilienhauses übernehmen. Konventionelle Anlagen sind dafür bislang weitgehend zu groß ausgelegt. Größtes Problem ist, dass die erzeugte Wärme in den Sommermonaten und in der Übergangszeit nicht genutzt werden kann. Um hier zu wirtschaftlicheren Ergebnissen zu gelangen, entwickelt die Enerlyt Technik GmbH, Potsdam, derzeit eine Mikro-KWK-Anlage mit einem neuartigen Funktionsprinzip: Hierbei wird das im Motor eingeschlossene Arbeitsgas in einem Bereich erhitzt und in einem anderen gekühlt. Während des Kreisprozesses werden durch die Kolbenbewegungen Druckdifferenzen bei hoher Temperatur und steigendem Volumen ab- und bei niedrigerer Temperatur und fallendem Volumen wieder aufgebaut. So kann das Gas über die Kolben und damit über die Kurbelwelle Arbeit nach außen abgeben. Ein Teil des eingeschlossenen Arbeitsgases wird über einen

Erhitzer mit einem Brenner erwärmt. Das führt wegen der beweglichen Kolben jedoch nicht zu einer Druckerhöhung, sondern zu einer Kolbenbewegung, die den Druck

mindert und so gerichtet ist, dass sich bei Leistungsabgabe an die Kurbelwelle das Gesamtvolumen des Gases im Motor vergrößert. Normalerweise würde bei der Volumenvergrößerung neben dem Druck auch die Temperatur des Gases sinken, durch die Wärmezufuhr bleibt sie jedoch konstant.

Nach dieser isothermen Expansion wird das entspannte Gas, das den Erhitzer verlässt, durch einen Regenerator geschoben, der dazu dient, die im Gas noch enthaltene Wärme intern zu speichern. Durch die Wärmeabgabe an diesen Kurzzeitwärmespeicher fallen die Temperatur und der Druck des Gases. Das schafft beste Voraussetzungen für die anschließende Verdichtung. Ohne Regenerator würde die Verdichtung gegen einen deutlich höheren Druck erfolgen. Ein großer Teil der vorher gewonnenen mechanischen Energie würde wieder in minderwertigere Wärme zurückgewandelt. Im Anschluss an die interne Wärmeabgabe an den Rege-

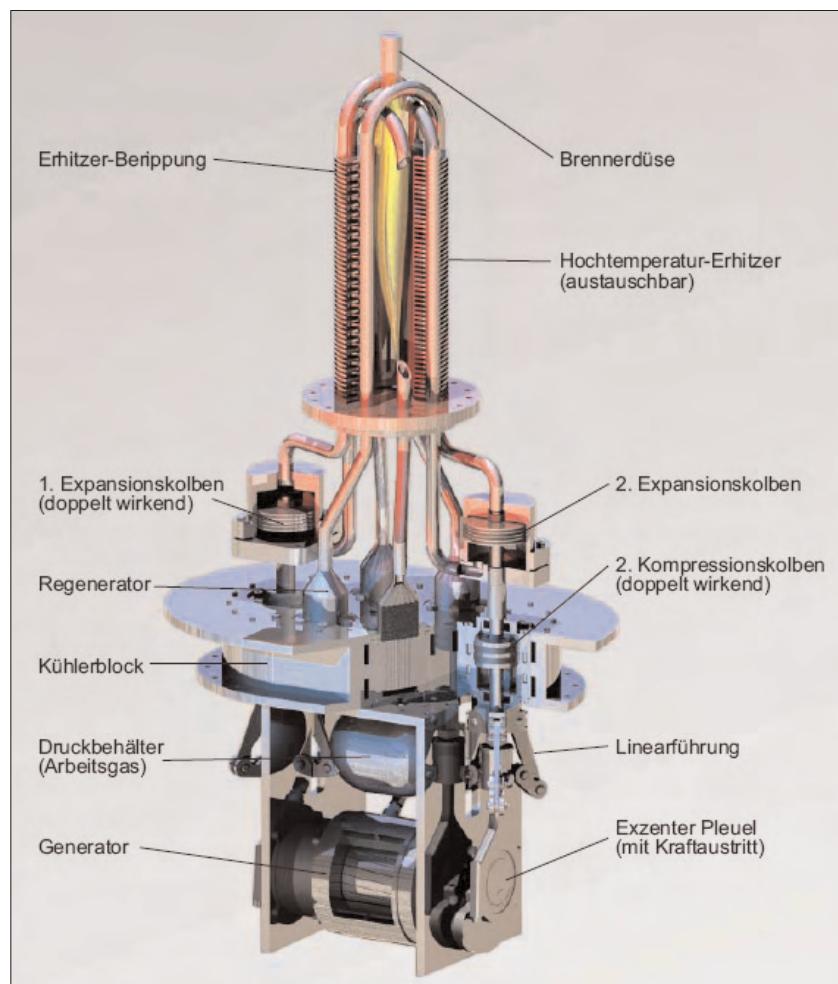


Bild 1. Grundanordnung des Stirling-Motors



Dr.-Ing. **Andreas Gimsa**, Geschäftsführer Enerlyt Technik GmbH, Potsdam

nerator verdichten die Kolben das Arbeitsgas. Um die arbeitsaufwändige ungewollte Druckerhöhung zu mindern, wird ein Teil des Gases mit den Kolben bei der Verdichtung durch einen Kühler gedrückt. Die anfallende Kompressionswärme kann auf diese Weise bei konstant niedriger Temperatur abgegeben werden. Der Kühler ist ein Wärmeübertrager, der innen von Arbeitsgas und außen von Kühlwasser durchströmt wird. Im Mikro-BHKW ist das Kühlwasser das Heizungsrücklaufwasser des Gebäudes, das durch die Erwärmung wohltemperierte zur Beheizung und Trinkwassererwärmung genutzt werden kann.

Nach der Kompression strömt das verdichtete Gas, das aus dem Kühler kommt, diesmal in umgekehrter Richtung wieder durch den Regenerator und erhält die vorher gespeicherte Wärme zurück. Das ist die ideale Vorbereitung für die erneute Expansion, denn Temperatur und Druck sind nach dieser internen Wärmezufuhr gestiegen und die Arbeitsfähigkeit des Gases wurde erhöht. Der Kreisprozess ist geschlossen. Die gewonnene mechanische Energie ist die Differenz des Energieüberschusses bei der Expansion und des Energieaufwands durch Kompression und Verluste. Die mechanische Nutzenergie wird bei diesem BHKW, dessen Kurbelwelle auch die Generatorwelle ist, in elektrische Energie umgewandelt und direkt in das Stromnetz eingespeist.

Der Motor besitzt jedoch nicht nur einen Stirling-Prozess, sondern gleich 4. Diese führen immer mit einer Viertel Umdrehung Versatz den beschriebenen Zyklus aus. Dadurch wird der Drehkraftverlauf an der Kurbelwelle sehr gleichförmig. Es ist gelungen, die 4 Zyklen mit nur 2 Doppelkolben zu realisieren. Der Motor hat dadurch einen kompakten Aufbau. Das Getriebe ist einfach und langlebig, weil nur 2 Kolbenstangen die Kraft übertragen müssen. Vergleichbar mit dem Fahrrad-Tretmechanismus wird in direktem Weg über 2 Pleuel die Generatorwelle an beiden Enden angetrieben.

Ein vergleichbarer, bereits bekannter Stirling-Motor, der auch mit 4 Zylindern arbeitet, ist der Siemens-Motor. Hier müssen jedoch die Kräfte der 4 Kolben über Getriebe (z. B. Schiefer- oder Taumelscheiben) abgeführt werden. Außerdem wird bei diesen Motoren das Getriebe an beiden Enden angetrieben.

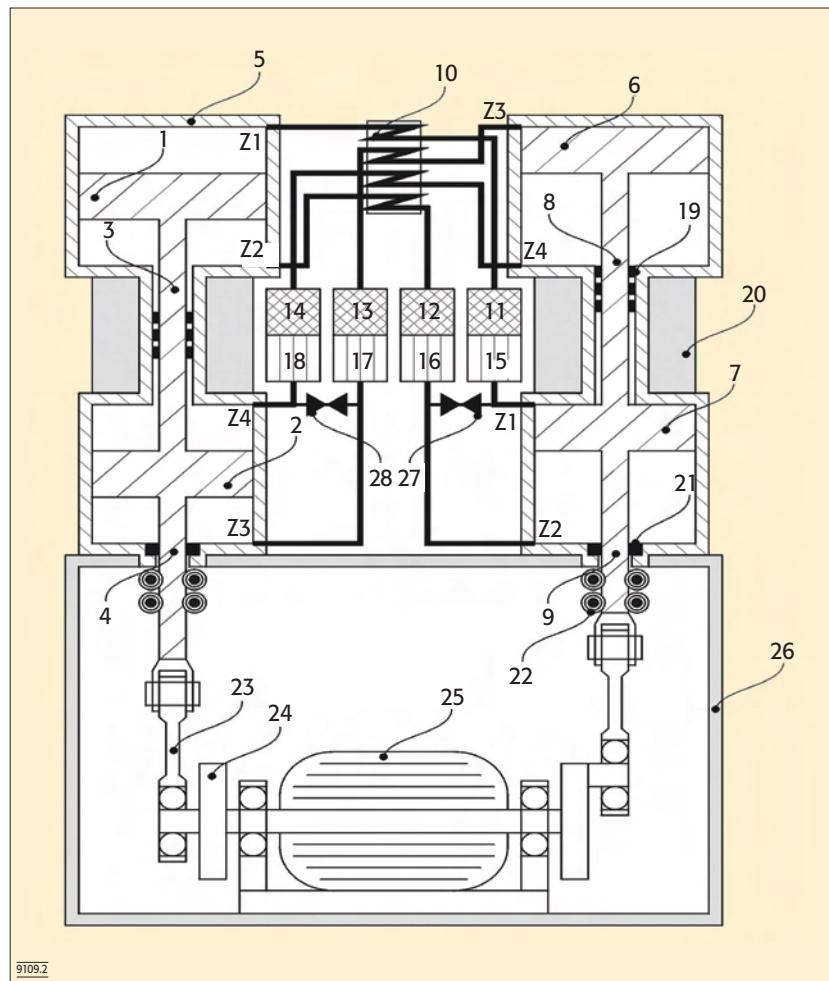


Bild 2. Aufbau des Stirling-Motors von Enerlyt

- | | | | |
|----|---|----|---|
| 1 | Expansionskolben der 1. Doppelkolbeneinheit | 16 | Kühler Zyklus 2 |
| 2 | Kompressionskolben der 1. Doppelkolbeneinheit | 17 | Kühler Zyklus 3 |
| 3 | Kolbenstange der 1. Doppelkolbeneinheit | 18 | Kühler Zyklus 4 |
| 4 | Kolbenstangenverlängerung der 1. DKE | 19 | Kolbenstangenringe zur Abdichtung |
| 5 | Zylindergehäuse | 20 | Thermische Isolation |
| 6 | Expansionskolben der 2. DKE | 21 | Kolbenstangendichtung |
| 7 | Kompressionskolben 2. DKE | 22 | Linearführung |
| 8 | Kolbenstange der 2. DKE | 23 | Pleuel |
| 9 | Kolbenstangenverlängerung der 2. DKE | 24 | Kurbelwelle |
| 10 | 4-Zyklen-Erhitzer | 25 | Generator |
| 11 | Regenerator Zyklus 1 | 26 | Kurbelgehäuse |
| 12 | Regenerator Zyklus 2 | 27 | Zyklenzurzschlussventil Zyklus 1 mit Zyklus 2 |
| 13 | Regenerator Zyklus 3 | 28 | Zyklenzurzschlussventil Zyklus 3 mit Zyklus 4 |
| 14 | Regenerator Zyklus 4 | Z1 | Zyklus 1 |
| 15 | Kühler Zyklus 1 | Z2 | Zyklus 2 |
| | | Z3 | Zyklus 3 |
| | | Z4 | Zyklus 4 |

be durch größere zu übertragende Kräfte belastet. Die Arbeitsgaszyklen des Siemens-Motors befinden sich in Reihe und sind hydraulisch so verbunden, dass, wenn an einem

der 4 Kolben die Expansion stattfindet, am übernächsten zeitgleich die Kompression abläuft. Das bedeutet, dass die Kompressionskräfte über das Getriebe geleitet werden müssen.



Bild 3. Enerlyt-Stirling auf einem Holzpelletkessel

Quelle: Enerlyt

Motor	4-Zyklen-Stirling	$T_{\text{Erhitzerwand}}$	800 °C
Hubraum	1 640 cm ³	$T_{\text{Kühlerwand}}$	70 °C
Brennstoff	Erdgas, Biogas	Verdichtungsverh.	1,4
Arbeitsgas	Helium	Brennstoffleistung	6,0 kW
Mitteldruck	7 bar	elektrische Leistung	1,0 kW
Drehzahl	1 100 U/min	thermische Leistung	4,5 kW
Generator	3-Phasen-Asynchron	elektrischer Wirkungsgrad	17 %
Gewicht	150 kg	Geräusch	<40 dB (A)
Größe (HxTxB)	150x70x50	CO ₂ -Reduktion (Biogas)	6 000 kg/a

Tafel 1. Technische Daten des Stirling-Motor-BHKW für Einfamilienhäuser
(Da sich das Produkt noch in der Entwicklung befindet, sind die technischen Parameter vorläufig und unverbindlich)

Quelle: Enerlyt

sen. Der Stirling-Motor von Enerlyt hingegen überträgt den Großteil der Kräfte bereits über die Doppelkolben ohne die Kurbelwelle zu belasten. Durch diese Anordnung steht für jede Kompression an der gleichen Kolleneinheit auch eine Expansion zur Verfügung. Jeder Doppelkolben erzeugt einen Drehkraftüberschuss, der über rund zwei Drittel der Gesamtzeit einer Umdrehung anhält. Dadurch, dass der Drehkraftverlauf beider Doppelkolben gegeneinander genau um eine halbe Umdrehung versetzt ist, ist der Gesamtdrehkraftverlauf des Motors konstant. Beide Doppelkolben ergänzen sich dabei ideal.

Bis vor kurzem erzielten Stirling-Motoren noch keine guten isothermen Prozesswerte. Bei der Expansion fiel die Temperatur stärker und bei der Kompression stieg die Tem-

peratur stärker als gewünscht. Das schmälerte die Arbeitsausbeute. Dadurch, dass bei dem Enerlyt-Motor die thermischen Bereiche klar getrennt sind, wird eine deutlich bessere Isothermie erreicht. So glühen beispielsweise die Expansions-Zylinder bei einer Temperatur von 630 °C und sorgen neben dem Erhitzer für eine zusätzliche Wärmezufuhr. Gleichzeitig werden die Wärmeleitungsverluste zwischen Expansions- und Kompressionsräumen reduziert, da es jeweils getrennte Zylinder für Expansions- und Kompressionskolben und keine gemeinsame gibt, wie beim Siemens-Motor oder anderen Stirling-Motoren. Shuttle-Verluste durch ungewollten Wärmetransport der Kolben konnten durch die thermische Trennung von Expansions- und Kompressionsräumen eben-

falls behoben werden. Der Motor ist durch seine kompakte und modulare Bauweise montagefreundlich und gut geeignet für Großserien.

Innovation und technische Vorteile des Motors

Gegenüber konventionellen Stirling-Motoren wird ein verlustärmer thermodynamischer Kreisprozess (Ericsson) angestrebt. So sind die Expansionskolben größer ausgelegt als die Kompressionskolben. Außerdem wird zugelassen, dass die beiden Expansionszylinder während des Betriebs glühen. Durch diese Maßnahmen werden die üblicherweise adiabaten Zustandsänderungen mehr isotherm und die isochoren Zustandsänderungen annähernd isobar. Im Ergebnis ist die Arbeitsausbeute der Maschine höher. Die Maschine ist zugleich äußerst kompakt, es konnte ein montagefreundlicher Aufbau in sämtlichen Ebenen realisiert werden:

- Getriebeebene,
- Kühlerebene mit Kompressionsräumen,
- Regeneratorebene mit thermischer Entkopplung der Expansionsräume von den Kompressionsräumen,
- Erhitzerebene mit Expansionsräumen, Brenner und Luftvorwärmern.

Das Getriebe verrichtet seine Arbeit unkompliziert. Für 2 Kolben in Form einer Doppelkolben-Einheit wird nur ein Pleuel benötigt. Entsprechend einfach aufgebaut sind Kurbelwelle und Linearführungen. Durch die Systemgrundanordnung wird die Generatorwelle als Kurbelwelle genutzt. Damit entfallen die sonst notwendige Kurbelwellenfertigung und deren Lagerung.

Die Arbeitszyklen unterstützen sich gegenseitig. Jede Doppelkolben-Einheit liefert zum großen Teil Nettoarbeit an die Kurbelwelle. Die Kompression wird durch die Expansion auf der jeweils anderen Kolbenseite realisiert ohne das Getriebe zu belasten. Damit sind die Belastungen der Kurbelwelle und die Seitenkräfte geringer als beim Siemens-Stirling. Der Kraftverlauf an der Kurbelwelle ist sehr gleichförmig. Konventionelle Stirling-Maschinen besitzen komplizierte Erhitzer. Der 4-Zyklen-Motor hat eine einfache, Einrohr-Erhitzeranordnung. Dadurch, dass der Erhitzer

kopf austauschbar ist, kann er problemlos dem jeweiligen Brennstoff angepasst werden.

Die Maschine hat geringe Shuttle- und Wärmeleitungsverluste, weil jeweils ein doppelt wirkender Expansionszylinder mit seinem Kolben thermisch getrennt vom Kompressionszylinder mit seinem Kolben angeordnet ist. Das Getriebe muss gegenüber den Arbeitsgasräumen nur mit 2 Kolbenstangendichtungen abgedichtet werden. Außerdem kann es einfach verschlossen und unter Druck gesetzt werden.

Einsatzbereich Stirling-Mikro-BHKW im Einfamilienhaus

Konventionelle Blockheizkraftwerke sind für den thermischen Grundlastbetrieb im Einfamilienhaus deutlich zu groß dimensioniert. Da die Wärme in den Sommermonaten und in der Übergangszeit nicht verwertet werden kann, ist deren Wirtschaftlichkeit im EFH eingeschränkt. Dies reduziert auch den CO₂-Einspareffekt. Die Diesel- und Otto-Motortechnologie ist wartungsaufwändig, geräuschtintensiv und aufgrund der inneren Verbrennung schlecht geeignet, nachwachsende Brennstoffe zu nutzen.

Die Stirling-Technologie beginnt sich gerade in diesem Marktsegment zu entwickeln. Die Sunmachine GmbH, Wildpoldsried, bietet einen Holzpellets-Stirling an, der mit einem Stirling-Zyklus arbeitet. Die Maschine mit einem innovativen Pellet-Brenner wiegt 410 kg. Der neuseeländische Hersteller WhisperGen bietet einen Siemens-Stirling kleiner Leistung mit Erdgasfeuerung an. Der elektrische Wirkungsgrad dieses sehr leisen Motors mit einem besonderen Wobble-Yoke-Getriebe-Mechanismus liegt nach Aussage von Feldtestpartnern allerdings bei unter 10 %.

Das Mikro-BHKW kann im Grundlastbetrieb den Löwenanteil der Strom- und Wärmeproduktion eines Einfamilienhauses übernehmen. Markterhebungen weisen unter anderem laut *Andreas Prohl* von der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, Berlin, ein Potenzial von rd. 5 Mio. Heizungen aus, die allein in Deutschland zu erneuern sind. Durch die Anpassbarkeit der Enerlyt-Maschine auf verschiedene Brennstoffe und wegen

Hersteller Mikro-BHKW	Sunmachine	WhisperGen	Enerlyt
Stirling-Motor	1 Zyklus (Alpha)	4 Zyklen (Alpha)	4 Zyklen (Alpha)
Brennstoff	Holzpellets	Erdgas	Erdgas
Leistung elektrisch	1,5 kW (3,0 kW)	0,8 kW	1,0 kW
Leistung thermisch	4,5 kW (10,5 kW)	8,0 kW	4,5 kW
Kaufpreis (netto)	23 000 € ²	11 991 € ³	13 000 € (geplant)
Preis/kW elektrisch¹	15 333 €/kW	14 989 €/kW	13 000 €/kW

¹ Um eine Vergleichbarkeit der Preise im Grundlastbetrieb des Einfamilienhauses zu ermöglichen, ist die Bezugsbasis die Minimallast
² Quelle: www.bhkw-prinz.de/sunmachine-pellet-bhkw-mit-stirlingmotor (25.01.2010)
³ Quelle: Vortrag WhisperGen auf der Fachtagung Renexpo Augsburg, 25.09.2009

Tafel 2. Preise vergleichbarer Blockheizkraftwerke

der kleinen Leistung kann das gesamte Einfamilienhaus-Segment erschlossen werden. Weitere Anwendungsgebiete sind Hilfs- und Notstromaggregate, Bootsantriebe und FCKW-freie Wärmepumpen und Kühlmaschinen (Umkehrprozess).

Die Kunden des Mikro-BHKW sind die Bewohner von Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie Gewerbetreibende. Prinzipiell kommen jegliche Nutzer beheizter Gebäude als Kunden in Betracht. Entscheidend für den wirtschaftlichen Betrieb ist, dass der Jahreswärmeverbrauch des Gebäudes größer oder gleich dem eines typischen deutschen Einfamilienhauses ist.

Bestehende konventionelle Heizungsanlagen, die nur Wärme anstelle von Strom und Wärme produzieren, werden beim Einsatz eines BHKW energetisch und ökologisch aufgewertet. Eine Gebäudeheizung dient dazu, die Räume zu temperieren und das Trinkwasser zu erwärmen. Mit einem Mikro-BHKW lässt sich neben der Beheizung aufgrund der Stromproduktion und der gesetzlich geschützten Einspeisevergütung für Strom (KWK-Gesetz und EEG) ein finanzieller Gewinn erwirtschaften. Die Amortisationszeit liegt unter 10 Jahren. Durch die Kraft-Wärme-Kopplung lassen sich zentrale Kraftwerkskapazitäten mit hohem CO₂-Ausstoß und ohne Wärmeverwertung einsparen. Das entlastet die Umwelt.

Verglichen mit anderen Stirling-Motoren treten eine Reihe von Kostenvorteilen auf, die nachfolgend kurz erläutert werden. Anstelle von 4 Kolben werden 2 Doppelkolben genutzt. Diese benötigen auch nicht 4 Kolbenstangen zum Getriebe, sondern nur 2. Das Gleiche gilt für die Kolbenstangendichtungen

zum Getriebe. Es werden nicht 4, sondern nur 2 benötigt. 2 einfache Pleuel treiben direkt die Generatorwelle an, eine Kurbelwelle entfällt. So kann aufgrund des gleichförmigen Drehkraftverlaufs auf die Gleich- und nachfolgend geregelte Umrichtung des Stroms in Netzqualität verzichtet werden. Ein kostengünstiger handelsüblicher Asynchrongenerator speist den qualitativ hochwertigen Drehstrom direkt in das Niederspannungsnetz ein.

Der Erhitzer eines Stirling-Motors ist bisher aufgrund seiner komplizierten Geometrie und seiner Hochtemperaturfestigkeit oft das teuerste Bauteil. Beim Enerlyt-Motor ist es gelungen, einen kostengünstigen Einrohr-Erhitzer auszulegen, der mit einem einfachen Rohrbiegeverfahren gefertigt wird. Eine äußere Befüllung wird mit anschließendem Hochtemperatur-Lötverfahren hergestellt. Das senkt den Erhitzer-Preis auf unter 50 % technisch vergleichbarer Ausführungen. Durch die Langlebigkeit und Wartungsfreundlichkeit der Maschine betragen die Betriebskosten weniger als die Hälfte derer vergleichbarer Verbrennungsmotoren. Ölwechsel, Ventileinstellungen sowie Zündkerzen- und Filterwechsel entfallen gänzlich. Im Vergleich mit den Wettbewerbern liegt der Anschaffungspreis des BHKW bei Enerlyt im mittleren Marktsegment. Bezogen auf die elektrische Leistung ist der Preis jedoch am Günstigsten. Bei Serienproduktion geht Enerlyt von einem Stückpreis von deutlich unter 10 000 € aus. ■

gimsa@enerlyt.de

www.enerlyt.de