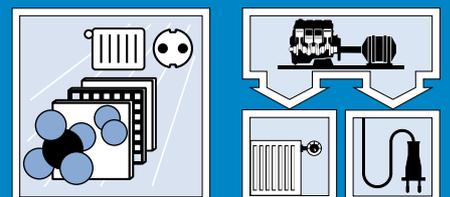


Mikro-KWK

Motoren,
Turbinen und
Brennstoffzellen



Inhalt

Einleitung	3
Einsatzgebiete und -potenzial	4
Verbrennungsmotoren	5
Funktion, Technik und Innovationen	5
Monovalenter Betrieb	6
Netzersatzbetrieb	7
Inselbetrieb	7
Betriebserfahrungen	8
Anbieterübersicht Verbrennungsmotoren	8
Stirlingmotoren	9
Funktion, Technik und Innovationen	9
Betriebserfahrungen	10
Anbieterübersicht Stirlingmotoren	11
Gasturbinen	12
Funktion, Technik und Innovationen	12
Anbieterübersicht Gasturbinen	13
Betriebserfahrungen	14
Brennstoffzellen	15
Funktion, Technik und Innovationen	15
Betriebserfahrungen	17
Fazit/Ausblick	18

Herausgeber:

ASUE
Arbeitsgemeinschaft für
sparsamen und umweltfreundlichen
Energieverbrauch e.V.
Bismarckstraße 16 · 67655 Kaiserslautern
Telefon (06 31) 360 90 70
E-Mail asue@compuserve.com
Internet www.asue.de

Vertrieb:

Verlag
Rationeller Erdgaseinsatz
Postfach 25 47 · 67613 Kaiserslautern
Telefax (06 31) 360 90 71

Mikro-KWK
Best.-Nr. 05 12 01
Schutzgebühr 2,00 €

Einleitung

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist eine innovative Technologie zur kombinierten Wärme- und Stromerzeugung, die einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen leisten kann. Die entscheidenden Vorteile von erdgasbetriebenen Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung sind ihr großes Energieeinsparpotenzial, verbunden mit einem hohen Maß an Umweltverträglichkeit, sowie ihre vielseitigen Einsatzmöglichkeiten in dezentralen Einheiten.

Die Kraft-Wärme-Kopplung hat sich in den vergangenen Jahrzehnten stetig weiterentwickelt und umfasst heute in Deutschland mehrere tausend Anlagen mit

- Dampfturbinen,
- Gasturbinen und
- Verbrennungsmotoren (BHKW)

in elektrischen Leistungsbereichen von wenigen kW_{el} bis über hundert MW_{el}.

Für den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen liegen günstige Voraussetzungen vor, wenn ein ganzjähriger gleichzeitiger Strom- und Wärmebedarf besteht. Typische Anwendungsgebiete für Dampf- und Gasturbinenanlagen sind daher die Industrie und die Heizwärmewirtschaft sowie öffentliche Gebäude, Krankenhäuser, Schwimmbäder und das Gewerbe für gasmotorisch betriebene Blockheizkraftwerke. Zu Beginn der 90er Jahre erlebten die BHKW und Gasturbinenanlagen einen regelrechten Boom, der durch die Liberalisierung der Strommärkte und eine einsetzende Marktsättigung am Ende des letzten Jahrzehnts deutlich an Geschwindigkeit verlor.

Vor dem Hintergrund gestiegener Umwelt- und insbesondere Klimaschutzanforderungen bleibt die Aufforderung an die Nutzer, die zur Verfügung stehende Energie so rationell und umweltschonend wie möglich einzusetzen, jedoch unverändert bestehen. Um die Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung einem noch breiteren Anwendungsspektrum zuzuführen, ist der

Bereich der kleinen bis sehr kleinen Leistungen in jüngster Zeit mehr und mehr in das Blickfeld von Politik, Energiewirtschaft, möglichen Anwendern und Anlagenbauern gerückt.

Eine allgemein akzeptierte Definition des Leistungsbereiches für Mikro-KWK existiert zur Zeit noch nicht. Im Rahmen dieser Broschüre werden neue Entwicklungen bei motorischen Anlagen und Brennstoffzellen mit Leistungen < 10 kW_{el} und bei Gasturbinenanlagen mit Leistungen < 100 kW_{el} vorgestellt.

Diese Veröffentlichung gibt einen Überblick über die Grundlagen der einzelnen Techniken, den aktuellen Entwicklungsstand einschließlich konkreter Übersichten über das aktuelle Marktangebot sowie mögliche Potenziale. Hierbei werden die Technologien

- Verbrennungsmotoren,
- Stirlingmotoren,
- Gasturbinen und
- Brennstoffzellen

berücksichtigt, die derzeit viel versprechende Ansätze im Kleingewerbe und in häuslichen Anwendungsgebieten zeigen.

Einsatzgebiete und -potenzial

Mikro-BHKW werden überall dort vorteilhaft eingesetzt, wo ihre elektrische und thermische Nutzenergie möglichst zeitgleich und über mindestens 5.000 h/a zur Versorgung des Betreibers dient. Dies sind im Leistungsbereich um 1 kW_{el} der Einzelhaushalt, im Leistungsbereich um 5 kW_{el} das Mehrfamilienhaus und der Kleingewerbebetrieb und im Leistungsbereich ab 30 kW_{el} größere Wohn- und Nutzgebäude.

Sehr interessant kann vor allem der Einsatz in der Wohnungswirtschaft und im Gewerbebereich sein, insbesondere bei Dienstleistern. Grund: Sowohl die Wohnungswirtschaft als auch der Dienstleistungsbereich (z. B. Wäschereien, Hotels, Krankenhäuser, Verwaltungen) unterliegen der vollen Ökosteuern für Strom und Erdgas. Von beiden Steuern sind der Brennstoffeinsatz für und die Stromerzeugung von KWK-Anlagen jedoch ausgenommen. Dies verbessert die Wirtschaftlichkeit erheblich (vgl. **ASUE-Broschüre „Die ökologische Steuerreform“**).

Weiterhin ist im o. a. Einsatzbereich der Effekt des liberalisierten Strommarktes am geringsten ausgefallen, und die hier zu ersetzenden Stromlieferungen des Energieversorgungsunternehmens haben noch einen relativ hohen Preis von zum Teil deutlich über 10 Cent/kWh_{el} (Mischpreis einschließlich Ökosteuern).

Bei weiterhin günstigen Randbedingungen für kleine dezentrale Energieerzeugungsanlagen kann sich die Mikro-KWK in den nächsten Jahren sehr positiv entwickeln. Laut einer aktuellen Analyse der Unternehmensberatung Frost & Sullivan werden sich die Anlagen in den Jahren 2005 bis 2007 als Alternative zu konventionellen Heizungsanlagen etablieren und einen echten Massenmarkt bilden. Bis 2010 sollen demnach in Europa Mikro-KWK-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 3,5 GW_{el} installiert werden. Dabei soll der Umsatz von rd. 20 Mio. € (weniger als 2.000 Anlagen) im Jahr 2000 auf über 2 Mrd. € (ca. 500.000 Anlagen) im Jahr 2010 ansteigen (Bild 1). Bei dieser optimistischen Prognose wird davon ausgegangen, dass die Regierungen finanzielle Anreize für eine umweltfreundlichere Energieerzeugung gewähren, um die gesetzten Klimaschutzziele zu erreichen.

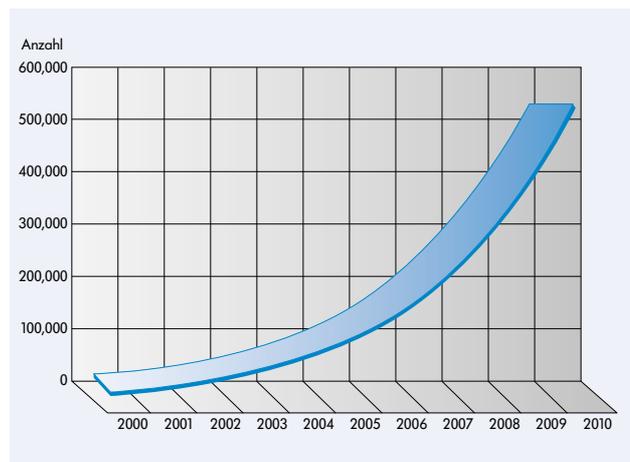


Bild 1: Prognose des Einsatzes von Mikro-KWK-Anlagen bis 2010

Verbrennungsmotoren

Funktion, Technik und Innovationen

Mit gasmotorischen Blockheizkraftwerken begann Anfang der 80er Jahre die Kraft-Wärme-Kopplung im Leistungsbereich zwischen 10 und 1.000 kW_{el}. Ausführliche Informationen zu den Grundlagen und Einsatzmöglichkeiten von verbrennungsmotorischen BHKW-Anlagen sind der **ASUE-Broschüre „BHKW-Grundlagen“** und weiteren ASUE-Broschüren zu verschiedenen Spezialthemen dieses Bereiches zu entnehmen.

Inzwischen ist die Leistungspalette sowohl nach oben wie auch nach unten erweitert worden. Die Anlagen bis zu 10 kW elektrischer Leistung entwickelten sich in letzter Zeit in Bezug auf Anzahl und Wirtschaftlichkeit sehr erfreulich.

100.000 km! Diese Entwicklung im Bereich der Kleinmotoren war eine ganz wesentliche Voraussetzung zum Erreichen von akzeptablen Instandhaltungskosten.

Zur Senkung der Abgasemissionen kommen bei den Kleinmotoren die gleichen technischen Konzepte (Magermotoren mit Oxidationskatalysator oder $\lambda=1$ -Maschinen mit Dreiwegekatalysator) zum Einsatz wie bei den größeren BHKW.

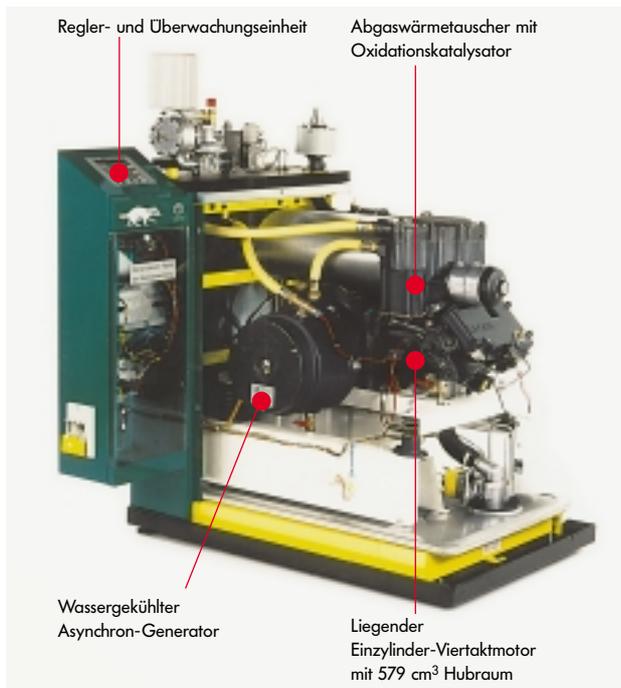


Bild 2: Aufbau einer kompakten Mikro-BHKW-Anlage

Als Antriebe dienen z. T. speziell für lange Betriebszeiten entwickelte Otto-Kleinmotoren – überwiegend 1-Zylinder-Aggregate –, die Lebensdauern bis zu 80.000 h erreichen können (Bild 2).

Erstaunlich sind die langen Wartungsintervalle von bis zu 4.000 h. Verglichen mit einem Pkw entspricht dies einer Fahrstrecke von über

Monovalenter Betrieb

Mehrere Hersteller bieten inzwischen den monovalenteren BHKW-Einsatz an. Damit ist gemeint, dass das BHKW die alleinige Heizquelle für das Gebäude ist. Zeiten geringeren Wärmebedarfs (im Vergleich zur BHKW-Heizleistung) werden durch einen geeigneten Wärmespeicher überbrückt, damit der Motor nicht zu häufig taktet (vgl. Bild 3). Der Wärmespeicher ist ebenfalls in der Lage, kurzfristig eine thermische Mehrleistung abzugeben (z. B. für ein Duschbad). Ist das BHKW nicht leistungsregelbar, müssen Stromüberschüsse an das EVU-Netz abgegeben werden.

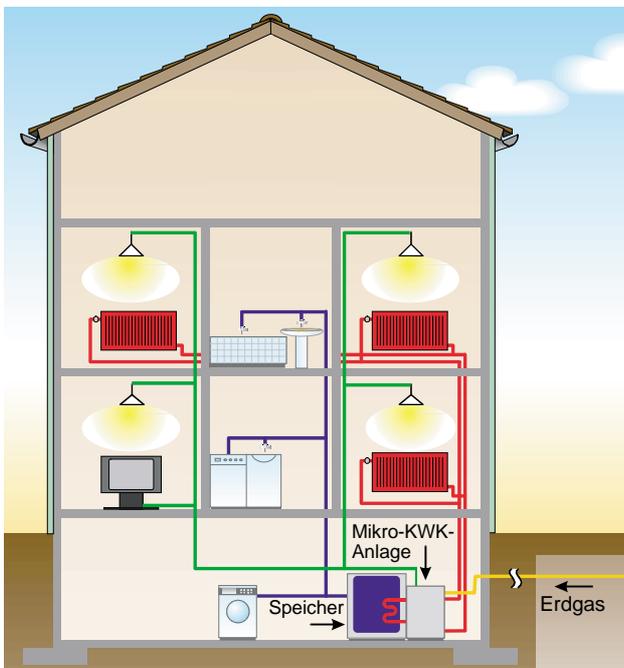


Bild 3: Monovalenter Betrieb als Hausenergiezentrale, BHKW nicht leistungsregelbar

Alternativ hierzu gibt es mittlerweile leistungsregelbare BHKW, deren elektrische Leistung (z. B. im Bereich 2–4,5 kW_e) dem tatsächlichen Objektbedarf angepasst werden kann (stromgeführter Betrieb, vgl. Bild 4). Die Leistungsregelung erfolgt durch Variation der Motordrehzahl. Der direkt gekoppelte Generator erzeugt eine Wechselspannung mit variabler Frequenz, die über eine Leistungselektronik zuerst gleich geregelt und dann auf netzkonforme 50 Hz Wechselstrom umgeformt wird (Bild 5).

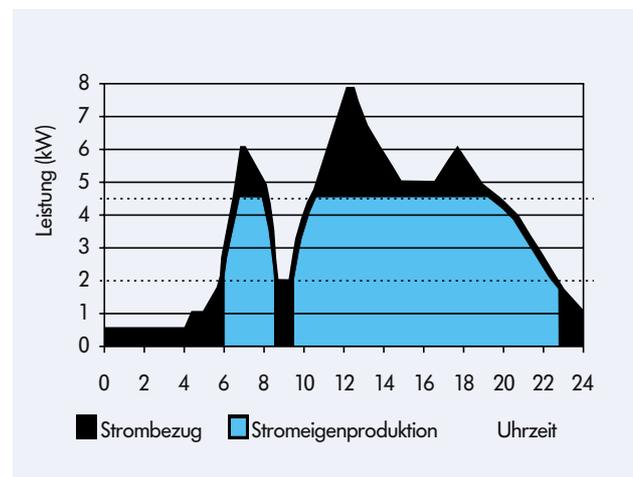


Bild 4: Fahrweise eines leistungsvariablen BHKW (2–4,5 kW_e) mit stromgeführtem Betrieb

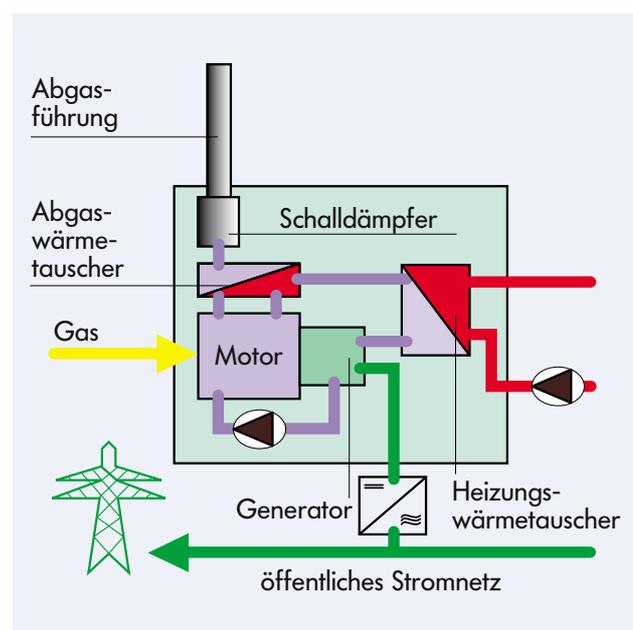


Bild 5: Schematischer Aufbau einer netzgekoppelten Mikro-BHKW-Anlage

Netzersatzbetrieb

Verbrennungsmotorische Mikro-BHKW gibt es seit kurzem auch in verschiedenen Ausstattungen für den Netzersatzbetrieb. Solange das öffentliche Netz zur Verfügung steht, arbeitet das BHKW parallel zum Netz. Im Störfall übernimmt das BHKW die Stromversorgung im Netzersatzbetrieb. Dabei wird über eine externe Trennschaltstelle der Netzparallelbetrieb unterbrochen, das BHKW abgeschaltet und dann im leistungsgeregelten Inselbetrieb wieder hochgefahren (Bild 6).

Bei Bedarf einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) kann durch Kombination des BHKW mit einer dreiphasigen USV-Online-Anlage ein unterbrechungsfreier Betrieb (mit nicht zeitlich begrenzter elektrischer Versorgungsdauer im Inselbetrieb) sichergestellt werden.

Zielgruppen für diese Anlagen:

- Rettungs-, Feuerwehr-, Polizeistationen
- Banken, Verwaltungsgebäude (EDV)
- Produktionsbetriebe mit empfindlichen Stromverbrauchern

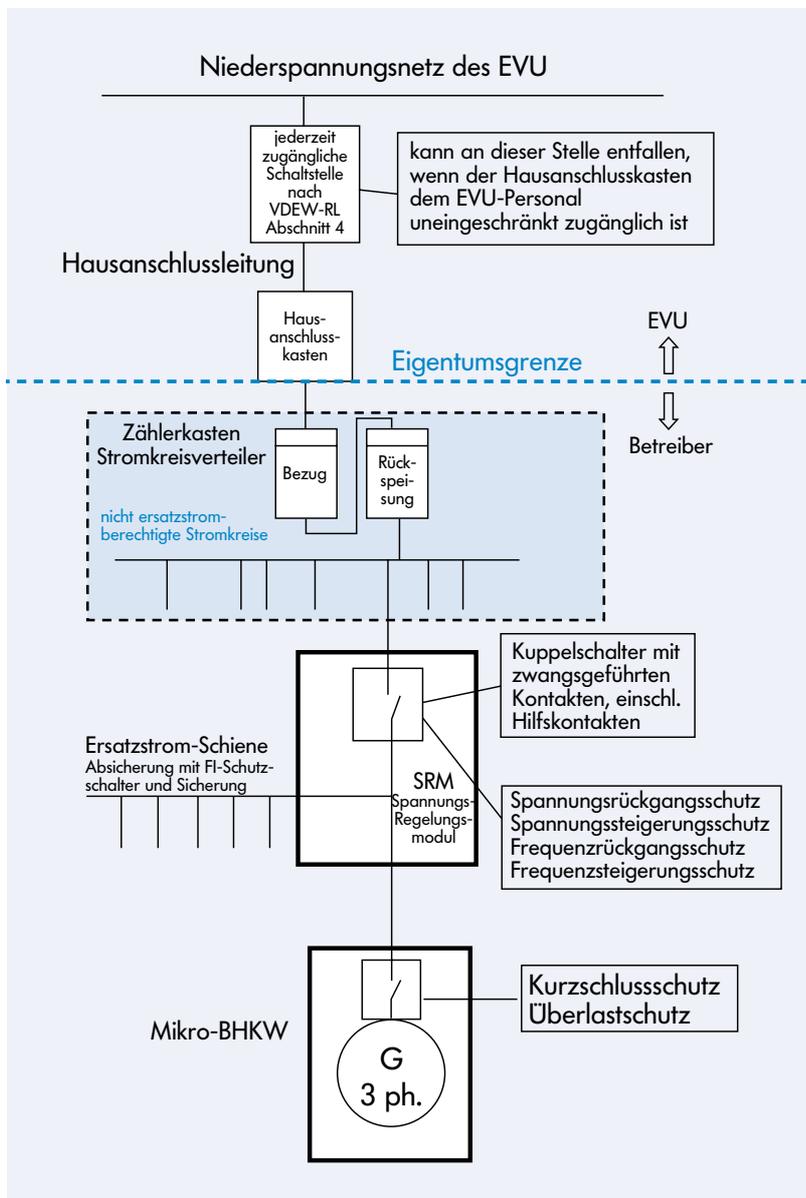


Bild 6: BHKW mit Netzersatzbetriebsfunktion

Inselbetrieb

Entlegene Standorte wie z. B. Hütten auf Bergen oder Inseln können von verbrennungsmotorischen Mikro-BHKW nunmehr im Inselbetrieb (d. h. ohne Netz-anbindung) mit Strom versorgt werden. In diesen Fällen kommt häufig Flüssiggas als Antriebsenergie zum Einsatz. Der Inselbetrieb erfordert zwingend eine Leistungsregelung. Diese lässt sich nach bisherigen Erfahrungen wesentlich besser mit Gasmotoren als mit kleinen Diesel-Aggregaten realisieren.

Betriebserfahrungen

Die Gas-Kleinmotoren haben sich im mehr-jährigen Dauerbetriebseinsatz bisher als äußerst robust und langlebig erwiesen. Einzelne Motoren haben bereits über 80.000 h Laufzeit erreicht! Mittlerweile sind in Deutschland mehrere Tausend verbrennungsmotorische Mikro-BHKW-Anlagen erfolgreich in Betrieb, über die in der Fachliteratur auch bereits vielfältig berichtet wurde.

Durch dezentrale Organisation in Zusammenarbeit mit flächendeckenden Servicepartnern,

durch lange Wartungsintervalle und durch zuverlässige Bauteile konnten die Instandhaltungskosten auf ca. 2 bis 2,5 Cent/kWh_{el} reduziert werden (vgl. **ASUE-Broschüre „BHKW-Kenn-daten 2001“**).

Die folgende Tabelle enthält Hinweise auf Lieferanten von Mikro-BHKW-Anlagen. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Außerdem ergeben sich kontinuierlich Änderungen. Eine aktuelle Anbieterübersicht über Blockheizkraftwerke mit den kompletten Anschriften der Anbieter kann jederzeit im **Internetauftritt www.asue.de** in der **Rubrik „Wer bietet an?“** eingesehen werden.

Anbieterübersicht Verbrennungsmotoren

Nr.	Produktbezeichnung, Hersteller/Kontakt	Leistungsdaten	Besonderes	Preise o. MWSt.
1	Dachs HKA Senertec, Schweinfurt Telefon 097 21/6 51-0 info@senertec.de www.senertec.de	5,5 kW _{el} bei TA Luft 5,0 kW _{el} bei 1/2 TA Luft 10,4–12,5 kW _{th} $\eta_{el} = 28\text{--}30\%$ 579 cm ³ Einzylinder	Magermotor/Oxikat Erdgas, Flüssiggas, HEL unterschiedliche Betriebsweisen möglich: Netzparallel-, Netzersatz-, reiner Insel- oder monovalenter Betrieb	ab 10.000,- €
2	Ecopower Valentin Energie- und Umwelttechnik GmbH, Mainz Telefon 061 31/91 35 70 valentin@ecopower.de www.ecopower.de	1,3–4,7 kW _{el} 4,0–12,5 kW _{th} $\eta_{el} = 25\%$ 272 cm ³ Einzylinder	modulierbare Leistung, variable Drehzahlen, geregelter 3-Wege-Kat, 1/2 TA Luft serienmäßig, Gesamtwirkungsgrad immer > 90 %, Inselbetrieb möglich Erdgas/Flüssiggas (HEL ab Herbst 2002)	ab 11.198,- €
3	Energator GB 6 – 15 Giese Energie- und Regeltechnik, Puchheim Telefon 089/800 15 51 haustec@giese-gmbh.de www.giese-gmbh.de	5,5 kW _{el} bei TA Luft 12 kW _{th} 3-Zylinder-Kubota-Motoren	Netzparallelbetrieb und Inselbetrieb Erdgas und HEL	
4	„Plus 10“ Höfler BHKW, Lindau Telefon 083 82/2 50 57 info@hoefler-bhkw.de www.hoefler-bhkw.de	9,0 kW _{el} 21 kW _{th} leistungsregelbar PKW-Motor VW-Skoda 781.136 G 1.300 cm ³ 4-Zylinder	Erdgas, Flüssiggas, TA Luft Netzparallel- und Netzersatzbetrieb	ca. 12.000,- €
5	EAW Energieanlagenbau, Westenfeld Telefon 03 69 48/8 41 32 info@eaw-energieanlagenbau.de www.eaw-energieanlagenbau.de	6 kW _{el} 8 kW _{el}	Inselfähig Erdgas und HEL	ab 11.200,- € ab 13.800,- €

Stirlingmotoren

Funktion, Technik und Innovationen

Bei einem konventionellen Verbrennungsmotor (mit innerer Verbrennung) erhält man einen Arbeitsgewinn, indem man eine bestimmte Luftmenge bei niedriger Temperatur komprimiert, sie anschließend durch eine schnelle Verbrennung erhitzt und sie danach bei hoher Temperatur expandieren lässt. Dasselbe Prinzip, nämlich ein Arbeitsgas auf einem niedrigen Temperaturniveau zu komprimieren, um es anschließend auf einem hohen Temperaturniveau zu expandieren, liegt auch dem Stirlingmotor zugrunde.

Stirling hatte 1816 erkannt, dass eine periodische Änderung der Gastemperatur erreicht werden kann, indem man das Gas mit Hilfe eines Verdrängerkolbens zwischen einem Raum mit konstant hoher Temperatur und einem Raum mit konstant niedriger Temperatur hin und her bewegt. Um hierbei möglichst wenig Wärme zu verlieren, wurde zwischen den beiden Räumen ein Regenerator eingefügt, an den das heiße Gas beim Durchströmen Wärme abgibt,

bevor es in den gekühlten Raum eintritt. Beim Zurückströmen des Gases vom kalten Raum in den heißen Raum kann die im Regenerator gespeicherte Wärme dann wieder aufgenommen werden. Kombiniert man nun den Verdrängerkolben mit einem Arbeitskolben, so erhält man einen Stirlingmotor.

Nachdem das Arbeitsgas unter Abgabe von Wärme an den Regenerator vom Verdrängerkolben in den kalten Raum gefördert wurde, erzeugt es durch die mit seiner Abkühlung verbundene Volumenverringerung einen Unterdruck am Arbeitskolben, der sich hierdurch in Bewegung setzt und Arbeit verrichtet. Anschließend fördert der Verdrängerkolben das Arbeitsgas durch den Regenerator zurück in den heißen Raum. Die mit der aus dem Regenerator zurückgewonnenen und der von außen zugeführten Wärme verbundene Ausdehnung des Arbeitsgases führt nun zu einem Überdruck am Arbeitskolben, der jetzt wiederum Arbeit verrichten kann. Werden der Verdrängerkolben und der Arbeitskolben über ein Triebwerk oder ein schwingfähiges System im

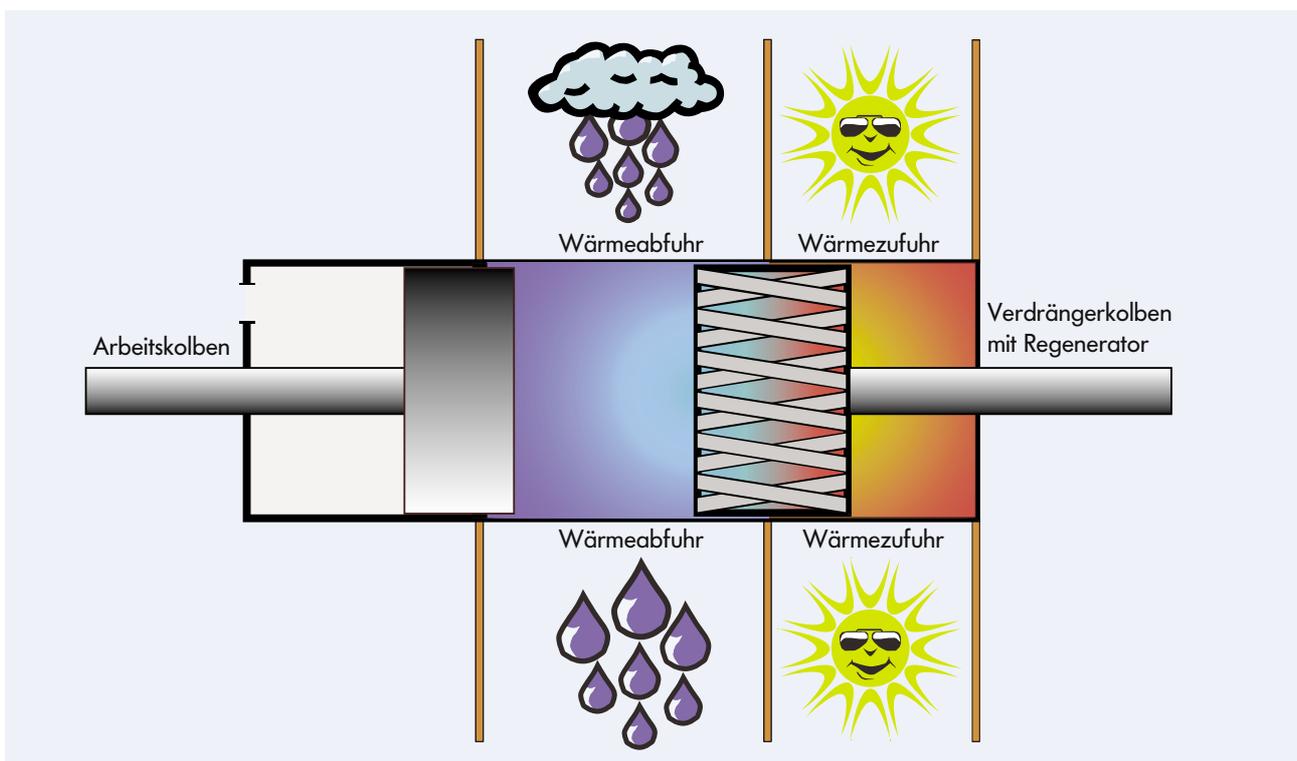


Bild 7: Funktionsprinzip eines Stirlingmotors

richtigen Phasenwinkel zueinander gekoppelt, so kann das gesamte System als selbstständige Wärme-Kraft-Maschine betrieben werden.

Prinzipiell kann jede Wärmequelle zur Beheizung des heißen Raumes verwendet werden, wodurch die Technik des Stirlingmotors vielseitig einsetzbar ist. Ein weiterer Vorteil des Stirlingprinzips mit einer externen Verbrennung liegt im Vergleich zu herkömmlichen Otto- oder Dieselmotoren in den deutlich niedrigeren Emissionswerten.

Im Laufe der Zeit hat die Weiterentwicklung des Stirlingmotorprinzips eine Vielzahl von unterschiedlichen Bauformen hervorgebracht. Man unterscheidet hierbei neben der Anzahl der Kolben und Zylinder auch die Position dieser Teile zueinander bzw. zum Regenerator. Ein 2-Kolben-2-Zylinder-Stirlingmotor mit externem Regenerator wird als α -Typ, ein 2-Kolben-1-Zylinder-Stirlingmotor mit externem Regenerator als β -Typ und ein Stirlingmotor mit im Kolben integriertem Regenerator als γ -Typ bezeichnet.

Betriebserfahrungen

Der Stirlingmotor hat in Feldversuchen unter Beweis gestellt, dass seine Technologie heute so weit ausgereift ist, dass ein zuverlässiger Betrieb mit guten Wirkungsgraden gewährleistet werden kann. Grundsätzlich lassen sich auch Emissionswerte im Bereich handelsüblicher Gasbrenner realisieren. Ferner ist bekannt, dass ein Stirlingmotor aufgrund der kontinuierlichen externen Verbrennung deutlich leiser arbeitet als ein vergleichbarer Gas-Ottomotor.

Bislang wurden bei den Arbeitsgasverlusten von Stirlingmotoren die größten Entwicklungsschwierigkeiten gesehen. Die Erfahrungen mit mehreren Stirlingmotoren im Feldtest haben allerdings gezeigt, dass dieses Problem bisweilen überbewertet wurde.

Das Stirlingprinzip selbst ist ausgesprochen zuverlässig, anwenderfreundlich und pflegeleicht. Die geschlossene Bauweise lässt keine Verbrennungsrückstände in das Motorinnere gelangen. Es gibt keinen Ölverbrauch und keinen Ölwechsel. Die

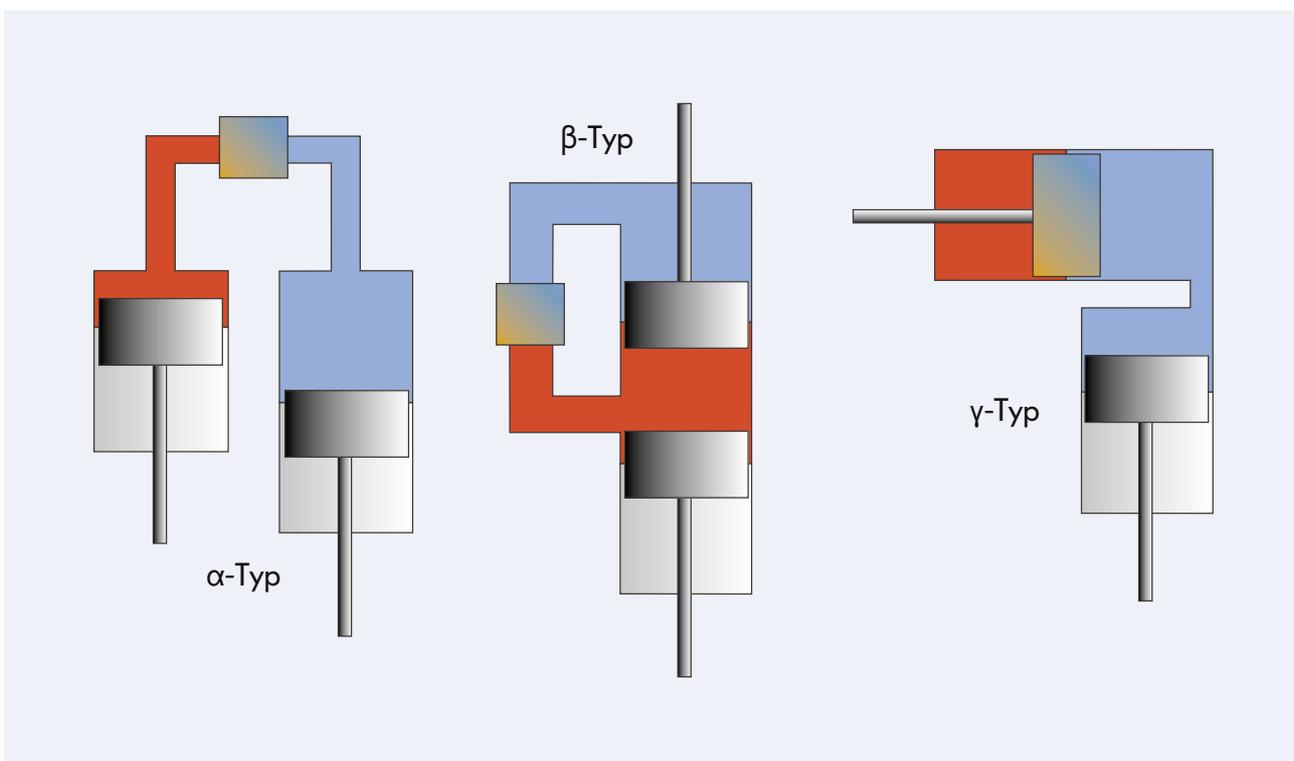


Bild 8: Anordnung von Kolben, Zylinder und Regenerator bei verschiedenen Stirlingmotor-Varianten

Wartungsintervalle liegen bei 5.000 bis 8.000 Stunden. Die erreichbaren Wirkungsgrade können bereits als konkurrenzfähig bezeichnet werden, obgleich das Optimierungspotenzial noch längst nicht ausgeschöpft ist. Da die Investitionskosten für Stirlingmotoren zur Zeit noch vergleichsweise hoch sind (Einzelanfertigungen), kann ein wirtschaftlicher Betrieb derzeit noch nicht erzielt werden. In diesem Punkt besteht somit primär Entwicklungsbedarf, dem nachgegangen wird.

Die zukünftigen Entwicklungen im Bereich der Stirlingmotoren lassen somit hoffen, dass für den Bereich der Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung in Kürze eine viel versprechende und zukunftsweisende Technologie zur Verfügung stehen wird. Gemessen an den zur Zeit auf dem Markt angebotenen verbrennungsmotorischen Anlagen stellt das Potenzial des Stirlingmotors eine nicht zu unterschätzende Alternative dar.

Bisher ist erst eine Stirling-Entwicklung bis zur Serienproduktion weiterentwickelt worden, die im Herbst 2001 startete.

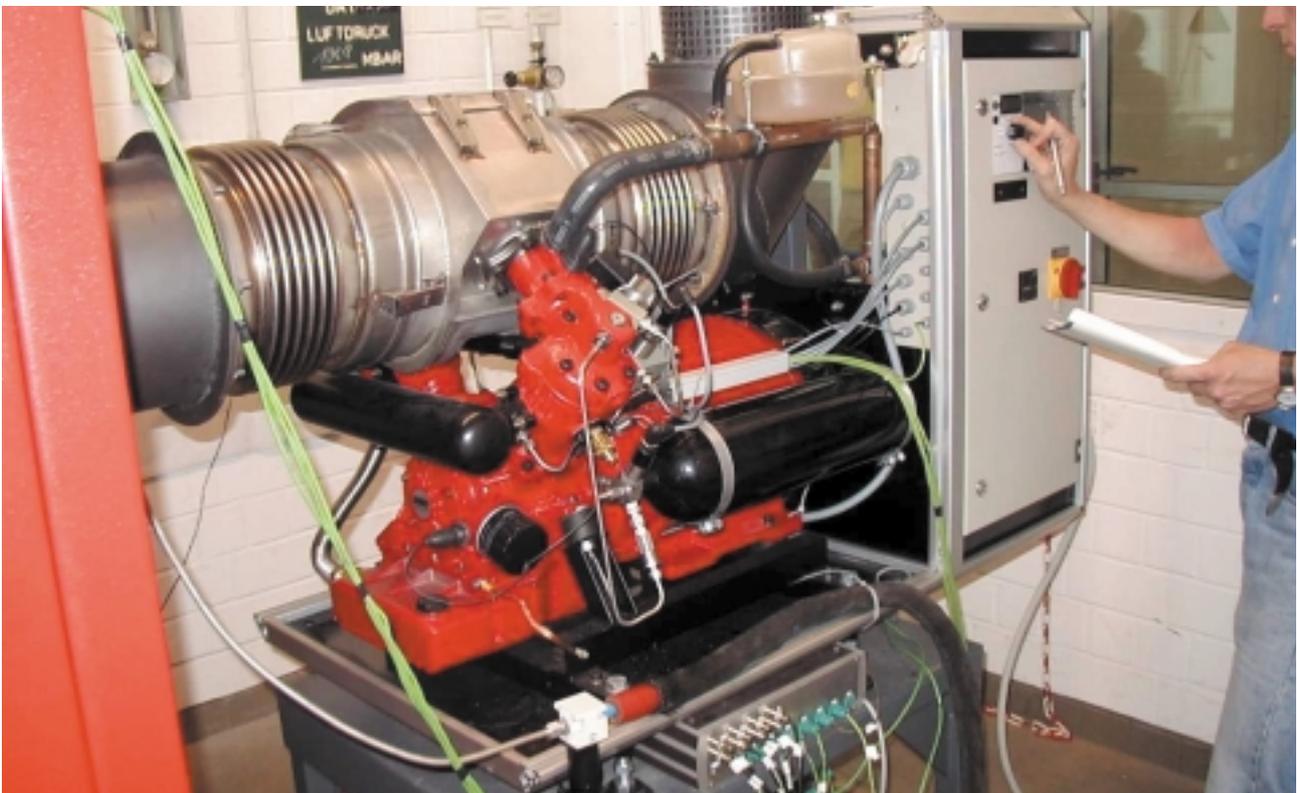


Bild 9: Stirlingmotor im Labor

Anbieterübersicht Stirlingmotoren

Nr.	Produktbezeichnung, Hersteller/Kontakt	Leistungsdaten	Besonderes
1	STIRLING Engine Erdgas-BHKW-Modul Solo, Sindelfingen Telefon 070 31/301-0 info@stirling-engine.de www.stirling-engine.de	2-9 kW _{el} 8-24 kW _{th} stufenlos regelbar	Neuer erdgasbetriebener Floxbrenner

Gasturbinen

Funktion, Technik und Innovationen

Mikrogasturbinen sind kleine Hochgeschwindigkeitssysteme zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung, die derzeit im Leistungsbereich ab 28 kW_{el} verfügbar sind. Sie bestehen im Wesentlichen aus den Hauptkomponenten Verdichter, Brennkammer, Turbine, Generator und Rekuperator. Der Rekuperator dient zur internen Luftvorwärmung, wodurch diese kleinen Aggregate relativ hohe Wirkungsgrade von 25–30 % erreichen.

Mikrogasturbinen sind als Ein-Wellen-Anlagen ohne Getriebeeinheit konstruiert und werden mit Drehzahlen zwischen 70.000 bis über 100.000 U/min. betrieben. Der dabei generierte hochfrequente Wechselstrom wird mit Hilfe eines digitalen Leistungsreglers zunächst in Gleichspannung umgewandelt und anschließend in netzkonforme Wechselspannung invertiert. Der erforderliche

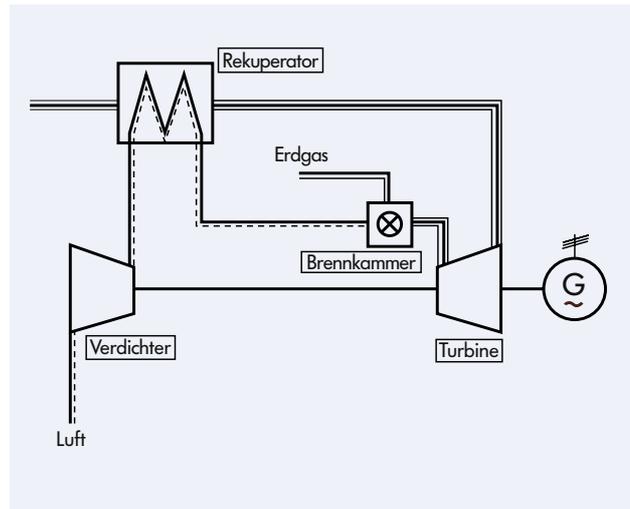


Bild 10: Aufbau einer Mikrogasturbine

Gasversorgungsdruck der Anlagen liegt bei ca. 3,8 bis 8,5 bar. Die meisten Hersteller haben jedoch einen Gasverdichter im Lieferumfang, so dass die Anlagen am Niederdrucknetz betrieben werden können.



Bild 11: Mikrogasturbinen-KWK-Anlage

Die Abgastemperaturen der Aggregate liegen zwischen ca. 270 und 680 °C. Dadurch ist es möglich, in einem nachgeschalteten Abhitzekeessel Dampf zu erzeugen. Serienmäßig werden die Anlagen jedoch mit einem Wärmetauscher zur Warmwassererzeugung (90/70 °C) angeboten. Durch diese Flexibilität erstrecken sich die Einsatzbereiche über industrielle und gewerbliche Anwendungen zur Strom- und Dampferzeugung, z. B. in Wäschereien und Brauereien oder zur Trocknung in der Keramikindustrie, bis hin zur konventionellen Kraft-Wärme-Kopplung in Krankenhäusern, Hotels und Verwaltungsgebäuden.

Zu den Innovationen dieser Technologie zählen ebenso die kompakte Bauweise in schallabsorbierenden Gehäusen, die Rekuperatortechnik, die modernen Brennersysteme, wodurch extrem niedrige Schadstoffemissionen erreicht werden, wie auch die relativ langen Wartungsintervalle von 4.000 – 8.000 Betriebsstunden. Ein Hersteller arbeitet auch mit patentierten Luftdichtungen, die ölgeschmierte Gleitlager sowie die Zusatzkomponenten für eine Ölschmierung wie Ölpumpe und Ölkühler überflüssig machen.

Anbieterübersicht Gasturbinen

Nr.	Hersteller/ Produkt:	Technik:	Besonderes:	Investitions- kosten:	Vertriebspartner:	Ansprechpartner:
1.	Capstone Turbine Corperation	<p>µT 28-60/80 L für Gaseingangsdruck > 20 mbar (ü) 28 kW_{el}/65 kW_{th} Brennstoffeinsatz: 112 kW η_{el} = 25 % η_{ges} = 83 % 96.000 U/min Abm.: L x B x H (mm): 2.600 x 800 x 1.900</p> <p>µT 28-60/80 H für Gaseingangsdruck > 3,8 bar (ü) 30 kW_{el}/65 kW_{th} Brennstoffeinsatz: 112 kW η_{el} = 27 % η_{ges} = 85 % 96.000 U/min. Abm.: L x B x H (mm): 2.600 x 800 x 1.900</p> <p>µT 60-60/80 H für Gaseingangsdruck > 5,2 bar (ü) 60 kW_{el}/120 kW_{th} Brennstoffeinsatz: 215 kW η_{el} = 27 % η_{ges} = 85 % 96.000 U/min. Abm.: L x B x H (mm): auf Anfrage</p>	<p>sehr geringe Emissionen</p> <p>NO_x < 20 mg/Nm³ bei 15 % Rest-O₂ CO < 40 mg/Nm³ bei 15 % Rest-O₂</p> <p>Ein-Wellen-Konstruktion mit patentierter Luftlagerung, Schnelllaufender Permanent- magnet-Generator</p> <p>ca. 1.000 Starts/Jahr Netzparallel- und Spitzen- lastbetrieb, konst. Verbrennungsluftvorwärmung über integrierten Rekuperator. Interner, schmierölfreier Brenngasverdichter serienmäßig für p > 20 mbar (ü), optional ohne Verdichter für p > 3,8 bar (ü)</p> <p>externer Brenngasverdichter optional für p > 20 mbar (ü)</p>	<p>ca. 1.750,- €/kW</p> <p>ca. 1.500,- €/kW</p> <p>ca. 1.200,- €/kW</p>	<p>G.A.S. Energietechnik GmbH Hessenstraße 57 47809 Krefeld</p> <p>Tests bei Ruhrgas AG, Dorsten</p>	<p>Herr Ihle Tel. 0 21 51/52 55-200 r.ihle@gas-energie.de</p> <p>Herr Korf Tel. 0 21 51/52 55-235 m.korf@gas-energie.de</p> <p>Herr Dr. Jeken Tel. 0 23 62/93 85 18</p>

Nr.	Hersteller/ Produkt:	Technik:	Besonderes:	Investitions- kosten:	Vertriebspartner:	Ansprechpartner:
2.	Elliot Energy Systems Bowman- Power- Systems	TG 45 Gasvordruck 6,5 bar, optional für > 50 mbar 45–48 kW _{el} / 80–255 kW _{th} Brennstoffeinsatz: 200–320 kW $\eta_{el} = 16,8\text{--}22,5\%$, $\eta_{ges.}$ bis 85%, 116.000 U/min. Abm.: L x B x H (mm): 2.000 x 800 x 1.600	sehr geringe NO _x - und CO-Emissionen Permanentmagnet-Generator Ein-Wellen-Konstruktion max. 20 Starts/Jahr ausschließlich Dauerbetrieb	ca. 1.200,- €/kW	Gasturbo GmbH, Büttelborn Test beim Institut für Energie- und Umwelt- technik e. V. (IUTA), Duisburg	Herr Paul Tel. 0 61 52/94 95 20 Herr Dr. Koepsel Tel. 0 20 65/4 18-2 24
		TG 60 Gasvordruck 6,5 bar, optional für > 50 mbar 62–68 kW _{el} / 102–313 kW _{th} Brennstoffeinsatz: 258–439 kW $\eta_{el} = 15,5\text{--}24\%$, $\eta_{ges.}$ bis 85%, 105.000 U/min. Abm.: L x B x H (mm): 2.300 x 800 x 1.600	Luftvorwärmung über Rekuperator mit stufenlosem Bypass Brenngasverdichter optional	ca. 1.250,- €/kW		
		TG 80 Gasvordruck 6,5 bar, 80–85 kW _{el} / 150–420 kW _{th} $\eta_{el} = 16\text{--}27\%$, $\eta_{ges.}$ bis 85% 68.000 U/min. Abm.: L x B x H (mm): 3.100 x 880 x 1.950	Luftvorwärmung über Rekuperator mit stufenlosem Bypass	ca. 1.100,- €/kW		
3.	Turbec	T 100 CHP Gasvordruck 6–9,5 bar, optional > 25 mbar 100 kW _{el} / 152 kW _{th} Brennstoffeinsatz: 333 kW $\eta_{el} = 30\%$, $\eta_{ges.}$ ca. 76 % 70.000 U/min. Abm.: L x B x H (mm): 2.900 x 840 x 1.900	sehr geringe NO _x - und CO-Emissionen Permanentmagnet-Generator Ein-Wellen-Konstruktion ca. 1.000 Starts/Jahr Netzparallel- und Spitzen- lastbetrieb, konstante Luftvor- wärmung über Rekuperator Brenngasverdichter optional	ca. 995,- €/kW	ABB Energiesysteme GmbH, Essen Pro2 Anlagentechnik GmbH, Willich (speziell Bio-, Deponie-, Gruben- und Klärgas mit reduzierter Leistung 90–95 kW _{el}) Test bei Thyssengas	Herr Itjeshorst Tel. 02 01/10 04-6 76 Herr Waerdt Tel. 0 21 54/4 88-1 10 Herr Dietze Tel. 02 03/55 55-22 95

Betriebserfahrungen

Aufgrund der relativ neuen Technologie sind bisher erst wenige Anlagen in Deutschland installiert. Diese Anlagen bestätigen jedoch die

Zuverlässigkeit dieser Technik. Ebenso können geringe Betriebskosten aufgrund weniger Verschleißteile und langer Wartungsintervalle bestätigt werden.

Brennstoffzellen

Funktion, Technik und Innovationen

Eine Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler, der die im Brennstoff enthaltene Energie direkt und ohne Umweg in Strom und Wärme wandelt.

Das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle ist mit der Umkehrung der Elektrolyse des Wassers vergleichbar. Während bei der Elektrolyse durch Zufuhr von elektrischer Energie das Wasser-

wird ein Teil des Wasserstoffes in Wasserstoff-Protonen H^+ und Elektronen e^- aufgespalten. Die bei diesem Vorgang frei werdenden Elektronen fließen über den metallischen Leiter zur Kathode und können dabei elektrische Arbeit verrichten.

An der Kathode bildet der Sauerstoff mit den Elektronen Sauerstoff-Ionen (O^{2-}). Um den Stromkreis zu schließen, müssen die Wasserstoff-Protonen (möglich sind auch andere Ladungs-

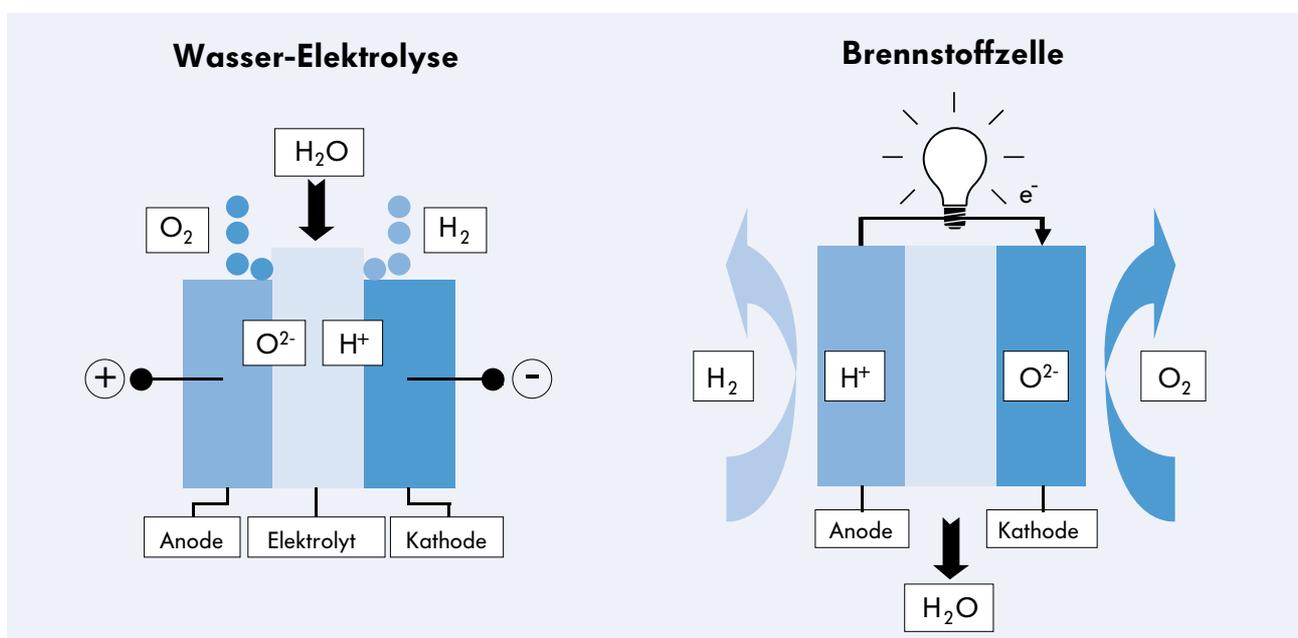


Bild 12: Funktionsprinzipien von Wasser-Elektrolyse und Brennstoffzelle

molekül in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird, reagieren in einer Brennstoffzelle H_2 und O_2 unter Abgabe von elektrischer und thermischer Energie zu Wasser.

Eine Brennstoffzelle besteht im Prinzip aus zwei Elektroden (einer Anode und einer Kathode), die durch einen gasundurchlässigen Elektrolyten voneinander getrennt sind, wobei der Elektrolyt für bestimmte Ladungsträger, z. B. Protonen, durchlässig ist. Die Elektroden besitzen eine poröse, gasdurchlässige Struktur.

Während des Betriebes einer Brennstoffzelle werden an der Anode Wasserstoff und an der Kathode Sauerstoff vorbeigeführt. Zunächst

träger) durch den Elektrolyten zur gegenüberliegenden Kathode gelangen. Dort verbinden sich Wasserstoff-Protonen und Sauerstoff-Ionen zu Wasser.

Die Spannung einer einzelnen Brennstoffzelle beträgt etwa 0,7 V. Um eine sinnvolle Stromauskopplung zu ermöglichen, werden mehrere Zellen in Reihe zu einem Brennstoffzellen-Stapel zusammengeführt. Dadurch können unterschiedliche Leistungen erreicht werden.

Da der für die Brennstoffzellen-Reaktion benötigte Wasserstoff nicht im erforderlichen Maße verfügbar ist, wird in einem Reformer aus Kohlenwasserstoffen ein wasserstoffreiches

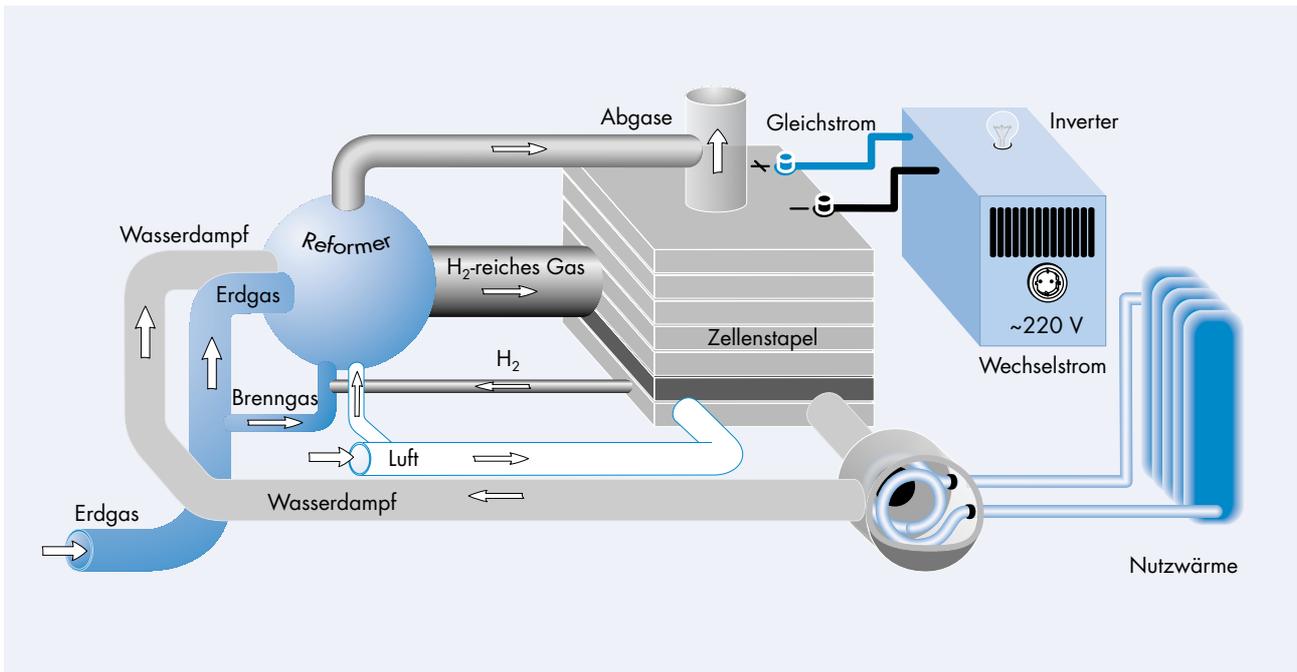


Bild 13: Prinzipieller Aufbau einer Brennstoffzellen-KWK-Anlage

Gas erzeugt. Bevorzugt kommt Erdgas zum Einsatz. Gegenüber motorischen BHKW haben Brennstoffzellen höhere elektrische Wirkungsgrade, ein besseres Teillastverhalten und geringere Abgas- und Geräuschemissionen. Ausführliche Informationen über die Grund-

lagen und Einsatzmöglichkeiten von stationären Brennstoffzellenanlagen sowie über die unterschiedlichen Brennstoffzellentypen und Entwicklungslinien finden sich in der **ASUE-Broschüre „Stationäre Brennstoffzellen“**.



Bild 14: Laboraufbau einer PEM-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage zur Hausenergieversorgung (rechts Brennstoffzellenteil, links Reformerteil)

Betriebserfahrungen

Die Einbindung eines Brennstoffzellen-Heizgerätes erfolgt analog zu einem Kleinst-BHKW. Zusätzlich zum Gasanschluss, zur Anbindung an Heizungs- und Stromnetz und zur Abgasabführung kann eine Wasserzuführung für die Dampfbereitstellung im Reformier erforderlich sein.

Derzeit laufen in Deutschland mehrere Pilotprojekte mit Brennstoffzellen-Heizgeräten. Erste Feldtests sind für das Jahr 2002 geplant. Da es sich bei den verwendeten Geräten um Prototypen und Vorserienmodelle handelt, können noch keine allgemein gültigen Aussagen zu Betrieb und Wartung gemacht werden. Da auch noch nicht absehbar ist, welche Anbieter und Systeme sich durchsetzen werden, wird hier darauf verzichtet, die Entwickler aufzulisten. Mikro-Brennstoffzellenanlagen für den stationären Einsatz als KWK-Anlage sind Ende 2001 noch nicht als Serienprodukt kommerziell erhältlich.

Fazit / Ausblick

In dieser Broschüre wurden 4 unterschiedliche Mikro-KWK-Entwicklungslinien vorgestellt, die den Trend der umweltschonenden, dezentralen Energieversorgung zukünftig abdecken können. Der Entwicklungsstand der einzelnen Techniken ist jedoch noch sehr unterschiedlich.

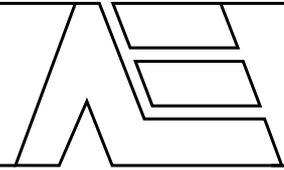
Bislang sind noch keine serienreife **Brennstoffzellen-Anlagen** kleiner elektrischer Leistung auf dem Markt verfügbar. Eine Reihe von Herstellern arbeitet (z. T. in Zusammenarbeit mit der Heizgeräteindustrie bzw. mit Versorgungsunternehmen) derzeit an der Entwicklung eines Brennstoffzellen-Heizgerätes für den Einsatz im Ein- bzw. Mehrfamilienhaus. Diese Konzepte basieren entweder auf dem Prinzip der oxidkeramischen (SOFC-) oder Polymerelektrolytmembran-(PEM-)Brennstoffzelle. Da insbesondere die PEM-Brennstoffzelle auch für den mobilen Einsatz von großem Interesse ist, sind die Forschungsetats hierfür groß und die Entwicklung verläuft rasant. Nach positivem Abschluss der Felderprobung wird ab 2004/5 mit der Markteinführung im Bereich der Mikro-KWK gerechnet. Wegen der Komplexität dieser Anlagen und der Vielfalt der noch zu lösenden Aufgaben ist derzeit keine verlässliche Prognose über den Zeithorizont möglich.

Stirlingmotoren für BHKW-Antriebe befinden sich im erweiterten Feldtest. Die Serienproduktion eines Herstellers startete im Herbst 2001. Bei positivem Testverlauf ist zu erwarten, dass der Verkauf an Endkunden in größeren Stückzahlen etwa 2003/4 erfolgt. Aufgrund der kontinuierlichen äußeren Verbrennung bei diesem Antriebskonzept liegen die vorteilhaften Anwendungsbereiche dort, wo Emissionen (Abgas und Lärm) besonders zu berücksichtigen sind. Eine stärkere Verbreitung setzt allerdings zusätzliche Erfolge bei kostensenkender Fertigung voraus.

Marktreife haben zwischenzeitlich die **verbrennungsmotorischen BHKW** erreicht. Die **Mikro-Gasturbinenanlagen** befinden sich an der Schwelle zur Marktreife. Diese Anlagen sind aktuell bei den in den beiden Tabellen ausge-

wiesenen Herstellern bzw. Packagern zu beziehen. In der Regel bieten die Lieferanten auch die erforderliche Serviceunterstützung bis hin zum „Full-Service-Vertrag“ an. Unter Berücksichtigung der KWK-Vorteile bei Strom- und Mineralöl-Ökosteuer sowie nicht anfallender Konzessionsabgaben bei objektbezogener Stromeigenerzeugung gibt es derzeit Marktnischen (Stromkunden im Haushalts- und vorzugsweise im nicht produzierenden Gewerbebereich) mit kostenneutraler oder leicht positiver Gesamtwirtschaftlichkeit. Eine weitere Unterstützung ist durch das KWK-Modernisierungsgesetz möglich, das eine besondere Förderung von kleinen BHKW-Anlagen vorsieht. In Verbindung mit der erzielbaren praktischen Umwelt- und Klimaentlastung durch den Einsatz dieser ausgereiften und verfügbaren Technik begrüßt die ASUE diese Entwicklung ausdrücklich.

Tritt die in Bild 1 prognostizierte Entwicklung ein, könnte eine **Vision** schon bald **Realität** werden: Viele Mikro-KWK-Anlagen können regelungsseitig miteinander verbunden und von einer Zentrale aus gesteuert werden. Damit können Wohn- oder Gewerbegebiete flächendeckend, umweltschonend und mit hoher Versorgungssicherheit mit Strom und Wärme versorgt werden. Dieses Modell wird „**virtuelles Kraftwerk**“ genannt, da die kleinen dezentralen Mikro-KWK-Anlagen die Leistung eines zentralen Kraftwerks erbringen und ggf. ersetzen können. Das „virtuelle Kraftwerk“ verbindet also die Vorteile des zentralen Großkraftwerks (Leistungserbringung, Stabilisierung des Netzes, Garantie der Versorgungssicherheit) mit den Vorteilen kleiner dezentraler KWK-Anlagen (Nähe von Energieerzeugung und -verwendung, d. h. die Reduzierung von Transportverlusten und die Möglichkeit, die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme zu nutzen).



Die 1977 gegründete ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., ein Zusammenschluss von 44 Gasversorgungsunternehmen, fördert die Weiterentwicklung und weitere Verbreitung sparsamer und umweltschonender Technologien auf Erdgasbasis.

Solchen Techniken den Weg in die praktische Anwendung zu ebnen ist das vorrangige Ziel der ASUE.

Aktivitäten

Fachpublikationen und Tagungen
Transferstelle neue Produkte
Preis der deutschen Gaswirtschaft
Medien- und Öffentlichkeitsarbeit

Arbeitskreise

Brennstoffzellen/Blockheizkraftwerke
Energiedienstleistungen
Erdgas und Umwelt
Gasturbinentechnik
Gaswärmepumpen und Kältetechnik
Haustechnik

Mitgliedsunternehmen

Badische Gas- und Elektrizitätsversorgung AG, Lörrach
Bayerngas GmbH, München
BEB Erdgas und Erdöl GmbH, Hannover
Dortmunder Energie- und Wasserversorgung GmbH
DREWAG Stadtwerke Dresden GmbH
egm Erdgas Mitteldeutschland GmbH, Kassel
EMB Erdgas Mark Brandenburg GmbH, Potsdam
Energieversorgung Filstal GmbH & Co. KG, Göppingen
Erdgas Mittelsachsen GmbH, Schönebeck
Erdgas Schwaben GmbH, Augsburg
Erdgas Südbayern GmbH, München
Erdgas Südsachsen GmbH, Chemnitz
Erdgas-Verkaufs-Gesellschaft mbH, Münster
Erdgasversorgungsgesellschaft Thüringen-Sachsen mbH (EVG), Erfurt
Fergas Nordbayern GmbH, Bamberg
Fergas Salzgitter GmbH
GASAG Berliner Gaswerke AG
Gasanstalt Kaiserslautern AG
Gasfernversorgung Mittelbaden GmbH, Offenburg
Gas-Union GmbH, Frankfurt
Gasversorgung Main-Kinzig GmbH, Gelnhausen
Gas- und Wasserversorgung Osthessen GmbH, Fulda
Gasversorgung Süddeutschland GmbH, Stuttgart
Gasversorgung Westerwald GmbH, Höhr-Grenzhausen
Gasversorgung Westfalica GmbH, Bad Oeynhausen
Gaswerksverband Rheingau AG, Wiesbaden
HEIN GAS Hamburger Gaswerke GmbH
Mainova AG, Frankfurt
MITGAS Mitteldeutsche Gasversorgung GmbH, Halle
Niederrheinische Gas- und Wasserwerke GmbH, Duisburg
Oberhessische Gasversorgung GmbH, Friedberg
RGW Rechtsrheinische Gas- und Wasserversorgung AG, Köln
Ruhrgas AG, Essen
RWE Gas AG, Dortmund
Saar Ferngas AG, Saarbrücken
SpreeGas GmbH, Cottbus
Stadtwerke Essen AG
Stadtwerke Neuss Energie und Wasser GmbH
Stadtwerke Paderborn GmbH
Südhessische Gas und Wasser AG, Darmstadt
Thüga AG, München
Thyssengas GmbH, Duisburg
VNG – Verbundnetz Gas AG, Leipzig
Wingas GmbH, Kassel

