

## Wann sind Kleinstblockheizkraftwerke energetisch sinnvoll?

Martin Zogg

Leiter des Forschungsprogramms  
*Umgebungswärme, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung*  
des Bundesamts für Energie

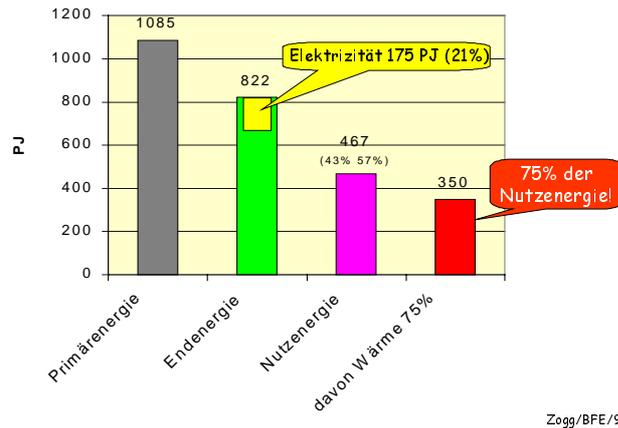
Wie bei allen Systemen der Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) werden mit Kleinstblockheizkraftwerken aus Brennstoffen Wärme und elektrischer Strom erzeugt. Aus der Sicht einer maximalen Primärenergienutzung sollten beim heutigen Stand der Technik auch Kleinstblockheizkraftwerke **elektrische Wirkungsgrade über 33%** und **Gesamtwirkungsgrade über 90%** aufweisen. Die derzeit angebotenen oder sich in Entwicklung befindenden Kleinst-WKK-Anlagen erreichen leider die geforderten elektrischen Wirkungsgrade nicht. Einzig die Brennstoffzellensysteme haben hier ein erfolgversprechendes Verbesserungspotential. Anhand von zwei Grenzfällen wird aufgezeigt, wie entscheidend der elektrische Wirkungsgrad für die energetische Effizienz der Wärme-Kraft-Kopplung ist. Zur Raumheizung ist beim heutigen Stand der Technik die Kombination grösserer WKK-Einheiten mit dezentralen Elektrowärmepumpen im Stromgleichgewicht energetisch die beste Lösung. In Abweichung von dieser Regel können Kleinstblockheizkraftwerke bei hohen Heizungsvorlauftemperaturen und bei schwieriger Erschliessung der Wärmequellen für die Wärmepumpen (WP) gegenüber Heizkesseln auch energetisch sinnvoll sein, wenn sie genügende Wirkungsgrade erreichen.

### Ausgangslage

Die Endverbraucher haben im Jahr 1996 in der Schweiz 822 PJ Endenergie mit einem Anteil an elektrischem Strom von 175 PJ (oder 21%) bezogen: Bild 1. Daraus wurden bei den Endverbrauchern 467 PJ (oder 57%) Nutzenergie erzeugt. Davon sind rund 350 PJ (oder 75%) Wärme. Eine bessere Nutzung der Energie ist zur Schonung der Ressourcen und zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses dringend geboten. Wir haben uns völkerrechtlich verpflichtet, den mittleren CO<sub>2</sub>-Ausstoss bis in die Jahre 2008/2012 gegenüber den Mittelwerten von 1990/95 um 8% zu senken. Der mittlere Gesamtleistungsbedarf der Weltbevölkerung beträgt pro Mensch derzeit rund 2 kW. Wir verbrauchen in der Schweiz fast 5 kW pro Mensch.

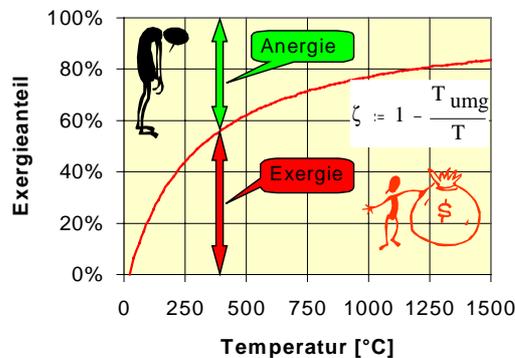
Gut 50% der Gesamtnutzenergie werden als **Niedertemperaturwärme** (Temperaturen unter 100°C vorwiegend für die Raumheizung) benötigt. Diese wird heute zu 24.6% mit Erdgaskesseln und zu 58.8% mit Heizölkesseln produziert. Die im Hinblick auf eine hohe Nutzung der Brennstoffenergie überlegene Heizung mit Wärmepumpen (WP) und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) deckt heute erst 4.2% des Niedertemperaturwärmebedarfs (WP 1.4%, WKK 2.8%). Zur schweizerischen Elektrizitätsproduktion tragen die WKK-Anlagen lediglich 2.3% bei [ 2].

Es stellt sich nun die Frage, was sich durch den Ersatz von Kesselheizungen durch WKK-Anlagen an Brennstoffen einsparen lässt und ob die damit verbundene Produktion an elektrischem Strom **energetisch sinnvoll** ist. Weiter ist klarzustellen, was eine zusätzliche Nutzung der Umgebungswärme mit elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen bringt.



**Bild 1:** Aus der schweizerischen Gesamtenergiestatistik (Werte aus [ 1]).

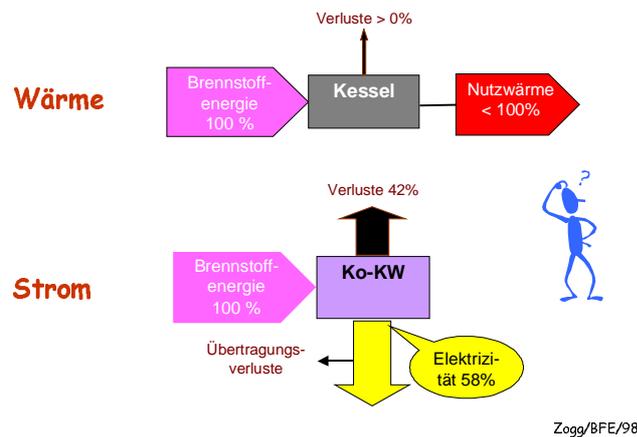
Bevor wir diesen Fragen nachgehen, ist zum Verständnis ein kleiner Exkurs in die Thermodynamik nötig. Diese lehrt, dass die Wärme aus zwei Anteilen besteht. Der Wertvollere lässt sich beliebig in andere Energieformen (wie elektrischen Strom) umwandeln und wird als **Exergie** bezeichnet. Der restliche, nicht in andere Energieformen umwandelbare Energieanteil der Wärme heisst **Anergie**. Der wertvollere Exergieanteil wird um so höher, je höher die Temperatur der Wärme ist. So ist bei einer Flammentemperatur um 1100 °C etwa 80% der Wärme Exergie: Bild 2. Damit lässt sich zum Beispiel elektrischer Strom produzieren. In einer Kesselheizung wird die Exergie überhaupt nicht genutzt und in der Raumheizung zu reiner Anergie degradiert. Mit einer Kesselheizung lässt sich deshalb höchstens die eingesetzte Brennstoffenergie in Wärme umsetzen. (Näheres zu diesen Überlegungen in [ 3].) Falls man mit dem in einer Wärme-Kraft-Kopplungsanlage mit hohem elektrischem Wirkungsgrad erzeugten Strom effiziente Wärmepumpen betreibt, erhält man durch Nutzen der Umgebungswärme bereits beim heutigen Stand der Technik **Nutzungsgrade zur Raumheizung um 150%**. Das bedeutet, dass aus 100% Brennstoffenergie 150% an Nutzwärme produziert werden können. Diese Kombination von effizienten WKK-Anlagen mit Wärmepumpen weist noch ein grosses Verbesserungspotential auf und lässt in naher Zukunft Nutzungsgrade für die Raumheizung von 200% und mehr erwarten.



**Bild 2:** Exergieanteil der Wärme in Abhängigkeit der Temperatur.

## Welche Kombination für Strom und Wärme?

Wie eingangs bereits erwähnt, wird in der Schweiz rund 85% der Niedertemperaturwärme mit Heizöl- und Erdgaskesseln erzeugt. Die Nutzwärme ist dabei stets (wenn auch nur noch wenig) kleiner als die mit dem Brennstoff zugeführte Energie: Bild 3. Falls von einer Abwärmenutzung abgesehen wird, ist elektrischer Strom aus Brennstoffen am effizientesten durch Kombikraftwerke (GuD) zu erzeugen. Diese erreichen heute elektrische Wirkungsgrade von rund 58%. Die restlichen 42% werden als Abwärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben.



**Bild 3:** Getrennte Erzeugung von Wärme in Kesseln und von elektrischem Strom in Kombikraftwerken (GuD-Kraftwerke).

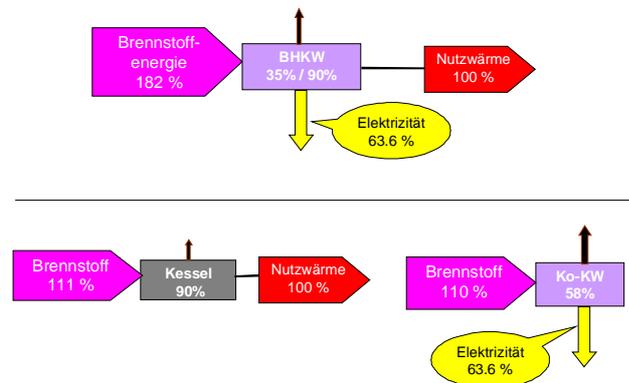
Bei der **Wärme-Kraft-Kopplung**<sup>1</sup> wird die bei thermischen Arbeitsmaschinen entstehende Abwärme genutzt. Bei grossen Kombi-Heizkraftwerken wird sie über Fernleitungen zu den dezentralen Verbrauchern gebracht und elektrischer Strom mit hohem elektrischem Wirkungsgrad erzeugt. Mit geringerem elektrischem Wirkungsgrad – dafür aber der Möglichkeit einer direkten Abwärmenutzung am jeweiligen Standort – lässt sich der elektrische Strom auch dezentral in Blockheizkraftwerken erzeugen. Die elektrische Leistung liegt bei diesen meist über 100 kW und kann bis einige MW erreichen. Heute werden für die Wärmeversorgung kleiner Wohneinheiten Kleinblockheizkraftwerke mit elektrischen Leistungen um 5 kW und weniger entwickelt (Mikro-BHKW). Auf diese werden wir noch zurückkommen.

Der Betrieb von Blockheizkraftwerken ist als Folge ihres bescheidenen elektrischen Wirkungsgrades (bei elektrischen Leistungen über 100 kW über 30%, im MW-Bereich bis 42%) nur sinnvoll, wenn gleichzeitig auch die **Wärme genutzt** wird. Bei Wärmebedarf ist aber auch der Betrieb von Wärmepumpen interessant, da diese erneuerbare Umgebungswärme nutzen. Eine Kombination von Blockheizkraftwerken mit Wärmepumpen liegt somit auf der Hand. Dass sie auch energetisch sehr effizient ist, werden wir gleich sehen.

Wir können für die Raumheizung – oder allgemein die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme – zwei Grenzfälle unterscheiden. Der **erste Grenzfall** ist die Wärmeversorgung mit **Blockheizkraftwerken ohne Wärmepumpen**. Der dabei erzeugte elektrische Strom konkurriert mit dem Netzstrom. Dieser Grenzfall ist im Bild 4 für das Beispiel eines grösseren Blockheizkraftwerks mit einem elektrischen Wirkungs-

<sup>1</sup> Dieser Begriff ist in der Schweiz üblich. In der Fachliteratur wird allgemein von Kraft-Wärme-Kopplung gesprochen.

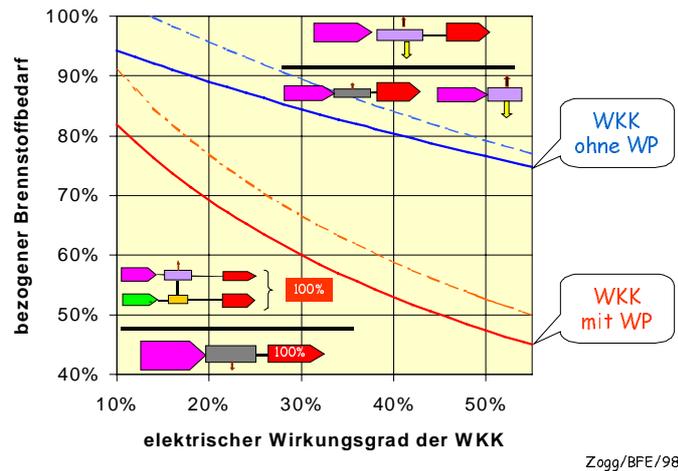
grad von 35% und einem Gesamtwirkungsgrad von 90% dargestellt. Um 100% an Nutzwärme zu produzieren, muss einem solchen Blockheizkraftwerk 182% an Brennstoffenergie zugeführt werden. Nebst der Nutzwärme produziert es 63.6% an elektrischer Energie.



Zogg/BFE/98

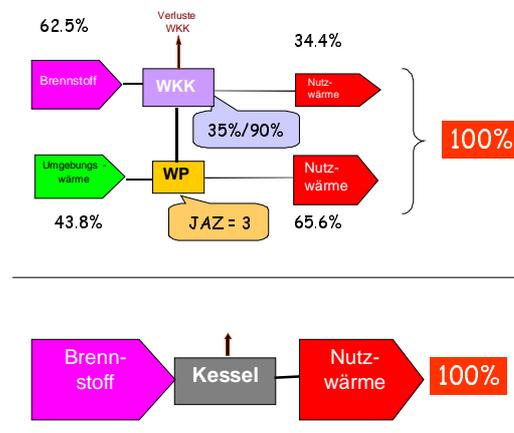
**Bild 4:** Erster Grenzfall: WKK-Betrieb ohne Wärmepumpen (oben) als Ersatz von Kesseln für die gleiche Wärmeerzeugung und von Kombikraftwerken für die gleiche Stromerzeugung (unten).

Diese 63.6% an elektrischem Strom kann man auch mit einem modernen Kombikraftwerk erzeugen. Bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 58% müssen diesem dafür 110% an Brennstoffenergie zugeführt werden. Um durch einen separaten Heizkessel mit einem Kesselnutzungsgrad von 90% die gleichen 100% Wärme wie mit der reinen BHKW-Lösung zu produzieren, müssten diesem weitere 111% an Brennstoffenergie zugeführt werden. Um die gleiche Wärme und den gleichen elektrischen Strom wie mit der oben beschriebenen Blockheizkraftwerk-Lösung getrennt zu erzeugen, werden demzufolge total 221% - also deutlich mehr als bei der BHKW-Variante - an Brennstoffenergie benötigt. In diesem Beispiel ist die kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom also der getrennten Erzeugung energetisch klar überlegen. Man findet das Verhältnis  $182/221=0.824$  als **bezogenen Brennstoffbedarf** im Bild 5 auf der oberen, ausgezogenen Kurve. Dieses Verhältnis wird um so kleiner, je höher der elektrische Wirkungsgrad des BHKWs - oder allgemein einer WKK-Lösung ist. Dies bedeutet, dass die kombinierte Produktion von Wärme und Strom durch WKK energetisch um so überlegener wird, je grösser der elektrische Wirkungsgrad ist.



**Bild 5:** Vergleich zwischen den beiden Grenzfällen für eine Wärmeerzeugung mit WKK-Anlagen. Ausgezogene Kurven für einen Kesselnutzungsgrad von 90%, gestrichelte Kurven für einen Kesselnutzungsgrad von 100%. Oben: Grenzfall der WKK ohne Wärmepumpen. Unten Grenzfall der WKK-WP-Kombination im Stromgleichgewicht. Wärmepumpenanlage mit einer Jahresarbeitszahl von 3, elektrische Übertragungsverluste vernachlässigt.

Da – wie bereits betont – der Betrieb einer WKK-Anlage nur sinnvoll ist, wenn die Wärme auch genutzt wird (wärmegeführter Betrieb), ist ein gleichzeitiger Betrieb von elektrischen Kompressionswärmepumpen mit dem durch Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen erzeugten elektrischen Strom interessant. Damit kann der grössere Teil der Nutzwärme aus erneuerbarer Umgebungswärme erzeugt werden. Im Grenzfall wird aller durch WKK-Anlagen erzeugte Strom durch die Wärmepumpen verbraucht. Dieser **zweite Grenzfall der WKK-WP-Kombination im Stromgleichgewicht** ist im **Bild 6** dargestellt. Es ist dabei (abgesehen von mehr oder weniger grossen elektrischen Leitungsverlusten) belanglos, ob diese WKK-WP-Kombination im Stromgleichgewicht in einer grösseren Wärmeversorgungsanlage an demselben Standort realisiert wird, oder ob sie aus vielen örtlich getrennten WKK- und Wärmepumpenanlagen besteht [ 5]. Als Bilanzgebiet für solche flexibleren Lösungen ist beispielsweise die

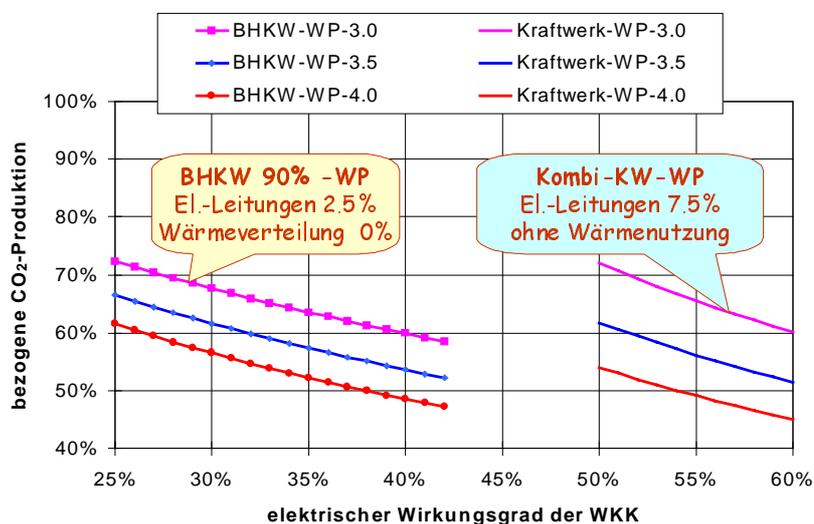


**Bild 6:** Zweiter Grenzfall: Wärmeproduktion durch WKK-Anlagen und Wärmepumpen im Stromgleichgewicht (oben) als Ersatz von Kesseln für die gleiche Wärmeerzeugung (unten).

ganze Schweiz sinnvoll. Obwohl zur Energieübertragung von den WKK-Anlagen zu den Wärmepumpen elektrische Leitungen benutzt werden, produziert dieses WKK-WP-System im Stromgleichgewicht nur Wärme. Allerdings mit einem wesentlich höheren Nutzungsgrad als mit einer Kesselheizung möglich ist. Dies verdeutlichen die unteren zwei Kurven im Bild 5. Der Brennstoffbedarf sinkt gegenüber jener von Heizkesseln mit zunehmendem elektrischem Wirkungsgrad der WKK-Anlage bis etwa auf die Hälfte.

Dazu ein leicht nachvollziehbares **Zahlenbeispiel** für Wirkungsgrade des BHKWs von 35% (elektrisch) und 90% (gesamt), eine Jahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage von 3.0 und vernachlässigbare Übertragungsverluste. Um mit einer WKK-WP-Anlage im Stromgleichgewicht 100% Wärme zu erzeugen, muss dem BHKW 62.5% an Brennstoffenergie zugeführt werden. Dieses erzeugt daraus 34.4% Wärme und 21.9% elektrischen Strom. Durch die Aufnahme von 43.8% Umgebungswärme erzeugt die Wärmepumpe damit die weiteren 65.6% Wärme. Die Kesselheizung benötigt für die gleichen 100% Wärme bei einem Nutzungsgrad von 90% 111.1% Brennstoffenergie. Dies ergibt für den bezogenen Brennstoffbedarf als Verhältnis des Brennstoffbedarfs der WKK-WP-Kombination zu jenem einer Kesselanlage  $62.5/111.1 = 0.563$ .

Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe von 3 werden heute bereits bei Umgebungsluft als Wärmequelle erreicht. Höhere Jahresarbeitszahlen für gute Erdwärmesonden und Wasser als Wärmequelle ergeben **noch höhere Brennstoffeinsparungen**, wie das **Bild 7** verdeutlicht. Vergleichbare Resultate erreicht die Wärmepumpenheizung übrigens auch mit elektrischem Strom aus einem Kombikraftwerk ohne jede Abwärmenutzung, wie die rechte Seite von Bild 7 illustriert.



Zogg/BFE/98

**Bild 7:** Verhältnis der CO<sub>2</sub>-Produktion (bzw. des Brennstoffbedarfs) der Wärmeerzeugung mit WKK-WP-Systemen zu jener eines Kessels mit einem Nutzungsgrad von 100% (auf den unteren Heizwert bezogen) mit Berücksichtigung der Verluste in der elektrischen Nahübertragung. Rechter Bildteil: Kombination Kombikraftwerk (ohne Abwärmenutzung, elektrischer Wirkungsgrad 58%) - Wärmepumpe zum Vergleich. Berechnungseinzelheiten in [ 4].

## Massgebend: hoher elektrischer Wirkungsgrad

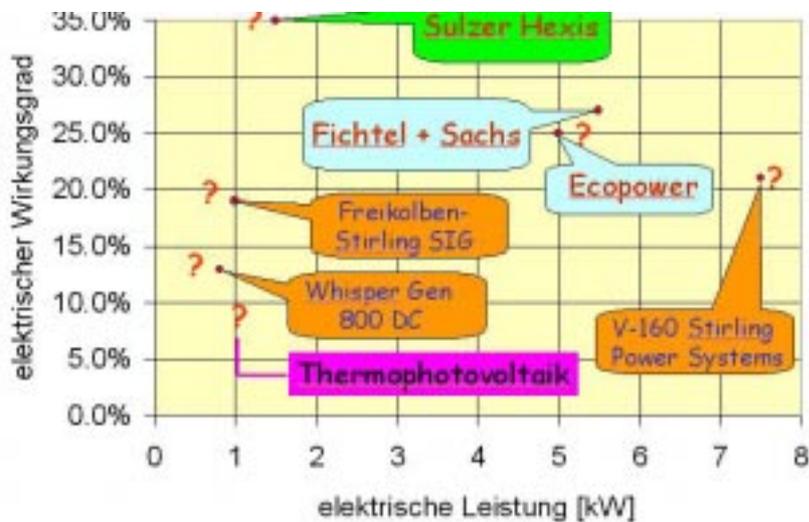
Aus dem Bild 5 können für die Wärme-Kraft-Kopplung folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Massgebend für eine hohe energetische Effizienz beider Grenzfälle ist in erster Linie ein hoher elektrischer Wirkungsgrad (**hohe Exergienutzung!**).
2. Beim Betrieb der **WKK ohne Wärmepumpe** (erster Grenzfall) ist der energetische Gewinn gegenüber dem Ersatzsystem Kesselheizung/Kombikraftwerk bis zu elektrischen Wirkungsgraden von etwa 30% insbesondere beim Vergleich mit modernen Kesseln (Nutzungsgrad gegen 100%, gestrichelte Linie im Bild 5) sehr bescheiden.
3. Die Kombination der **Wärme-Kraft-Kopplung mit Wärmepumpen im Stromgleichgewicht** (zweiter Grenzfall) bringt dank der Nutzung der erneuerbaren Umgebungswärme wesentlich mehr. Dieser Grenzfall ist aus der Sicht einer maximalen Brennstoffenergienutzung erstrebenswert, da ein sinnvoller WKK-Betrieb ohnehin nur bei Wärmebedarf interessant ist. Um Einsparungen an Brennstoffen von über 40% zu erreichen, sind elektrische Wirkungsgrade über 30% nötig.

## Kleinstblockheizkraftwerke

In jüngster Zeit wurden Kleinstblockheizkraftwerke mit elektrischen Leistungen unter 10 kW entwickelt. Zunächst wurde die bekannte BHKW-Technik durch **Fichtel + Sachs** auf eine elektrische Leistung von ca. 5 kW und eine thermische Leistung von 13.5 kW „verkleinert“. Es wurde im Rahmen des *BFE-Forschungsprogramm Umgebungswärme, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung* getestet. Das anschlussfertige Kompaktaggregat mit einem Einzylinder-Gasmagermotor und einem unregulierten Oxidationskatalysator soll gemäss Herstellerangaben bis 80'000 Betriebsstunden erreichen. Die Einbindung ins Heizungssystem ist ohne Wärmespeicher vorgesehen. Die mit diesem Klein-Blockheizkraftwerk 1995 im Auftrag des Bundesamts für Energie durchgeführten Feldmessungen in einem 70°C/50°C-Heizungssystem mit Warmwasserbereitung ergaben einen Gesamtnutzungsgrad von 87% und einen elektrischen Nutzungsgrad von 25% [ 6]. Während die CO-Emissionen weit unter den Grenzwerten der LRV 92 lagen, waren die NO<sub>x</sub>-Emissionen mit 400 mg/Nm<sup>3</sup> bei 5% Sauerstoff noch klar zu hoch. Im Zuge der Weiterentwicklung wird nun eine Low-NO<sub>x</sub>-Variante mit einer Reduktion dieses Werts auf 135 mg/Nm<sub>3</sub> angeboten. Dieses Aggregat liefert 5.5 kW elektrische Leistung (elektrischer Wirkungsgrad 27%) und 12.3 kW Wärmeleistung (Gesamtwirkungsgrad 88%): Bild 8.

Auch die Firma **Ecopower** verwendet für ihr Kleinstblockheizkraftwerk einen konventionellen Verbrennungsmotor. Mit der Leistungsregulierung über eine variable Drehzahl und anschliessender elektronischer Umformung des elektrischen Stroms wird aber ein neuer Weg beschritten. Dadurch lässt sich ein sehr breiter Leistungsbereich fahren und damit ein für kleine Wärmebezüger interessanter monovalenter Betrieb erreichen. Zu diesem Aggregat sind dem Autor noch keine vom Hersteller unabhängigen Messwerte bekannt. Es ist aber mit einer maximalen elektrischen Leistung von 5 kW und einem elektrischen Wirkungsgrad in der Grössenordnung von 25% zu rechnen.



**Bild 8:** Elektrische Wirkungsgrade diverser Typen von Kleinst-Blockheizkraftwerken in Abhängigkeit der produzierten elektrischen Leistung.

Wesentlich tiefere Emissionswerte sind ohne Katalysatoren beim **Stirlingantrieb** mit äusserer Verbrennung zu erwarten. In – allerdings noch sehr ferner - Zukunft käme hier vielleicht sogar Holz als Brennstoff in Frage. Nebst den tiefen Emissionswerten haben Stirlingantriebe den Vorteil einer geringen Lärmentwicklung. Die oft versprochenen hohen Wirkungsgrade wurden als Folge des nötigen Kompromisses zwischen minimalem Totvolumen, kleinem Druckverlust im Regenerator und sehr guter instationärer Wärmeübertragung im Regenerator in realen Aggregaten nicht erreicht. Ein weiterer Grund dafür liegt im wärmetransportbedingten Temperaturabfall zwischen der Flamme und dem Arbeitsgas. Weitere Nachteile sind der hohe Arbeitsdruck, die hohe Kopftemperatur und die geringe Erfahrung mit diesem Prinzip.

Bei der *SIG-Neuhausen* wird in Zusammenarbeit mit dem *Ökozentrum Langenbruck* ein kleines **Freikolbenstirlingaggregat** mit einer elektrischen Leistung um 1 kW und einer thermischen Leistung von rund 4.5 kW entwickelt. Dank einem ausgeklügelten federgeführten Freikolbenprinzip verspricht man sich einen wartungsfreien Betrieb über sehr lange Zeit. Erfreulich sind die bereits erreichten geringen Emissionswerte. Problematisch bleibt der geringe elektrische Wirkungsgrad knapp unter 20% [ 7].

Das Kleinsystem **Whisper Gen 800 DC** aus Neuseeland war mit seinem Vierkolben-Stirlingmotor und Taumeltrieb ursprünglich als mobiler Generator für Motorboote und einsame Hütten gedacht. Das Aggregat erbringt mit einer elektrischen Leistung von 0.8 kW und einer thermischen Leistung von 5 kW einen elektrischen Wirkungsgrad von ca. 13%. Es ist mit einem auch solar beheizbaren Speicher (150 l) versehen und zeichnet sich durch einen sehr geräuscharmen Betrieb aus (50 dBA). Das mit Stickstoff bei 20 bar betriebene Stirlingaggregat wird in den Niederlanden einem umfangreichen Feldtest unterzogen [ 8].

Jedermann weiss, dass man mit der Photovoltaik elektrischen Strom aus Sonnenlicht gewinnen kann. Strahlung erzeugt auch jede Flamme. Zum Zweck der Lichterzeugung aus einer Gasflamme sind die Gaslampen entwickelt worden. Wir kennen sie noch aus der Campingausrüstung. Bei diesen wird das Wellenlängenspektrum der Gasflamme mit einem „Glühstrumpf“ in möglichst viel sichtbares Licht umgewandelt. Bei der **Thermophotovoltaik** wird durch einen durch die Flamme angeregten Strahler aus Seltenerden ein für die Stromerzeugung in Photozellen günstiges Wellenlängenspektrum im Bereich um einen Tausendstel Millimeter angestrebt. Dieser neue Weg der Produktion von elektrischem Strom und von Wärme aus Brennstoffen ver-

spricht leider nur sehr kleine elektrische Wirkungsgrade. 4% wurden im Labor bisher erreicht – 10% ist das Ziel einer am PSI laufenden Entwicklung [ 9].

Die bisher aufgeführten Lösungen für Kleinblockheizkraftwerke weisen gegenüber dem technischen Stand von „Normal-BHKWs“ mit elektrischen Leistungen über 100 kW zu geringe elektrische Wirkungsgrade auf. Höhere elektrische Wirkungsgrade lassen sich grundsätzlich durch direkte Umwandlung der chemischen Energie des Brennstoffs in elektrische Energie in **Brennstoffzellensystemen** verwirklichen. Brennstoffzellensysteme versprechen einen hohen elektrischen Wirkungsgrad bei geringsten Emissionen. Die Entwicklung ist hier allerdings noch in vollem Gang. Im Bereich der Kleinblockheizkraftwerke hat *Sulzer* mit dem System **Hexis** für SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) eine bereits weit fortgeschrittene Lösung. Dank einer besonderen Konstruktion konnten die Wärmedehnungsprobleme der Keramikelemente gelöst und der – auch bei Erdgas noch nötige Reformier zur Wasserstoffherzeugung – in den Zellenstapel integriert werden. Beim momentanen Entwicklungsstand wird mit Wasserstoff ein elektrischer Wirkungsgrad von rund 35% für über 10'000 Stunden erreicht. Ein Feldversuchssystem hat in Winterthur bereits gut 1 kW Elektrizität ins öffentliche Netz eingespeist. Ziel ist ein elektrischer Wirkungsgrad von 50% und eine Betriebsdauer ohne merkliche Degradation von 40'000 Stunden. Obwohl bis dahin noch ein weiter Weg zu gehen ist, laufen Feldversuche bereits an. Die SOFC-Brennstoffzellen müssen aus thermischen Gründen mit hohem Luftüberschuss gefahren werden. Sie erreichen trotzdem Abgastemperaturen im Bereich von 300 °C. Die heißen Abgase können in kleinen Gaswandkesseln weiter genutzt werden [ 10]. Der auf den Gesamtbrennstoffbedarf bezogene elektrische Wirkungsgrad sinkt dann allerdings gegenüber dem Brennstoffzellenmodul – dafür steigt der thermische Wirkungsgrad.

Im Bild 8 werden die elektrischen Wirkungsgrade verschiedener **Kleinst-Blockheizkraftwerke verglichen**. Die Werte sind im Hinblick auf den Stand der Technik bei „normalen“ Blockheizkraftwerken mit elektrischen Leistungen über 100 kW von 33% bis 40% bescheiden bis schlecht. Bei den Brennstoffzellensystemen ist allerdings noch ein erhebliches Verbesserungspotential vorhanden. Aus grundsätzlichen Überlegungen dürfte es bei Stirlingsystemen erheblich geringer sein. Das kleinste Verbesserungspotential ist bei den Systemen mit konventionellen Verbrennungsmotoren zu erwarten, da diese bereits während einem Jahrhundert intensiv weiterentwickelt wurden und millionenfach im täglichen Einsatz stehen.

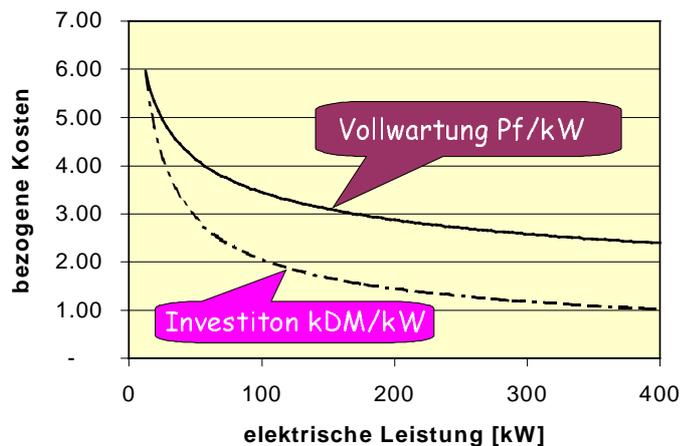
## **Vor- und Nachteile der Kleinst-BHKWs**

Zweifellos weisen Kleinblockheizkraftwerke mit elektrischen Leistungen unter 10 kW den Vorteil einer **raschen Realisierbarkeit** auf. In vielen Fällen entscheidet der Verbraucher über die Anschaffung selbst. Wo vorhanden, können Kleinblockheizkraftwerke die **vorhandene Gasfeinverteilinfrastruktur** nutzen.

Sie weisen aber hohe bezogene **Investitions- und Wartungskosten** auf. Dies folgt zumindest aus den für konventionelle BHKWs publizierten Werten: Bild 9. Eine gegenteilige Tendenz wurde bisher für Kleinblockheizkraftwerke nicht bewiesen. Bei Verbrennungsmotoren ist bei gleichen Anforderungen (z.B. Betriebsemissionsüberwachung!) wie bei den grösseren Maschinen auch kaum damit zu rechnen. Bei Stirlingsystemen und Brennstoffzellensystem ist eine Prognose noch schwierig.

Hauptnachteil der Kleinsysteme ist aber aus energetischer Sicht ihr bescheidener bis **ungenügender elektrischer Wirkungsgrad**. Eine Ausnahme bilden Brennstoffzel-

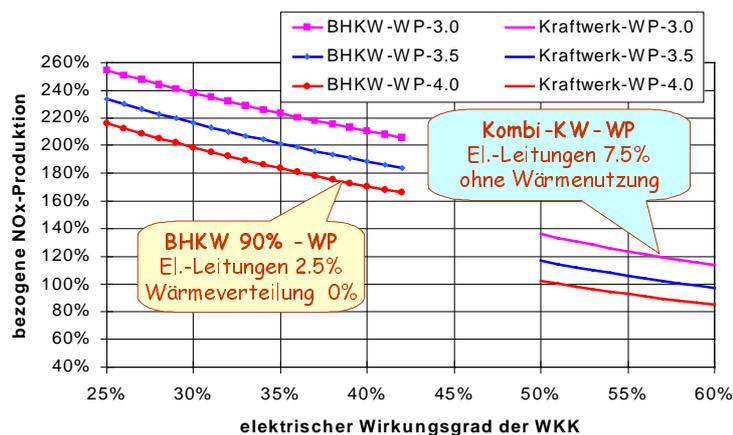
lensysteme. Sie versprechen, künftig durchaus in den Bereich konventioneller BHKWs einzudringen. Und dies bei deutlich geringeren Schadstoffemissionen!



Zogg/BFE/98

**Bild 9:** Mittelwerte der Investitions- und Vollwartungskosten von Blockheizkraftwerken in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung (aus [ 11]).

Kleinst-BHKWs sind unbedingt der **Luftreinhalteverordnung** zu unterstellen. Dabei sind bei Erdgasbetrieb die Emissionsgrenzen der LRV 92 anzustreben und möglichst zu unterschreiten. Gegenüber der Stromproduktion mit Kombikraftwerken führt jene in Blockheizkraftwerken nach der LRV 98 nämlich zu deutlich höheren Stickoxidemissionen, wie das **Bild 10** zeigt. Bei den Verbrennungsmotoren sind hier erhebliche Anstrengungen nötig und eine **Betriebsemissionsüberwachung** ist unumgänglich. Bei starker Verbreitung von Kleinst-WKK-Anlagen würde sich als weiteres Problem der erschwerte Eingriff durch das Management elektrischer Netze stellen.

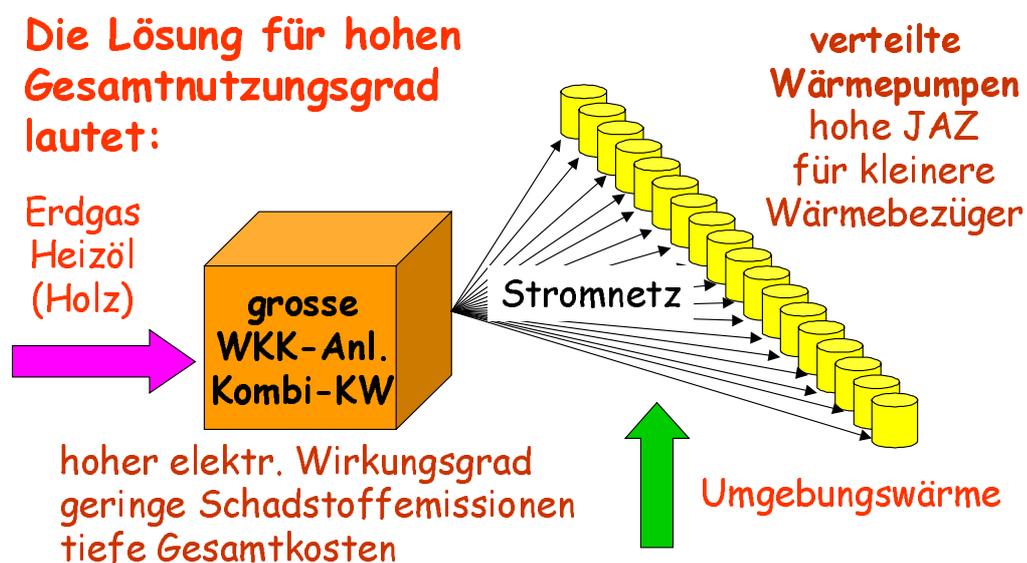


Zogg/BFE/98

**Bild 10:** Maximale Stickoxidproduktion des Heizungssystems WKK-WP bezogen auf die Stickoxidproduktion eines Gaskessels (mit einem auf den unteren Heizwert bezogenen Nutzungsgrad von 100%) für die Erzeugung der gleichen Nutzwärme gemäss der LRV 98. Einzelheiten in [ 4].

## Energetisch optimale Lösung

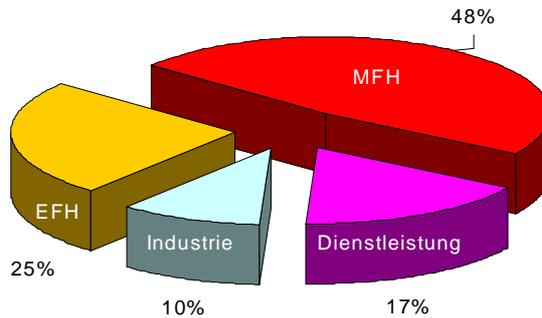
Oben wurde bereits festgestellt, dass Wärme-Kraft-Kopplung als Folge des gegenüber modernen Kombikraftwerken geringen elektrischen Wirkungsgrads nur sinnvoll ist, wenn die ganze produzierte Wärme auch genutzt wird. Eine maximale Brennstoffeinsparung zur Bereitstellung von Raumwärme (oder allgemein Niedertemperaturwärme) ergibt sich beim Verbund von WKK-Anlagen mit hohem elektrischem Wirkungsgrad mit Wärmepumpensystemen mit hoher Jahresarbeitszahl. Beim heutigen Stand der Technik drängt sich somit die im Bild 11 skizzierte Lösung auf. Kleine Wärmepumpensysteme im Wärmeleistungsbereich unter 10 kW lassen sich heute problemlos realisieren. Kleinkompressoren (z.B. Kühlschrank!) benötigen im Gegensatz zu Kleinverbrennungsmotoren (z.B. Motorrad) kaum Wartung. Wie das Bild 8



Zogg/BFE/98

**Bild 11:** Aus 100% Brennstoffenergie 150% bis 200% Wärme erzeugen: Maximale Brennstoffnutzung zur Raumheizung mit grossen WKK-Anlagen mit elektrischer Feinverteilung zu den Elektrowärmepumpen für Kleinwärmebezüger.

zeigt, lassen sich Kleinst-WKK-Anlagen mit elektrischen Wirkungsgraden über 33% kaum realisieren (Hoffnung bleibt eigentlich nur für das Brennstoffzellensystem). Aus der Sicht einer maximalen Brennstoffnutzung sind deshalb beim heutigen Stand der Technik grössere Blockheizkraftwerke zum Beheizen grösserer Gebäudekomplexe für die Produktion des elektrischen Stroms mit hohem elektrischem Wirkungsgrad, Feinverteilung des Stroms durch elektrische Leitungen und Betrieb von Elektrowärmepumpen bei den Kleinverbrauchern die ideale Lösung. Dabei sollte der ganze durch die WKK-Anlagen produzierte elektrische Strom durch Wärmepumpen genutzt werden. Diesem Konzept steht von der Wärmebedarfsseite nichts entgegen, wie das Bild 12 verdeutlicht.



Zogg/BFE/98

**Bild 12:** Verteilung des Raumwärmebedarfs auf verschiedene Wärmebezüger.

## Wann sind Kleinstblockheizkraftwerke doch sinnvoll?

Wie eben dargelegt, sollten Kleinwärmebezüger (wie Einfamilienhäuser) aus energetischer Sicht beim heutigen Stand der Technik mit Wärmepumpen versorgt werden. Kleinstblockheizkraftwerke stehen zu diesem Konzept im Widerspruch. In den folgenden Fällen ist es trotzdem sinnvoll, Kleinst-BHKWs einzusetzen:

- Wenn die **Vorlauftemperatur** der Heizung an den kältesten Tagen **über 65°C** zu liegen kommt und
- wenn sich die **Erschliessung der Wärmequellen** (Luft, Erdboden, Grund- und Oberflächenwasser) als **zu aufwendig** erweist.

Der energetisch und ökologisch sinnvolle Einsatz von Kleinstblockheizkraftwerken ist in diesen Fällen aber an **folgende Bedingungen** geknüpft:

- Der elektrische Wirkungsgrad soll wenigstens 33% und der Gesamtwirkungsgrad wenigstens 90% erreichen.
- Die Forderungen der Luftreinhalteverordnung muss auch nach längerer Betriebszeit erfüllt werden (Betriebsemissionsüberwachung!). Bei Erdgasbetrieb sollten die Emissionsgrenzwerte der LRV 92 nicht überschritten werden.
- Der Betrieb darf nur bei vollständiger Nutzung der Wärme erfolgen.

## Glossar

### ➤ **Elektrischer Wirkungsgrad einer WKK-Anlage**

Verhältnis der von einer WKK-Anlage produzierten elektrischen Energie zu der der WKK-Anlage zugeführten Brennstoffenergie (wenn nicht anders vermerkt auf den unteren Heizwert bezogen).

### ➤ **Gesamtwirkungsgrad einer WKK-Anlage**

Verhältnis der von einer WKK-Anlage produzierten Summe aus elektrischer Energie und Nutzwärme zu der der WKK-Anlage zugeführten Brennstoffenergie (wenn nicht anders vermerkt auf den unteren Heizwert bezogen).

### ➤ **Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe**

Verhältnis der von einer Wärmepumpe während einem Jahr produzierten Nutzwärme zu der von der Wärmepumpe benötigten elektrischen Energie.

### ➤ **Nutzungsgrad**

Verhältnis der über längere Zeit (z.B. ein Jahr) produzierten Nutzwärme zur aufgenommenen Brennstoffenergie (wenn nicht anders vermerkt auf den unteren Heizwert bezogen).

## Literatur

- [ 1] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1966, Bundesamt für Energie und Schweiz.Nationalkomitee des Welt-Energie-Rates, Sonderdruck aus SEV/VSE (1997)16, EDMZ 3.34/97 d.
- [ 2] Zogg,M. Bessere Primärenergienutzung, Schweizer Ingenieur und Architekt, 116(98)21, 14.
- [ 3] Baer, H.-D.: Thermodynamik, 8.Aufl., Springer-Verlag, Berlin u.a.O. 1992.
- [ 4] Zogg,M. Wärme-Kraft-Kopplung in Kombination mit Kompressionswärmepumpen, Tagungsband zur 5.UAW-Tagung, Bundesamt für Energie 1998, ENET-Artikelnummer 30743, S.7/17.
- [ 5] Zogg,M.: Maximale Primärenergienutzung und CO<sub>2</sub>-Reduktion mit Wärmepumpenheizsystemen, Bundesamt für Energie, ENET-Artikel 30876.
- [ 6] R.Ruch, E.Pauli, Hp.Eicher, H.Pauli: Erfolgskontrolle Kleinblockheizkraftwerk, Schlussbericht Bundesamt für Energie 1995, ENET-Artikel 30420.
- [ 7] Zumsteg, Hp., Schönholzer, T., Hagen, M.: Dynamischer Lastregler zu Stirling-Lineargenerator, Schlussbericht Bundesamt für Energie 1997, ENET-Nr.9555021.
- [ 8] Seifert,M., Stadelmann, M.: Micro-BHKW fürs Einfamilienhaus, Heizung Klima 25(1998)4, 96/97.
- [ 9] Schubnell,M.: Thermophotovoltaic cogeneration of heat and electricity in a natural gas powered residential heating system, Jahresbericht 1997, FOGA-Projekt 0052, Paul Scherrer Institut, Villigen.
- [ 10] Diethelm,R. u.a.: SOFC Brennstoffzellensysteme für die Haustechnik, Tagungsband zur 5.UAW-Tagung, Bundesamt für Energie 1998, ENET-Artikelnummer 30743, S.55/61.
- [ 11] Böttcher,U., Möhring-Hüser,W.: Kostenvergleich erdgasbetriebener Klein-BHKW, Brennstoff-Wärme-Kraft 49(1997)11/12, 43/46.