



Kraft und Wärme koppeln

Eine Fahrradfahrt bietet zweifachen Nutzen: man ist mobil und fördert die Fitness. Doppelten Nutzen verspricht auch die Kraft-Wärme-Kopplung. Diese Kraftwerkstechnik gewinnt in einem Prozess sowohl Strom als auch Wärme. Das spart Energie und entlastet die Umwelt.

EINLEITUNG

In Deutschland werden derzeit etwa 90% des Stroms in großen Wärmekraftwerken erzeugt und über Fernleitungen verteilt. Diese Großkraftwerke müssen kontinuierlich mit Brennstoffen versorgt werden und benötigen viel Wasser für die Kühlung. Daher sind wichtige Faktoren bei der Standortwahl eines Großkraftwerks beispielsweise die Nähe zu Kohlenlagerstätten und zu Flüssen sowie die Verkehrsinfrastruktur (z. B. Häfen). Derartige Kraftwerke wandeln von der eingesetzten Primärenergie im Schnitt nur 38% in Strom um. Aber etwa 62% der Ursprungsenergie fallen als Wärme an. In der Umgebung der Kraftwerke besteht für derartige Wärmemengen meist zu wenig Nachfrage und Wärme lässt sich nicht wirtschaftlich über große Entfernungen transportieren. Großkraftwerke geben diese Wärme meist ungenutzt an die Umwelt ab. Nur die – meist in städtischen Ballungsräumen zu findenden – Heizkraftwerke mit angeschlossenen Fernwärmenetzen nutzen beide Energieformen.

Um neben dem Strom auch die Wärme nutzen zu können, braucht man kleinere Kraftwerkseinheiten, die dezentral in der Nähe der Wärmeabnehmer arbeiten. Aus wirtschaftlichen Gründen sollte die Wärmenachfrage während des ganzen Jahres möglichst gleichmäßig sein. Derartige Anlagen fallen unter den Begriff „Kraft-Wärme-Kopplung“ (KWK). Typische Einsatzgebiete von KWK sind: Krankenhäuser, Bürogebäude, Industrie- und Gewerbebetriebe sowie Wohnsied-

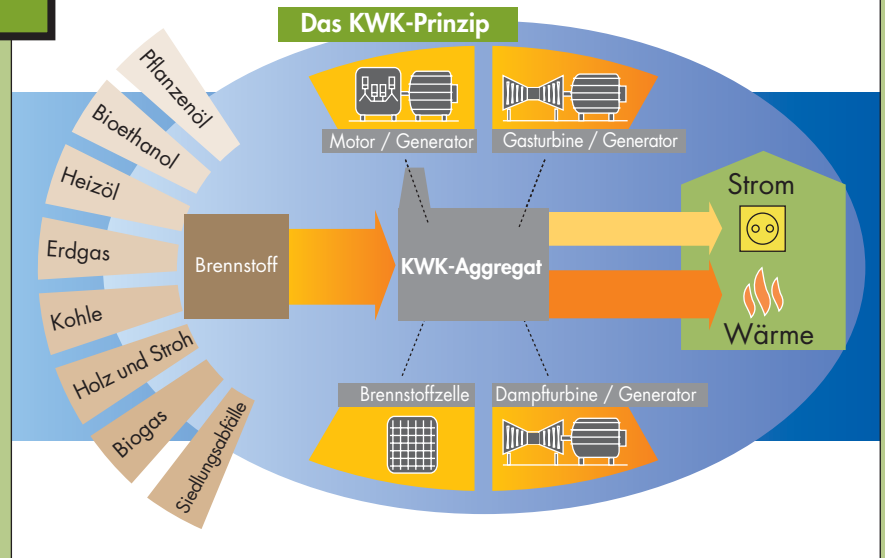


Abb. 1

Das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung [Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V.]

lungen und Mehrfamilienhäuser. Die Wärme kann nicht nur zur Gebäudeversorgung mit Heizwärme und Warmwasser, sondern auch als Prozesswärme, zur technischen Kälteerzeugung sowie zur Druckluftversorgung eingesetzt werden. In Deutschland waren Ende 2004 mehr als 13.000 Aggregate mit einer elektrischen Leistung von ca. 3.000 MW in Betrieb. Nachfolgend im Mittelpunkt steht die „kleine“ KWK – die Blockheizkraftwerke (BHKW).

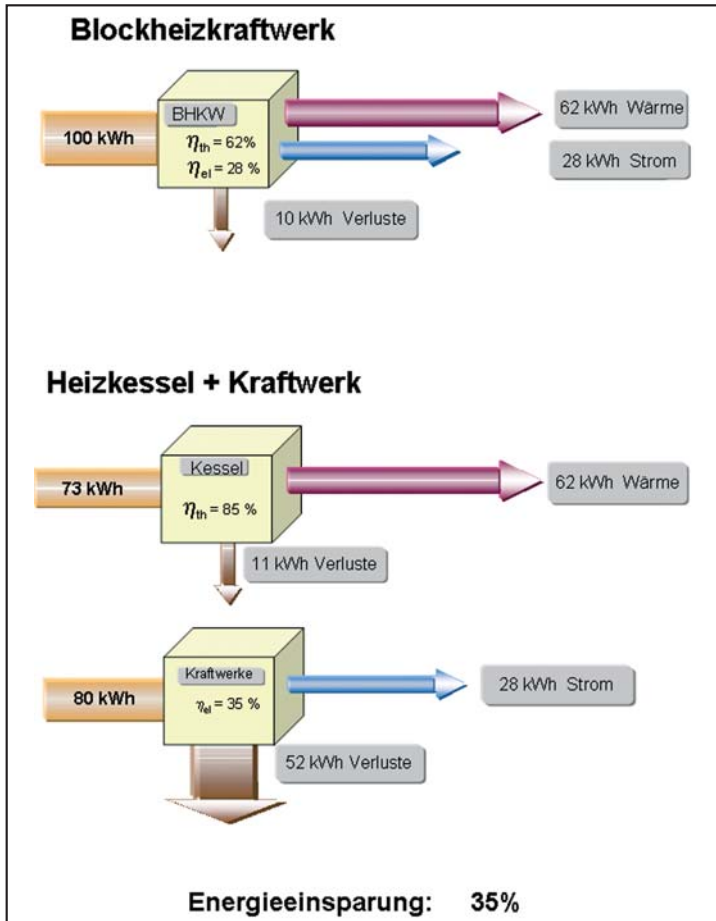
Zu diesen gehören die Motorheizkraftwerke, von denen bereits seit Jahren mehrere tausend Aggregate in Deutschland in Betrieb sind. Weiterhin zählen auch BHKW mit Brennstoffzellen, Mikrogasturbinen und Stirlingmotoren dazu. Diese sind teilweise in der Phase der Markteinführung bzw. noch in einer sehr hoff-

nungsvollen Entwicklungsphase. Alle diese Aggregate bieten Umweltvorteile: sie können mehr als 85% der eingesetzten Brennstoffenergie nutzen, weisen vergleichsweise günstige Emissionswerte auf, bieten auch die Chance, Bioenergie in Form von Biogas, Bioölen oder Holz einzusetzen und lassen sich in Kombination mit thermischen Solaranlagen betreiben. Projekte und Demonstrationsvorhaben zur Entwicklung und Optimierung der KWK wurden auch mit Mitteln der Energieforschung gefördert.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > zentrale Kraftwerke
- > dezentrale Kraftwerke
- > Blockheizkraftwerke

DAS PRINZIP KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG



Wird in einem Energieumwandler durch einen chemischen oder physikalischen Prozess Energie frei und wird diese sowohl für mechanische oder elektrische Arbeit als auch für Nutzwärme verwendet, spricht man von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Schwerpunkt dieses Infos sind die Kombination Strom/Wärme und die „kleineren“ Aggregate - die Blockheizkraftwerke. Eine allgemein gültige, exakte Definition dieser Bezeichnung gibt es nicht; hier sind damit Aggregate mit einer elektrischen Anschlussleistung unter 15 kW (Mikrogasturbinen bis 200 kW) gemeint.

Um die Energieeffizienz von KWK-Anlagen zu beschreiben, vergleicht man die Versorgung eines Objekts (z. B. eines Gebäudes) durch Strom und Wärme aus KWK mit einer alternativ möglichen Versorgung durch zwei separate Erzeugungssysteme. Verbraucher, die Strom und Wärme aus zwei getrennten Systemen beziehen, müssen zusätzlich zum Strombezug aus dem zentralen Kraftwerk (vgl. BINE basisEnergie Info Nr. 17 „Effiziente Kraftwerke“) noch eine Heizanlage vor Ort betreiben. Hierbei gibt es große Umwandlungsverluste. Abb. 2 zeigt ein typisches Beispiel für einen Vergleich beider Versorgungsalternativen.

Abb. 2 Um einen Verbraucher mit 28 kWh Strom und 62 kWh Wärme zu versorgen, muss man in einem Blockheizkraftwerk 100 kWh Primärenergie einsetzen. Bei getrennter Erzeugung in einem Kondensationskraftwerk (mit Wirkungsgrad 35%) und einer Heizung fallen 153 kWh Primärenergie an. Im Vergleich spart also die KWK 35% Energie und verursacht 29% geringere CO₂-Emissionen (abhängig von den verwendeten Brennstoffen).

ZENTRALE BEGRIFFE

- > KWK-Definition
- > Energieeffizienz

TECHNIKÜBERSICHT

Um KWK-Anlagen wirtschaftlich betreiben zu können, sind folgende Anforderungen zu erfüllen: Wärmenachfrage und Wärmeangebot müssen räumlich eng beieinander liegen, möglichst das ganze Jahr muss eine Basis-Wärmenachfrage (Grundlast) vorliegen, die Leistung muss sich während des Betriebs schwankender Nachfrage (Teillast) anpassen können und man benötigt spezifisch abgestimmte Aggregate für unterschiedliche Leistungsbereiche. Der eingesetzte Brennstoff soll umweltfreundlich sein und einen flexiblen Betrieb zulassen. Große Wärmekraftwerke nach dem Dampf-Kraft-Prinzip erfüllen diese Anforderungen nur teilweise. Bei Blockheizkraftwerken werden daher Motor-Generator-Einheiten oder chemische Verfahren zur Energieumwandlung eingesetzt, die Wärme auf einem genügend hohen Temperaturniveau auskoppeln können. Abb. 3 gibt einen Überblick.

KWK-Anlagen können entweder nach dem Strombedarf eines Objekts (stromgeführt) oder nach dem Wärmebedarf (wärmegeführt) ausgelegt werden. Die Abstimmung auf den Wärmebedarf ist die häufigste Form und zur Gebäudeversorgung üblich. Dabei arbeitet die KWK-Anlage nur bei Wär-

		Ottomotor	Dieselmotor	Stirlingmotor	Brennstoffzelle	Gasturbine *
elektr. Leistung	kW	1 – 5.000	5 – 20.000	1 – 40	1 – 250	30 – 250.000
Gesamtwirkungsgrad	%	bis 90	bis 90	bis 85	bis 90	bis 85
elektr. Wirkungsgrad	%	25 – 42	28 – 44	10 – 30	30 – 47	25 – 30
Stromkennzahl	-	0,4 – 1,1	0,5 – 1,1	0,4	0,3 – 0,7	0,3 – 0,6
Teillastverhalten		gut	gut	weniger gut	sehr gut	weniger gut
Stand der Technologie		bewährt	bewährt	Kleinserien	Pilotanlagen	bewährt
üblicher Brennstoff		Gas	Diesel (Gas)	Gas, Holz	Gas	Gas, Diesel

Abb. 3 Wichtige Merkmale von BHKW mit verschiedenen Antriebsaggregaten (* Mikrogasturbinen bis ca. 200 kW_{el})

menachfrage und produziert „nebenher“ auch Strom. Eine Orientierung nach dem Strombedarf ist seltener und z. B. eher in Produktionsbetrieben zu finden. Meist soll dabei teurerer Fremdstrombezug ersetzt werden bei gleichzeitig bestehender Wärmenachfrage.

Um die Effizienz einer KWK-Anlage zu beschreiben, gibt es bestimmte Kennwerte. Der Gesamtnutzungsgrad (η) bildet den tatsächlichen Betriebsverlauf über ein Jahr ab und berücksichtigt z. B. Verluste im Teillastbetrieb. Der Wirkungsgrad hingegen bezieht sich auf die Summe kurzzeitiger (z. B. Minutentakt) Leistungswerte und berücksichtigt Verluste im Teillastbetrieb nicht. Daher liegt der Wirkungsgrad immer höher als der Nutzungsgrad.

$$\eta_{\text{gesamt}} = \frac{\text{Strom- + Wärmeerzeugung}}{\text{Brennstoffverbrauch}}$$

Beide Werte können auch jeweils nur für die Stromproduktion (η_{el} = Strom pro eingesetztem Brennstoff) oder nur die Wärmeerzeugung (η_{therm}) angegeben werden. Die Stromkennzahl misst das Verhältnis der Stromgewinnung zur Wärmeerzeugung. Aus wirtschaftlichen Gründen wird eine hohe Stromkennzahl angestrebt.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Gesamtnutzungsgrad
- > Wirkungsgrad
- > Stromkennzahl

Die meisten BHKW-Anlagen in Deutschland arbeiten mit einem Otto- oder Dieselmotor (Motorheizkraftwerke). Diese Motoren sind als Auto- oder als Schiffsmotor bekannt und ihr Funktionsprinzip soll daher hier nicht vertiefend dargestellt werden. In einem Motorheizkraftwerk treibt ein Motor statt eines Fahrzeugs einen elektrischen Generator an. Die dabei anfallende Abwärme von Abgas (400 – 600 °C), Motor, Kühlwasser, Schmiermittel (80 – 90 °C) und die Generatorabwärme können über einen oder mehrere Wärmetauscher zu Heizzwecken genutzt werden. Derartige Anlagen benötigen eine Rücklauftemperatur der Heizung unter 70 °C. Die meisten Anlagen arbeiten mit Erdgas, daneben sind auch Heizöl/Diesel und – aus dem Bereich der erneuerbaren Energieträger – Bioöle (z. B. Rapsöl) und Biogas möglich. Zur Luftreinhaltung werden die Aggregate mit einem 3-Wege-Katalysator ausgestattet oder arbeiten mit Luftüberschuss im Magerbetrieb mit Oxidationskatalysator. Der vom Generator erzeugte Strom wird bevorzugt im eigenen Objekt verwendet, weil er (Fremd-) Strom zu üblichen Bezugspreisen ersetzt. Nur ein Stromüberschuss wird in das allgemeine Stromnetz eingespeist und von den Netzbetreibern zu den niedrigeren, gesetzlich festgelegten Preisen vergütet.

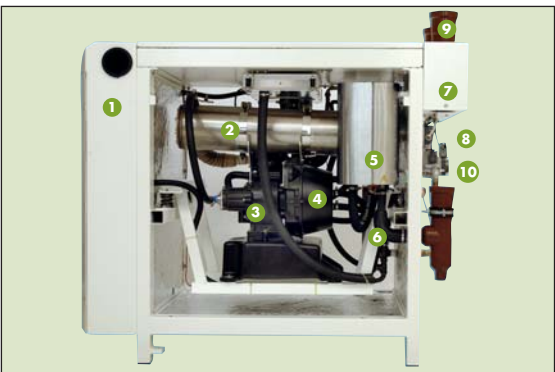


Abb. 5 Links ein Mini-BHKW mit 5,5 kW_{el}. Rechts ein größeres Aggregat aus dem Leistungsbereich 50 – 120 kW_{el} [Quellen: Senertec, communa metall]

Technik

Motorheizkraftwerke werden im Leistungsbereich von 1 kW_{el} bis 20.000 kW_{el} auf dem Markt (Abb. 5) angeboten. Für die Versorgung von Wohngebäuden kommen vor allem die „kleinen“ BHKW unter 15 kW_{el} oder Mini-BHKW unter 5,5 kW_{el} in Betracht. Ein Aggregat mit 4 kW_{el} erbringt eine thermische Leistung von 12 kW. Wirtschaftlich günstige Rahmenbedingungen bestehen – eine zeitgemäße, energieeffiziente Bauweise vorausgesetzt – damit bei Mehrfamilienhäusern oder kleinen Gewerbebetrieben. Für den Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser gibt es auch Aggregate mit einer geringeren thermischen Leistung. Oft ist es vorteilhaft, wenn eine zentrale Anlage mehrere Ein- und Zweifamilienhäuser oder eine komplette Siedlung versorgt, um eine kontinuierliche Wärmenachfrage zu garantieren. Derartige Nahwärmenetze sind auch gut geeignet, große Solarkollektorfelder zu integrieren und damit solare Wärme zu nutzen (solarunterstützte Nahwärme).

sortiert. Die höchste thermische Leistung ist während weniger Stunden an den kältesten Tagen des Jahres erforderlich. Ein BHKW orientiert sich aber an der Wärmegrundlast (z. B. 10 - 20% bei Wohngebäuden), d. h. dem niedrigen Teil der Kurve. Die Fläche unter der Kurve entspricht dem Jahreswärmebedarf. Die BHKW-Leistung soll möglichst vollständig unterhalb dieser Kurve liegen. Im Beispiel wird daher das BHKW 1, das 15% der Jahreshöchstlast abdeckt, auf ca. 6.500 Betriebsstunden kommt und 56% des Gesamtwärmebedarfs abdeckt, durch ein BHKW 2 ergänzt. Dieses deckt weitere 15% der Jahreshöchstlast ab, läuft 3.300 Betriebsstunden und liefert weitere 28% des Gesamtwärmebedarfs. Nur an 1.500 Stunden im Jahr würde für den Spitzenbedarf ein konventioneller Heizkessel zugeschaltet, der die noch fehlenden 16% des Gesamtwärmebedarfs decken müsste. Zum Vergleich: ein einziges großes BHKW Modul mit 30% würde nur auf 3.300 Betriebsstunden kommen, statt der 4.900 Betriebsstunden bei der gewählten Verteilung auf zwei Module.



- 1 Steuerschrank 2 Abgaswärmetauscher mit integriertem Katalysator 3 Motorblock 4 Generator 5 Schalldämpfer
- 6 Heizungswärmetauscher 7 Elektro-Anschlüsse 8 Gaszufuhr 9 Zuluft/Abgas 10 Heizungsanschlüsse

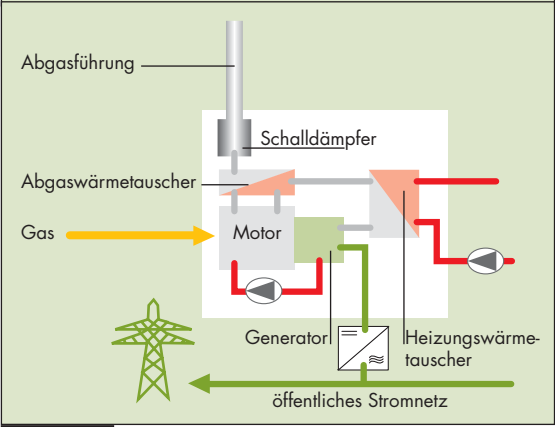


Abb. 4 Oben: Schnitt durch ein kleines Motorheizkraftwerk mit einer Leistung von 2,0 – 4,7 kW_{el} und 6 – 12,5 kW_{therm}. [Quelle: ecopower]. Unten: Schematischer Aufbau einer netzgekoppelten BHKW-Anlage [Quelle: ASUE]

Auslegung

Die Wirtschaftlichkeit eines BHKW wird stark von der Wärmenachfrage der Nutzer im Sommerhalbjahr beeinflusst. Die Anlagen sollten mindestens 5.500 Stunden des Jahres kontinuierlich laufen. „Kleine“ BHKW werden üblicherweise für die Grundversorgung (Grundlast) eines Gebäudes mit Wärme ausgelegt. Bei einem Mehrfamilienhaus gilt der Erfahrungswert, dass aus wirtschaftlichen Gründen die thermische Leistung des BHKW etwa 10 – 20% des maximalen Wärmebedarfs eines Objekts am kältesten Tag des Jahres ausmachen sollte. Für den darüber hinausgehenden Spitzenbedarf wird ein zusätzlicher normaler Heizkessel in die Heizungsanlage integriert. Die Dimensionierung einer BHKW-Anlage erfolgt üblicherweise nach der geordneten Jahresdauerlinie (Abb. 6). Bei diesem Berechnungsverfahren wird der Energiebedarf eines Objekts für alle 8.760 Stunden des Jahres gemessen und nach der Häufigkeit

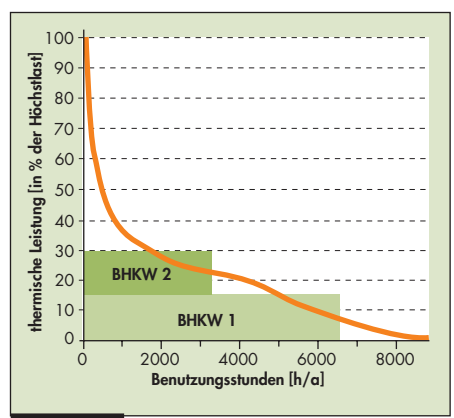


Abb. 6 Beispiel für eine geordnete Jahresdauerlinie

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Stromeinspeisung
- > Sommerlicher Wärmebedarf
- > Geordnete Jahresdauerlinie

BHKW MIT BRENNSTOFFZELLEN

In einer Brennstoffzelle findet kein Verbrennungsvorgang statt, sondern hier werden Strom und Wärme auf elektrochemischem Weg erzeugt. Bei der Elektrolyse von Wasser entstehen Wasserstoff und Sauerstoff. Auf der umkehrten Reaktion basiert die Brennstoffzelle. Sie ist eine „gebremste“, nicht explosiv verlaufende Knallgasreaktion. Es entstehen Wärme und Strom in einem Prozess.

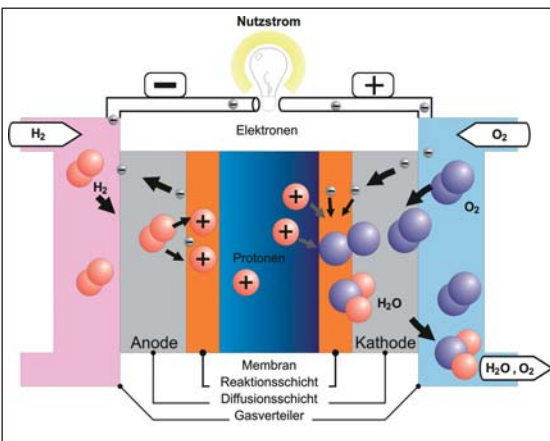


Abb. 7 Prinzipieller Aufbau einer Brennstoffzelle am Beispiel der PEM-FC [Quelle: DLR]



Abb. 9 Hochtemperaturbrennstoffzelle auf Basis SO-FC. Das Modul erbringt typischerweise eine Leistung von 245 kW Strom und 180 kW Wärme. Bis Sommer 2006 wurden 35 Module installiert [MTU].

Abb. 7 zeigt die zentralen Bauteile einer einzelnen Brennstoffzelle: Anode, Kathode und eine Elektrolytmembran. In einer Zelle wird wasserstoffhaltiges Gas an eine poröse Anode geleitet und Sauerstoff an eine poröse Kathode. Beide Gase werden durch die gasundurchlässige Membran getrennt und dadurch an der direkten Knallgasreaktion gehindert. Die Membran kann z. B. aus einer speziellen Folie, die nur für Ionen aber nicht für Elektronen durchlässig ist, einer Karbonatschmelze oder Oxidkeramik bestehen. Sie bestimmt wesentlich die Eigenschaften einer Brennstoffzelle, wie z. B. Betriebstemperatur und Anforderungen an die Reinheit der Gase. In Abb. 7 diffundiert Wasserstoff in die poröse Anode ein und es entstehen Ionen und freie Elektronen. Die H⁺-Ionen durchdringen die Membran. Hier treffen sie auf negative O²⁻-Ionen, die sich in der porösen Kathode gebildet haben. Beide Ionen verbinden sich unter Wärmeabgabe zu Wasser. Die auf der Anodenseite entstandenen, freien Elektronen werden über einen äußeren Leiter abgeleitet und als Nutzstrom verwendet.

Brennstoffzellen mit dem beschriebenen Reaktionsweg heißen Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell oder kurz PEM-FC. Sie gehören zu den Niedertemperatur-Brennstoffzellen, arbeiten auf einem Temperaturniveau von 70 – 90 °C und sollen z. B. zur Energieversorgung von einzelnen Wohngebäuden sowie als Fahrzeugantrieb eingesetzt werden. Zu den Hochtemperaturbrennstoffzellen mit einer Temperatur von 900 – 1.000 °C zählt die Solid Oxide Fuel Cell – kurz SO-FC –, die über einen oxidkeramischen Elektrolyten verfügt. Dieser ist durchlässig für die negativen O²⁻-Ionen, so dass hier die Sauerstoff-Ionen zu den Wasserstoff-Ionen wandern und sich das Reaktionsprodukt Wasser auf der Anodenseite bildet. Derartige Brennstoffzellen werden z. B. in KWK-Systemen mit Nahwärmenetzen eingesetzt.



Abb. 8 Prototyp eines Hausenergiesystems auf Basis einer PEM-FC. Im abgebildeten Entwicklungsstand von 2004 würde das Modul eine Leistung von 2 kW Strom und 5 kW Wärme erbringen. Mit einer Markteinführung ist ab 2010 zu rechnen [Viessmann].

Da eine einzelne Brennstoffzelle eine Spannung von 0,7 Volt bereitstellt, werden in technischen Anwendungen viele Zellen in Serie geschaltet und bilden Zellstapel (englisch: stack). Damit addieren sich die Spannungen. Brennstoffzellen bieten vier entscheidende Vorzüge: Sie emittieren wenig Schadstoffe, arbeiten nahezu lautlos, verwerten Energierohstoffe sehr effizient – auch im wichtigen Teillastbereich – und eignen sich für alle Leistungsbereiche von Watt (z. B. Notebook) über Kilowatt (z. B. Hausenergiesystem – Abb. 8) bis Megawatt (z. B. KWK-Nahwärmesystem – Abb. 9). Brennstoffzellen können mit Wasserstoff und – derzeit üblich – mit wasserstoffhaltigen Gasen, die vorab aus Erdgas, Biogas oder Methanol reformiert worden sind, betrieben werden.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Wasserstoff
- > Elektrolytmembran
- > Niedertemperatur-Brennstoffzellen
- > Hochtemperatur-Brennstoffzellen

BHKW MIT MIKROGASTURBINEN

Die Mikrogastrurbine ist die „kleine Schwester“ der Gasturbinen aus den Großkraftwerken und basiert auf der Turboladertechnologie im Fahrzeugbau und Hilfsmotoren aus dem Flugzeugbau. Abb. 10 zeigt ein Funktionsschema. Die eingesaugte Verbrennungsluft wird verdichtet und anschließend durch die heißen Abgase vorgewärmt. Diese Luft und der gleichfalls verdichtete Brennstoff (z. B. Erdgas, andere methanhaltige Gase) werden gemeinsam verbrannt. Die dabei austretenden Abgase treiben die Turbine an, die auf derselben Welle montiert ist wie der Generator (Einwellenanlage). Ohne ein zwischengeschaltetes mechanisches Getriebe bewirkt jede

Umdrehung der Turbine eine Umdrehung des Generators, d. h. dieser arbeitet mit 70.000 – 100.000 U/min. Der dabei gewonnene hochfrequente Strom mit 1.600 Hz wird elektronisch in einem zweifachen Umwandlungsvorgang zu Wechselstrom mit 50 Hz und 400 Volt. Die Abwärme des Abgases kann als Prozesswärme, zur Heizenergie- und Warmwasserversorgung und – über eine Absorptionskältemaschine – zur Erzeugung von Kälte genutzt werden.

Die elektrische Leistung der „kleinen“ Mikrogastrurbinen liegt im Bereich von knapp 30 – 200 kW. Damit eignen sie sich für klein- und mittelständische Unterneh-

men oder Stadtwerke zur dezentralen Stromerzeugung. Typische Einsatzorte sind z. B. Krankenhäuser, Altenheime, Gartenbaubetriebe, Hallenbäder, große Schulkomplexe, Brauereien oder die Keramikindustrie. Die Stärken der Mikrogastrurbinen sind: lange Wartungsintervalle, da es weniger bewegte Teile gibt als in Motorheizkraftwerken, Abgase können wegen hoher Temperatur auch als Prozesswärme genutzt werden und niedrige Schadstoffemissionen. Die Anlagen zeigen auch gutes Teillastverhalten, d. h. auch bei niedrigeren Drehzahlen bleibt die Stromerzeugung nahezu gleich. Als Schwächen sind zu nennen: Höhere Investitionskosten und ein niedrigerer elek-

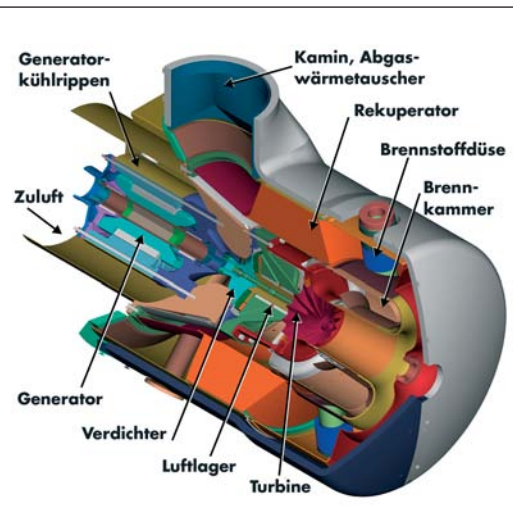


Abb. 10 Schnitt durch eine Mikrogasturbine [Quelle: E-Quad Power Systems].

trischer Wirkungsgrad als ein Motorheizkraftwerk. Beim Einsatz eines Verdichters, der einen Brennstoff auf den notwendigen Druck von 3,5 bis 8 bar bringt, kommt es zu Wirkungsgradeinbußen. Derzeit erreichen Mikrogasturbinen einen elektrischen Wirkungsgrad von 28 - 30% und einen Gesamtwirkungsgrad von ca. 80%. Da die technischen Möglichkeiten zur weiteren Optimierung dieser Turbinen noch nicht ausgeschöpft sind, ist zu erwarten, dass sich die Wirkungsgrade zukünftig noch steigern lassen. Die Markteinführung von Mikrogasturbinen in Deutschland hat erst vor wenigen Jahren begonnen. Viele Fachleute beurteilen die Marktchancen dieser Turbinentechnik innerhalb der Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sehr zuversichtlich, da sich diese Technik hervorragend auf die im Tages- und Jahresverlauf stark schwankende Stromnachfrage einstellen kann.

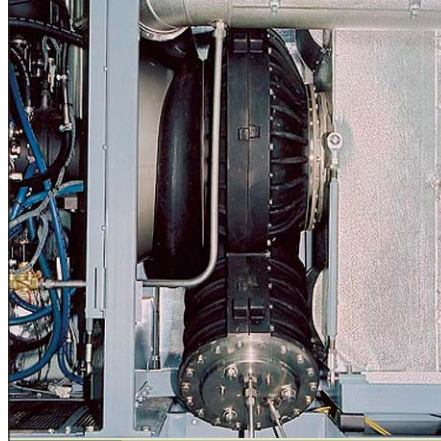


Abb. 11 Turbolader der Mikrogasturbine im Panoramabad Frankfurt-Bornheim. Diese Anlage ging 2002 mit einer elektrischen Leistung von 100 kW und einer thermischen Leistung von 152 kW in Betrieb. Weitere Informationen unter: www.energie-projekte.de

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Funktionsweise
- > Einwellenanlagen
- > Marktpotenzial

BHKW MIT STIRLINGMOTOREN

Luft und andere Gase dehnen sich bei Erwärmung aus und verringern ihr Volumen beim Abkühlen. Diese Eigenschaft von Gasen nutzt der Stirlingmotor. In einem geschlossenen Zylinder mit einem Kolben befindet sich ein Gas (z. B. Luft, Helium). An einem Ende wird der Zylinder von einer äußeren Wärmequelle erwärmt und im Inneren dehnt sich das Gas aus. Am anderen Ende wird das Gehäuse gekühlt und das Gas verliert dort Volumen. Hierdurch bewegt sich der Kolben. Diese Bewegung des Kolbens wird auf eine Welle übertragen, die z. B. einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Stirlingmaschinen wandeln äußere Wärme in Bewegung um.

Stirlingmotoren arbeiten mit zwei Zylindern, dem Arbeitszylinder und dem Kompressionszylinder, und haben ein Schwungrad auf der Kurbelwelle, um eine kontinuierliche Rotationsbewegung zu ermöglichen. Abb. 12 zeigt links einen β -Typ Stirlingmotor, d. h. die beiden Zylinder befinden sich in einem einzigen Gehäuse. Rechts ist ein α -Typ Stirlingmotor zu sehen, bei dem die beiden Zylinder im rechten Winkel zueinander stehen.

Bei diesem Typ ist der Regenerator, durch den sich der Wirkungsgrad steigern lässt, eine wichtige Komponente. Beim Durchströmen gibt das heiße Gas hier seine Wärme ab, bevor es zur kalten Seite gedrückt wird. Umgekehrt wird das kalte Gas hier vorgewärmt, bevor es zur heißen Seite strömt.

Stirlingmotoren haben den Vorteil, dass sie mit fast allen Wärmequellen arbeiten können, die zum Teil mit anderen Technologien nur schwer zu nutzen wären. Neben allen methanhaltigen Gasen, kommen auch Abwärme aus industriellen Prozessen, Biomasse und Heizöl in Frage. Besonders umweltfreundlich sind die sogenannten „flammenlosen Brenner“. Beim Stirling kommt das Motorinnere mit den Verbrennungsgasen nicht in Berührung. Hierdurch ist der Motor sehr wartungsarm und leise. Ein Stirlingmotor sollte möglichst kontinuierlich betrieben werden, d. h. möglichst selten An- und Ausschaltprozesse durchlaufen. Die Schadstoff-Emissionen fallen vergleichsweise niedrig aus, da sich hier die sehr gleichmäßige Fahrweise eines äußerlichen Feuerungsprozesses bemerkbar macht.



Abb. 13 Stirling BHKW. Die elektrische Leistung liegt bei 2 – 7,5 kW und die thermische Leistung bei 8 – 22 kW. Damit wird ein Gesamtwirkungsgrad von 92 – 96% [Hu] erreicht [Quelle: Fa. Solo].

Je größer beim Stirlingmotor die Temperaturdifferenz zwischen der warmen und der kalten Seite ist, desto höher ist der Wirkungsgrad. Der ideale (theoretische) Stirlingprozess erbringt höhere Wirkungsgrade als z. B. Otto- oder Dieselmotoren. Allerdings erreichen in der Praxis Stirlingmotoren diesen Wert nicht, da es Wirkungsgradeinbußen z. B. durch unerwünschte Wärmeleitung, unvollständigen Gasaustausch und Reibungsverluste gibt. Der elektrische Wirkungsgrad liegt, je nach Temperaturdifferenz, zwischen 10 und 30%, der Gesamtwirkungsgrad kann – bezogen auf den unteren Heizwert $[H_U]$ – Werte zwischen 90 und 100% erreichen. Vor einigen Jahren hat die Markteinführung von Stirling-KWK-Aggregaten in Deutschland begonnen (Abb. 13).

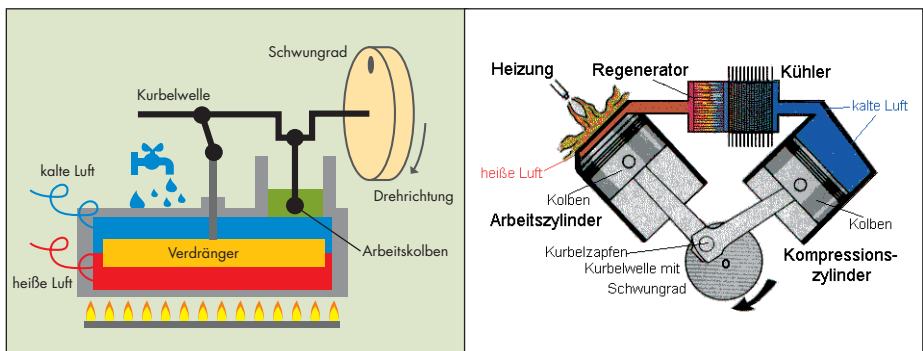


Abb. 12 Stirlingmotoren - Links der β -Typ und rechts der α -Typ. [Quelle: www.peterfette.gmxhome.de - hier gibt es viele Informationen über Stirlingmotoren].

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Äußere Wärmezufuhr
- > Arbeitszylinder
- > Kompressionszylinder

Nur mit modernisierten und neuen Energietechnologien werden sich in Deutschland eine höhere Energieeffizienz, eine nachhaltigere Energieversorgung und die klimapolitischen Ziele erreichen lassen. KWK-Technologien können hierzu einen großen Beitrag leisten. Vor allem die Kleinanlagen arbeiten mit dem kohlenstoffarmen Energieträger Erdgas und – stark zunehmend – mit Bioölen und Biogas. Die Anlagen weisen daher vergleichsweise gute CO₂-Emissionswerte auf. Selbst im Vergleich zu modernen Erdgaskraftwerken mit Gas- und Dampfturbinenprozess liegen die spezifischen CO₂-Werte von KWK-Anlagen etwa 20 - 30% besser.

Die vier vorgestellten KWK-Technologien entwickeln sich derzeit mit unterschiedlichem Tempo und stehen auf dem Markt in Konkurrenz zueinander. Die Motorheizkraftwerke sind mit mehreren tausend installierten Aggregaten eine bewährte und etablierte Technologie. Die Markteinführung von BHKW mit Mikrogasturbine und Stirlingmotor hat vor wenigen Jahren begonnen. Bei den Brennstoffzellen sind leistungsstarke Hochtemperatursysteme auf dem Markt, während sich die für den Gebäudebereich interessanten Niedertemperatursysteme noch in der abschließenden Entwicklungsphase befinden.

Das Stromnetz könnte einen Ausbau der KWK-Anlagen ohne große Probleme technisch und organisatorisch meistern. Viele dezentrale Anlagen lassen sich wie ein „virtuelles Kraftwerk“ zentral regeln. Bisher ste-



Abb. 14 Beim EuroDish-Stirling System konzentrieren die Spiegel das einfallende Sonnenlicht auf den im Brennpunkt befindlichen Stirling.

hen einem verstärkten Ausbau der KWK aber die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen als zentrales Hemmnis entgegen.

In Deutschland werden derzeit etwa 10% des Stroms in großen und kleinen KWK-Anlagen erzeugt. In einigen europäischen Nachbarländern liegt die Quote deutlich höher: Dänemark 50%, Niederlande 40%, Finnland 40%. Auch für Deutschland wird zukünftig ein Anstieg erwartet, besonders „Kleinanlagen“ in Siedlungen, Mehrfamilienhäusern, Gewerbebetrieben u. ä. werden zunehmen. Aber auch die in den nächsten Jahrzehnten anstehende Modernisierung des deutschen Kraftwerksparks in einer Größenordnung von 40.000 MW wird den KWK-Techniken neue Perspektiven eröffnen.

LITERATUR

Ein ausführliches Literaturverzeichnis steht im BINE-Internetangebot als Download in der Rubrik Service/InfoPlus bereit oder kann kostenlos angefordert werden.

1. Sutor, Wolfgang: Blockheizkraftwerke - Ein Leitfaden für den Anwender. BINE-Informationspaket. Fachinformationszentrum Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.). Berlin: Solarpraxis, 2006. ISBN 10 3-934595-47-2
2. Im Internetportal www.energie-projekte.de des BINE Informationsdienstes sind viele technisch und wirtschaftlich vorbildliche, realisierte Projekte mit KWK-Anlagen zu finden.

Bildung & Energie im Web

www.bine.info

Unsere Informationen für Schule, Beruf und Erwachsenenbildung finden SIE unter: www.bine.info Dort sind in der Rubrik "Service/InfoPlus" ein Literaturverzeichnis und eine aktuelle Linkliste zum Thema eingestellt.

Ergänzende Informationen

Info-Mappen / Download

Zu den behandelten Themen ist jeweils eine kostenlose Mappe mit vertiefenden Informationen bei BINE erhältlich. Alle Abbildungen stehen für Bildungszwecke unter www.bine.info in der Rubrik "Service/InfoPlus" kostenlos zum Download zur Verfügung oder können gegen eine Bearbeitungsgebühr von 15,-€ (V-Scheck) bei BINE angefordert werden.

▼ **Herausgeber**
FIZ Karlsruhe GmbH
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

▼ **Fachliche Beratung**
Wolfgang Sutor, 84152 Mengkofen

▼ **Autor**
Uwe Milles

▼ **ISSN**
1438-3802

▼ **Nachdruck**
Nachdruck des Textes zulässig bei vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares - Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung der jeweils Berechtigten.

▼ **Stand**
Oktober 2006

BINE Informationsdienst Kompetenz in Energie

BINE informiert zu Energieeffizienztechnologien und erneuerbaren Energien:

In kostenfreien Broschüren, unter www.bine.info und per Newsletter zeigt BINE, wie sich gute Forschungsideen in der Praxis bewähren.

BINE ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderter Informationsdienst der Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe GmbH.

Kontakt

Fragen zu diesem **basisEnergieinfo?**
Wir helfen Ihnen weiter:

Tel.: 0228 92379-44



FIZ Karlsruhe GmbH, Büro Bonn
Kaiserstraße 185 - 197
53113 Bonn

Tel.: 0228 92379-0
Fax: 0228 92379-29

E-Mail: bine@fiz-karlsruhe.de
Internet: www.bine.info