

# Dezentrale Versorgungssicherheit für den Wohnbereich: Wirtschaftlichkeit durch KWK und ökologische Kriterien

Dr. Günther Ebert  
Fraunhofer ISE  
guenther.ebert@ise.fraunhofer.de

Neben dem weiter zu forzierenden Einsatz von Energieerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien und Energiespartechniken gehört zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft auch der effiziente Umgang mit fossilen Energieträgern.

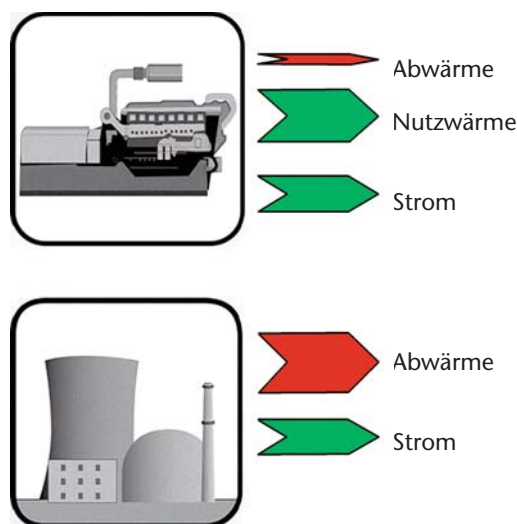
So liefert die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Form von Blockheizkraftwerken seit vielen Jahrzehnten einen wesentlichen Beitrag zur Einsparung von Primärenergie und zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Denn durch die gleichzeitige Nutzung der erzeugten Elektrizität und der Wärme ist der Primärenergie-Nutzungsgrad sehr hoch. Die meisten Blockheizkraftwerke, deren Leistung meist oberhalb von 100 kW beginnt und bis weit in den MW-Bereich reicht, arbeiten durch die bestehende KWK-Gesetzgebung wirtschaftlich. Dagegen wird in Großkraftwerken häufig ausschließlich die erzeugte elektrische Energie genutzt und die Abwärme wird an die Umwelt abgegeben. Eine schematische Darstellung dieser Unterschiede zeigt *Abb. 1*.

Es ist davon auszugehen, dass die Verbreitung solcher Anlagen noch zunehmen wird, aber eine flächendeckende Versorgung aller Haushalte ist nicht zu erwarten, da bei der Verteilung der Wärme über größere Distanzen hohe Kosten und hohe Verluste entstehen, sodass die Anlagen dann unwirtschaftlich werden. Andererseits liegt in der Versorgung eines Wohnbereichs, also von Ein- und Mehrfamilienhäusern, ein riesiges, heute noch weitgehend ungenutztes Potenzial zur Einsparung von Primärenergie und zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Deshalb wird über Alternativen nachgedacht. In Deutschland gibt es heute einen Bestand von über 15 Millionen, meist privaten Heizanlagen. Würden diese Heizanlagen mit kleinen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die neben Wärme auch elektrischen Strom erzeugen („Stromerzeugende Heizung“) ausgestattet, könnte bei optimierten Geräteeigenschaften elektrische Energie in der Größenordnung von 40 TWh pro Jahr mit einer Effizienz von etwa 95% bezogen auf die eingesetzte Primärenergie erzeugt werden. Geht man von einem Wirkungsgrad der Stromerzeugung in einem Großkraftwerk von etwa 1/3 aus, entspräche dies einer Primärenergieeinsparung von 80 TWh. Das Potenzial zur Reduzierung von CO<sub>2</sub> läge entsprechend bei etwa 40 Mio t.

Kleine Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit thermischen Leistungen unter 20 kW, sogenannte Mikro-KWKs, sind schon seit einigen Jahren auf dem Markt. Sie finden vornehmlich Einsatz in kleineren Gewerbebetrieben, Hotels, öffentlichen Gebäuden und auch in Ein- und kleineren Mehrfamilienhäusern. Die Geräte werden bei höherem Wärmebedarf meist bivalent zusammen mit einem Heizkessel und bei kleinerem Heizbedarf auch monovalent, also ohne weitere Zusatzheizquelle verwendet.

*Abbildung 1*  
Primärenergienutzung im Vergleich: Blockheizkraftwerk versus Großkraftwerk



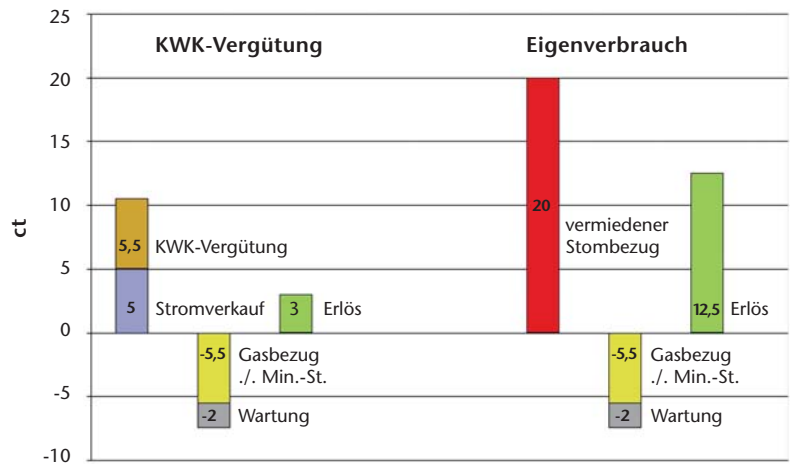
Die Technik basiert meist auf Verbrennungsmotoren, die mit Gas oder Diesel betrieben werden. Das derzeitige Verkaufsvolumen liegt bei etwa 3.000 Einheiten pro Jahr.

Die Geräte arbeiten in der Regel ökologisch vorteilhaft. Für eine zukünftige, zumindest teilweise flächendeckende Verbreitung ist es aber notwendig, dass diese Anlagen auch wirtschaftlich arbeiten. Der erheblich höhere Preis gegenüber einer konventionellen Heizanlage muss über eine überschaubare Anzahl von Jahren amortisierbar sein.

Die Amortisierung dieser Anlagen wird durch das KWK-Gesetz unterstützt. Der Anlagenbetreiber darf den erzeugten Strom in das öffentliche Netz einspeisen und erhält von dem örtlichen Versorgungsunternehmen einen Preis pro kWh, der sich vereinfacht nach dem Preis des Grundlaststroms an der Strombörse EEX<sup>1</sup> richtet. Dies sind etwa 3-6 ct pro kWh. Hinzu kommt die Einspeisevergütung von 5,5 ct /kWh nach dem KWK-Gesetz von 2002 für einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren. Der Verkauf des Stroms ist stromsteuerfrei. Nach Abzug der Betriebskosten (z. B. Gasbezug, der von der Mineralölsteuer befreit ist und Wartungskosten) bleibt dem Betreiber ein Betrag von einigen wenigen Cent pro kWh.

Weitaus vorteilhafter ist deshalb die Nutzung des erzeugten Stroms im eigenen Haus oder Betrieb. Hier ergeben sich finanzielle Vorteile, die etwa 3 bis 4-mal so hoch sind. Der Betrieb der Anlage sollte also immer möglichst so erfolgen, dass zunächst der eigene Strombedarf gedeckt wird. Dieser Zusammenhang ist beispielhaft in *Abb. 2* verdeutlicht.

<sup>1</sup> An der Leipziger Strombörse EEX (European Energy Exchange) zur Zeit 128 Teilnehmer aus 15 europäischen Ländern sowie den USA aktiv – mehrheitlich Banken, Händler oder Industrieunternehmen.



Im folgenden sollen die Wirtschaftlichkeit zweier sehr unterschiedlicher Einsatzfälle von Mikro-KWK-Anlagen untersucht werden. In beiden Fällen wird ein bereits seit einigen Jahren auf dem Markt vertriebenes verbrennungsmotorisches Mikro-KWK zu Grunde gelegt, dessen Daten in *Tab. 1* aufgeführt sind.

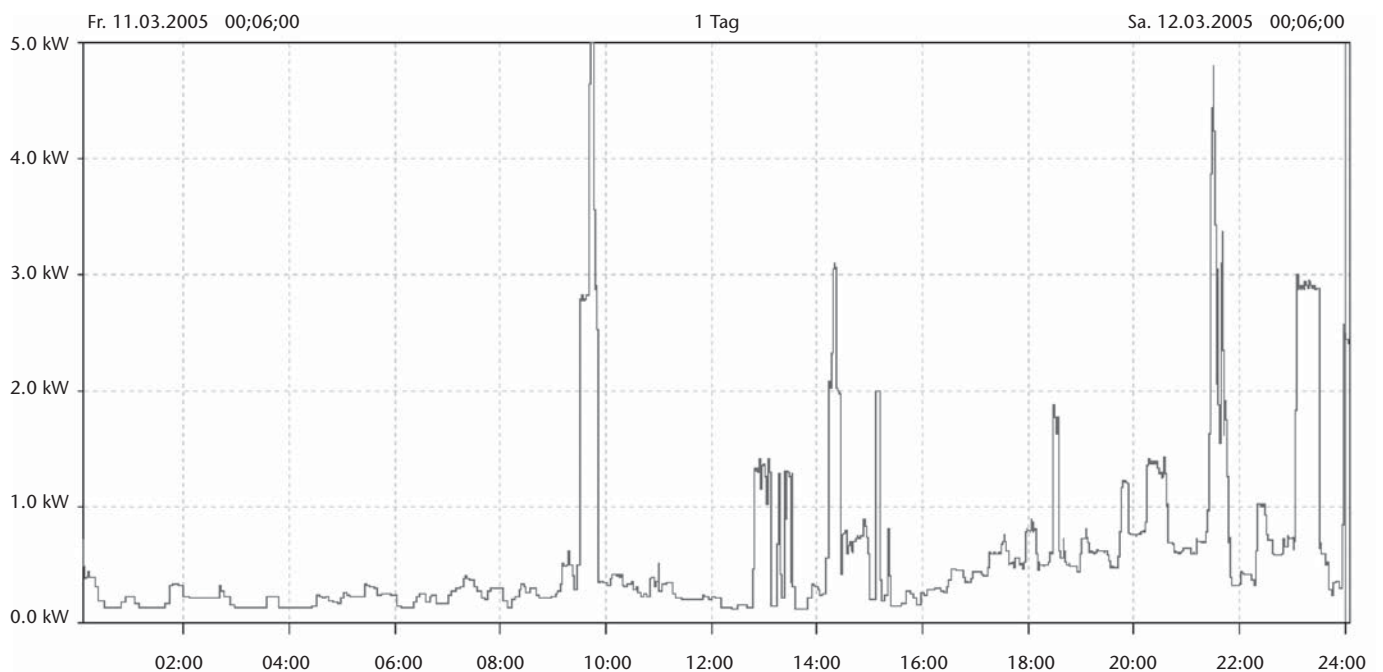
**Erster Einsatzfall:**

Betrieb in einem Hotel als Zusatzinstallation zu einem vorhandenen Heizkessel. Da das Gerät mit einer Wärmeabgabe von 12,5 kW bezogen auf den Gesamtwärmebedarf des Objekts unterdimensioniert ist und unter anderem wegen eines Schwimmbads auch im Sommer ein gewisser Wärmebedarf vorhanden ist, kann das Gerät etwa 8.000 h im Jahr laufen. Weiterhin erlauben die vorliegenden Gegebenheiten etwa 90% des selbst erzeugten Stroms im eigenen Haus zu verwenden. Der Rest von 10% wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Berücksichtigt man noch die laufenden Wartungskosten von einigen Cent pro kWh ergeben sich jährliche Minderkosten gegenüber einer Versorgung ausschließlich mit konventionellem Heizkessel und Strombezug vom Stromversorger von etwa 4.700 €. Die Investitionskosten einer solchen Mikro-KWK-Anlage, die als Zusatzinstallation zu einer vorhandenen Heizanlage um 15.000 - 18.000 € liegen,

*Abbildung 2*  
Vergleich der finanziellen Vorteile von Einspeisung und Eigenverbrauch des selbst erzeugten Stroms in einer Mikro-KWK-Anlage. Angenommen ist ein Gesamtwirkungsgrad von 98%.

Thermische Leistung	Elektrische Leistung	Elektrischer Wirkungsgrad	Gesamtwirkungsgrad
5,5 kW	27%	88%	12,5 kW

*Tabelle 1*  
Spezifikationen des für die Wirtschaftlichkeitsüberlegung zu Grunde gelegten Mikro-KWK-Geräts



**Abbildung 3**  
Stromlastprofil eines  
typischen Einfamilien-  
hauses im Tagesverlauf

lassen sich somit in wenigen Jahren amortisieren. Der vermiedene Primärenergieverbrauch liegt bei 88.000 kWh und die vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei etwa 44 t jährlich.

#### Zweiter Einsatzfall:

Für ein typisches Einfamilienhaus mit angenommenem Wärmebedarf von 20.000 kWh und Strombedarf von 4.000 kWh jährlich und monovalenter Betriebsweise (das Mikro-KWK ist die einzige Wärmequelle), bekommt man dagegen ein völlig anderes Ergebnis. Da das Gerät nicht regelbar ist, kommt man nur auf eine Laufzeit von etwa 1.600 h pro Jahr. Damit reduziert sich auch die Zeit in der elektrische Energie produziert werden kann erheblich. Ein weiterer Aspekt ist der unstetige Strombedarf im Einfamilienhaus, so dass sich Wärmebedarf und Strombedarf zeitlich nicht besonders gut decken. Letzteres ist aber eine Voraussetzung dafür, dass der produzierte Strom zu einem hohen Anteil selbst genutzt werden kann. Dies wird in [Abb.3](#) deutlich, die den Tagesverlauf einer typischen Stromlastkurve eines Einfamilienhauses zeigt. Man erkennt eine relativ niedrige Grundlast von einigen Hundert Watt (Kühlschrank, Gefriertruhe, Heizung, Standby-Geräte etc.) und Bereiche, in denen der Strombedarf deutlich ansteigt und über längere Zeit anhält (abendliche Beleuchtung, TV-Gerät).

Überlagert sind dann Spitzen mit relativ kurzer Zeitdauer, die bis über 5 kW reichen (E-Herd, Toaster, Waschmaschine). Trotz des deutlich stetigeren Wärmebedarfs in der Heizperiode passen Strombedarf und -erzeugung nicht besonders gut zusammen. Durch das Ein-Aus-Prinzip des in diesem Fall eingesetzten Mikro-KWK wird dies noch verstärkt. Die mögliche Eigennutzung des selbst produzierten Stroms liegt deshalb nur noch bei etwa 15%. 85% werden in das Netz eingespeist. Ein weiterer Aspekt: trotz der hohen elektrischen Leistung von 5,5 kW (dank des hohen elektrischen Wirkungsgrads) lassen sich nur etwa 33% des eigenen Strombedarfs abdecken, der Rest muss zugekauft werden. Die jährlichen Einsparungen gegenüber einer konventionellen Heizanlage liegen deshalb nur bei etwa 450 €. Selbst nach Abzug der Kosten einer Heizanlage, die ja in diesem Fall nicht erforderlich ist, bleibt eine Investition von 11-15.000 € übrig, die sich kaum amortisieren lässt.

Natürlich werden hier zwei extreme Fälle verglichen. Es gibt viele Anwendungsfälle, die einen wirtschaftlichen Betrieb solcher Anlagen bereits heute zulassen. Dies dürfte in 2-3-Familienhäusern, die einen höheren Wärmebedarf und einen stetigeren Strombedarf haben, häufig der Fall sein. Auch ältere Einfamilienhäuser, die evtl. mit

Thermische Leistung	Elektrische Leistung	Elektrischer Wirkungsgrad	Gesamtwirkungsgrad	Verkaufspreis
1,5 - 15 kW	0,3 - 3,3 kW	18 %	100 % (Hu)	6.000 €

Tabelle 2  
Spezifikationen eines fiktiven, für den Einsatz im Einfamilienhaus besser angepassten Mikro-KWK-Geräts

	V-Motor	Dampfexpansion	Stirling	Brennstoffzelle
Prozess	interne Verbrennung	Clausius-Rankine-Cycle externe Verbrennung	Stirling externe Verbrennung	elektrochemisch
Emissionen	hoch/mittel,laut, schwer	niedrig	niedrig	sehr niedrig
Elektrischer Wirkungsgrad	mittel	niedrig/mittel	niedrig/mittel	hoch
Modulierbarkeit	eingeschränkt sinnvoll	gutes Teillastverhalten	gutes Teillastverhalten	n.a.
Marktreife	ja	Feldtestphase	Feldtestphase	für diese Anwendung noch zu geringe Lebensdauer
Preis	hoch	hoch	hoch	sehr hoch
Geräte-Beispiele	Senertec Ecopower Honda...	OTAG	Solo Whispertech Microgen Sunshine	Vaillant Sulzer-Hexis...

Tabelle 3  
Übersicht Mikro-KWK-Technologien

einem Schwimmbad ausgestattet sind, erlauben häufig einen wirtschaftlichen Betrieb. Allerdings lässt sich das vorhandene ökologische Potenzial so nur zum kleineren Teil erschließen. Hinzu kommt der immer geringer werdende Energiebedarf neuer Häuser. Wir möchten deshalb der Frage nachgehen, wie Mikro-KWKs konzipiert sein müssen und wie hoch deren Preis sein darf, um dieses Potenzial der Ein- und Zweifamilienhäuser zu erschließen.

## Modulierbare Mikro-KWK-Anlagen


### Anforderungen

Will man möglichst viel des selbst produzierten Stroms auch selbst zu nutzen, muss eine hohe jährliche Laufzeit erreicht werden. Denn nur wenn die Anlage läuft, kann sie Strom erzeugen und damit Strombezug aus dem Netz vermeiden. Das lässt sich mit einem in der Leistung

modulierbaren Gerät erreichen, das nur so viel Wärmeenergie wie gerade gebraucht wird liefert. Im Winter läuft es deshalb (tagsüber) ständig. In der Übergangszeit kommt es ebenfalls auf eine hohe Laufzeit und im Sommer kann die Zeit zur Warmwasserbereitung stark in die Länge gezogen werden. Es lassen sich auf diese Weise Laufzeiten von bis zu 4.000 h erzielen.

Die Gesamtmenge des produzierten Stroms steigt dadurch zwar nicht, wohl aber der Anteil der Selbstnutzung. Dabei ist auf eine auf den Bedarf angepasste elektrische Leistung zu achten. Mit einem solchen fiktiven, idealen Mikro-KWK, dessen Daten in Tab.2 zusammengefasst sind, ließen sich dann in dem o.g. Beispiel eines Einfamilienhauses zwar auch nur 400 - 450 € pro Jahr einsparen. Ein niedriger Preis oder besser der Mehrpreis gegenüber einem konventionellen Kessel im Bereich von 2.000 - 2.500 € würde dann aber ausreichen, um diese Geräte in wenigen Jahren zu amortisieren.

**Abbildung 4**  
Beispiel für eine Mikro-KWK-Anlage auf Verbrennungsmotorbasis der Fa. Senertec (marktreife Serie)



$P_{th}$	12,5 kW
$P_{el}$	5,5 kW
$\eta_{el}$	27 %
$\eta_{\Sigma}$	88 %
Modulierbarkeit	nein
Emission	int. Verbrennung intens. Wartung
Gewicht	530 kG
Geräusch	< 56dBA
Preis	um 15.000 €

**Abbildung 5**  
Beispiel für ein Mikro-KWK-Gerät der Fa. OTAG, das mit einem Dampf-Expansions-Aggregat ausgerüstet ist.



$P_{th}$	2 – 16 kW
$P_{el}$	0,2 ... 2,1 kW
$\eta_{el}$	13 %
$\eta_{\Sigma}$	98 %
Modulierbarkeit	1:8
Emission	ext. Verbrennung
Gewicht	190 kg
Geräusch	42dBA
Preis	um € 13.000
Marktreife	derzeit Feldtest



Modell	MK 5
$P_{th}$	7,5 – 13 kW
$P_{el}$	1 kW
$\eta_{el}$	7 – 13 %
$\eta_{\Sigma}$	80 – 90 %
Modulierbarkeit	nur therm. über eingeb. Kessel
Emission	int. Verbrennung
Gewicht	150 kg
Geräusch	63dBA
Preis	keine Angabe
Marktreife	2007/2008

**Abbildung 6**  
Beispiel für ein Mikro-KWK-Gerät mit Stirlingmotor der Fa. Whispertec

Einige wenige, meist kleinere Unternehmen arbeiten an solchen neuen, vielversprechenden Gerätekonzepten, um die Mikro-KWK-Technologien besser an den Bedarf eines Einfamilienhauses anzupassen. Eine Übersicht welche Technologien hierfür verwendet werden gibt [Tab. 3](#).

So wird an der Weiterentwicklung der verbrennungsmotorischen Mikro-KWK gearbeitet, unter anderem um sie modulierbar zu machen. Allerdings sind mit dieser Technologie derzeit noch einige inhärente Nachteile verbunden. Denn auf Grund der internen Verbrennung sind diese Geräte nicht sehr flexibel bezogen auf verwendbare Brennstoffe. Der Aufwand, diese Geräte leise und vibrationsarm auszuführen ist hoch und der elektrische Wirkungsgrad sinkt sehr schnell bei Abregelung der Leistung. In [Abb.4](#) ist eine Mikro-KWK-Anlage auf Verbrennungsmotorbasis (V-Motor) der Firma Senertec mit ihren Spezifikationen dargestellt.

Das Gerät kann nach fast 10 Jahren Marktpräsenz hinsichtlich Lebensdauer und Zuverlässigkeit als ausgereift bezeichnet werden.

**Neuentwicklungen für bessere Modulierbarkeit**

Zu den vielversprechenden Neuentwicklungen zählen Geräte auf Basis von Dampfexpansions- und Stirling-Technik. Beide Prinzipien basieren auf einer externen Verbrennung, die es erlaubt, nahezu alle Brennstoffe wie Gas, Öl, Holz-Pellets etc. einzusetzen. Zudem ist die Verbrennung ohne Zusatzaufwand sehr emissionsarm und die Teillasteigenschaften sind sehr gut. Die Geräte sind von Haus aus leiser, leichter, vibrationsärmer und sollten auch weniger wartungsintensiv sein als verbrennungsmotorische Geräte. Allerdings handelt es sich meist noch um Feldtestgeräte, die ihre Markttauglichkeit noch beweisen müssen.

Brennstoffzellen weisen zweifellos das höchste ökologische Potenzial auf. Sie haben einen sehr hohen elektrischen Wirkungsgrad. Allerdings wird noch eine längere Zeitdauer bis zur Markteinführung vergehen. Aber auch sie werden im Kleinleistungsbereich sicher einen großen Markt finden.

Ein Beispiel für ein modulierbares Mikro-KWK-Gerät der Firma OTAG zeigt [Abb. 5](#), das auf dem Dampfexpansionsprinzip beruht. Das Gerät hat zwar noch einen relativ geringen elektrischen Wirkungsgrad, ist aber insgesamt besser an das typische Bestands-Einfamilienhaus angepasst. Großer Vorteil ist die Modulierbarkeit über einen weiten Bereich. Das Gerät befindet sich derzeit in der Feldtestphase und soll bis Ende 2007 auch in nennenswerten Stückzahlen verkauft werden.

Das Stirling-Gerät der Firma Whispertech ([Abb. 6](#)) ist speziell für den Einfamilienhausbereich konzipiert. Die elektrische Leistung liegt deshalb auch nur bei 1 kW. Um die erforderliche hohe thermische Leistung zu bringen, ist noch ein zusätzlicher Heizkessel mit eingebaut, der sich auch moderat modulieren lässt. Das Gerät, das auch auf dem deutschen Markt eingeführt werden wird, soll preislich deutlich unter bisherigen Marktpreisen für vergleichbare Geräte liegen.

für technologische Weiterentwicklung und produktionstechnische Optimierung vorhanden ist, sodass die Preise bei weiterer Verbreitung von Mikro-KWK-Anlagen auf ein Niveau sinken werden, dass ein wirtschaftlicher Betrieb auch im Einfamilienhaus zur Regel wird. Beschleunigen ließe sich dieser Prozess durch eine Erhöhung der KWK-Einspeisevergütung für eine bestimmte Zeit der Markteinführung. Dadurch würde die KWK auch für Anlagenbetreiber attraktiver werden, die einen größeren Teil des selbsterzeugten Stroms ins Netz einspeisen müssen, da ihr Lastprofil keinen so hohen Eigenverbrauch erlaubt.

## Zusammenfassung

Kleine Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sind ökologisch sehr sinnvoll und lassen sich bereits heute in vielen Anwendungen auch wirtschaftlich betreiben. Für das typische Einfamilienhaus ist die Wirtschaftlichkeit allerdings meist noch nicht gegeben. Gerade hier liegt aber das größte ökologische Potenzial.

Neuere Entwicklungen, meist auf alternativen Technologien basierend, sind technisch besser an diese Anwendung angepasst als bereits existierende. Diese Geräte haben allerdings ihre Praxistauglichkeit und ihre Zuverlässigkeit noch nicht bewiesen. Auch sind die Preise für den wirtschaftlichen Einsatz heute noch zu hoch. Es ist aber davon auszugehen, dass bei diesen Neuentwicklungen noch eine Menge Raum