

Prognose bis ins Jahr 2010

BHKW-Potentiale in Deutschland

Markus Gailfuß*

Der Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung stellt mit Hilfe von Blockheizkraftwerken eine Möglichkeit zur CO₂-Minderung dar. Ziel der BHKW-Anlagen ist eine dezentrale, gleichzeitige Bereitstellung von Strom- und Wärme. Während im kommunalen Bereich (ohne Fernwärme) vor allem Verbrennungsmotoren als BHKW-Technologie eingesetzt werden, dominieren im industriellen Bereich die Gasturbinen.

Bei der BHKW-Motortechnologie werden vorwiegend Otto-Gasmotoren, Diesel-Gasmotoren und Dieselmotoren eingesetzt. Dieselmotoren weisen im Durchschnitt um bis zu 30 % höhere elektrische Wirkungsgrade als Otto-Gasmotoren auf. Gasmotoren, die im Dieselbetrieb laufen, können annähernd die Wirkungsgrade von Dieselmotoren erreichen. Bei diesen Zündstrahlmotoren wird Gas als Wärmeträger eingesetzt und zusätzlich ca. 5–10 % des bei Nennleistung benötigten gesamten Brennstoffes als Dieselöl zur Zündung eingespritzt. Forschungsprojekte mit dem Ziel, die benötigte Zündölmenge auf einen Prozentsatz von 2–3 % zu reduzieren, werden derzeit verstärkt durchgeführt. Ein weiteres Verfahren zur Verbrennung von Erdgas in einem Hubkolbenmotor ist die so-

genannte Hochdruckgaseinblasung. Bei diesem Brennverfahren wird Erdgas unter hohem Druck (200–250 bar) direkt in den Brennraum eingeblasen. Die Zündung erfolgt ähnlich wie bei einem Zündstrahlmotor.

In den letzten Jahren hat sich die Blockheizkraftwerk-Technik sehr stark weiterentwickelt. So verbesserte sich der elektrische Wirkungsgrad bei Otto-Gasmotoren von 34 % (1980) auf bis zu 41 % (1997). Durch gezielte Weiterentwicklung und Optimierung der Brennraumgeometrie und der Ladungswechsel erscheinen elektrische Wirkungsgrade von 45 % realisierbar.

BHKW-Anlagen werden meist in modularer Bauweise, also mit mehreren Aggregaten, errichtet. Dadurch wird eine höhere Verfügbarkeit der elektrischen Leistung bei Ausfall eines Aggregats oder bei Wartungsarbeiten erreicht. Außerdem kann der Betrieb im unwirtschaftlichen Teillastbereich durch An- und Ausschalten von Motoren- oder Motorengruppen umgangen werden. Bezüglich der Anlagenkonfiguration ergibt sich ein Zielkonflikt: Wird die Zahl der Module klein gewählt, sinkt die Investitionssumme, aber auch die Betriebsstun-

blick über die notwendigen Investitionssummen und die technischen Daten für Motorenanlagen verschiedener Leistungsklassen bietet Tabelle 1. Laut einer im Rahmen dieser Studie durchgeführten Umfrage sind die BHKW-Preise in den letzten zwölf Jahren um 20–35 % gesunken. Bei kleineren BHKW-Anlagen bedeutet dies nahezu eine Halbierung der dynamischen Amortisationsdauer. Auch die Wartungskosten konnten durch die Verbesserung der Anlagenverfügbarkeit sowie den Einsatz von Motormanagementsystemen gesenkt werden. Heute sind diese im Bereich von 1–7 Pfennig je kWh_{el} einzuordnen.

Turbinen haben im Vergleich zu Dieselmotoren deutliche, im Vergleich zu Otto-Gasmotoren geringfügig niedrigere Wirkungsgrade. Die Verluste in einer Turbine sind vor allem Spaltverluste, die von der Baugröße der Turbine abhängen. Große Turbinen weisen spezifisch geringere Spaltverluste als kleine Turbinen auf. Daher können bei einer 1 MW_{el} Gasturbine derzeit nur Wirkungsgrade um die 30 % erreicht werden. Neben Verbesserungen der konventionellen Gasturbine wie Modifizierung der Brennkammer, magnetgelagerte Turbinen

elektr. Moduleleistung in kW _{el}	Modulkosten in TDM	spez. Modulkosten in DM/kW _{el}	Wartungskosten in Pf/kW _{el}	elektr. Wirkungsgrad in %	Energienutzungsgrad in %	Stromkennzahl
50	125	2500	4,0	31,4	88,7	0,52
100	190	1900	3,4	32,7	90,4	0,58
150	210	1400	2,8	33,4	90,2	0,59
200	300	1500	2,8	33,4	90,4	0,59
250	320	1280	2,6	35,7	89,6	0,63
300	350	1160	2,5	35,9	89,6	0,67

Tabelle 1 Technische und wirtschaftliche Daten von Gasmotoren

denzahl der Motoren. Werden dagegen mehrere kleine Module gewählt, steigt die Betriebsstundenanzahl, aber auch die Investitionssumme. Die meisten BHKW bestehen aus einem oder zwei Modulen. Lediglich bei Anlagen über 500 kW_{el} werden im Durchschnitt drei Aggregate eingebaut. Im Jahre 1995 waren durchschnittlich 1,9 Module pro Anlage installiert. Dieser Wert lag 1991 noch bei 2,6 Modulen je Anlage. Die Verringerung der Modulanzahl ist u. a. auf die verbesserte Zuverlässigkeit der BHKW-Aggregate zurückzuführen. Einen Über-

und Erforschung neuer hitze- und druckbeständigerer Materialien gibt es neue Prozesse, deren Wirkungsgrad deutlich über dem herkömmlicher Anlagen liegt. Diese Prozesse sind schon im Markt eingeführt

* Markus Gailfuß ist Autor des Buches „CO₂-Minderungspotentiale durch Ausbau der Blockheizkraftwerke in Deutschland“, 1998, Peter Lang Europäischer Verlag der Wissenschaften, Frankfurt/M.

oder erreichen dieses Stadium in naher Zukunft. Dazu gehört der Cheng-Cycle-Prozeß, der Einsatz von Rekuperatoren und Zwischenkühler (Intercooler) sowie eine Kombination des Cheng-Cycle-Prozesses und des Rekuperator-Verfahrens, der sogenannte Humid Air Turbine (HAT)-Cycle-Prozeß. Bei diesen innovativen Gasturbinenanlagen steigen neben der Effizienz mit elektrischen Wirkungsgraden von 45 % bis zu 60 % auch die investitionsabhängigen Kosten um rund 20–30 %. Außerdem werden diese Technologien aus ökonomischen Gründen erst mittelfristig in einem Leistungsbereich angeboten, der für den BHKW-Bereich interessant ist.

Große Unterschiede bestehen in der Art der Abwärme der beiden beschriebenen Verbrennungskraftmaschinen. Während bei Motoren der größte Teil der Abwärme im Kühlwasser anfällt, wird die Abwärme beim Gasturbinenprozeß in einem höheren Temperaturbereich durch das Abgas abgegeben. Dadurch können Gasturbinen auch zur Prozeßwärmeerzeugung genutzt werden und sind für den industriellen Einsatz besonders geeignet. In den letzten Jahren hat sich die Zuverlässigkeit der Motoren- und Gasturbinenanlagen verbessert. Verfügbarkeiten von 95 % sind heute üblich. Die Wartungsintervalle und die Standzeiten haben sich erheblich verlängert. Übereinstimmend wird von allen BHKW-Motoren-Herstellern ein Wartungsintervall von 40 000 Stunden und eine Lebensdauer von 80 000–100 000 Stunden angegeben.

Emissionsminderungstechnologien

Um die nach der Technischen Anleitung (TA) Luft vorgeschriebenen Abgasgrenzwerte einzuhalten, werden verschiedene Emissionsminderungsmaßnahmen ergriffen. Hierbei unterscheidet man zwischen Primär- und Sekundärmaßnahmen. Während Primärmaßnahmen interne Reduktionsmaßnahmen beinhalten, stehen Sekundärmaßnahmen als Sammelbegriff für alle, dem Verbrennungsprozeß nachgeschalteten Abgasreinigungsanlagen. Aus dem Zusammenwirken von betrieblichen und konstruktiven Primärmaßnahmen wurde das Magermotorprinzip geschaffen. Dieses

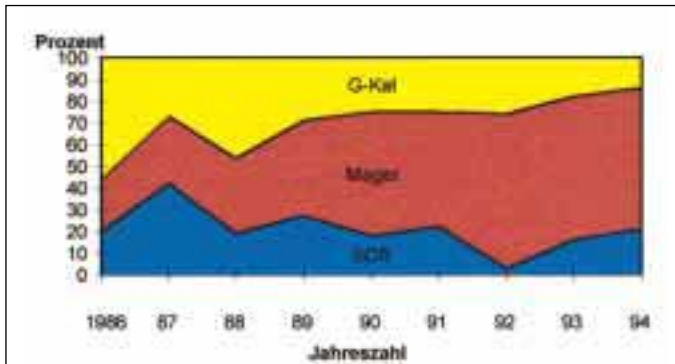


Bild 1 Bedeutung verschiedener Abgasminderungskonzepte in Deutschland

Prinzip, welches bei Otto-Gasmotoren zum Einsatz kommt, erreicht seine Emissionsminderung durch eine Erhöhung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses verbunden mit einer Anpassung des Zündzeitpunktes. Meist wird diesem Verfahren ein Oxidationskatalysator nachgeschaltet. Während dieser Katalysator typischerweise die Komponenten Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe in unbedenklichere Abgaskomponenten umwandelt, werden beim Drei-Wege-Katalysator auch die Stickoxide konvertiert. Drei-Wege-Katalysatoren (G-Kat) sind bei BHKW-Anlagen meistens in den Abgas-Wärmetauscher integriert und werden in einem schmalen Bereich unterhalb der vollständigen Verbrennung ($\lambda = 1$) betrieben. Bei größeren Dieselmotoren wird das SCR-Verfahren (Selective Catalytic Reduction) zur Stickoxidreduktion eingesetzt. Die festen Abgasbestandteile (Rußteilchen) werden durch Partikelfilter aus dem Abgasstrom herausgefiltert. Bild 1 veranschaulicht die Bedeutung der einzelnen Abgasminderungskonzepte in Bezug auf die in Deutschland installierte BHKW-Leistung. Dabei wird deutlich, daß der Drei-Wege-Katalysator, der primär bei kleineren Motoren mit geringerer Leistung eingesetzt wird, in den letzten Jahren gegenüber Gasmotoren mit Magermischverbrennung mit höheren spezifischen Leistungen und Wirkungsgraden an Bedeutung verloren hat. Die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben ist mit Hilfe der geschilderten Emissionsminderungstechnologien ohne Schwierigkeiten möglich. Dies gilt auch für die Erfüllung der – in der TA Schall – vorgeschriebenen Geräuschmmissionsgrenzwerte. Der richtige Einsatz geeigneter Dämmmaßnahmen wird jedoch bei vielen BHKW-

Planungen nur unzureichend berücksichtigt. Festzuhalten bleibt jedoch, daß durch Installation der aus umweltpolitischer Sicht gerechtfertigten Minderungsmaßnahmen erhebliche zusätzliche Investitionen getätigt werden müssen. Dies hat auch Konsequenzen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage.

Zukünftige BHKW-Technologien

Durch die im Dezember 1996 begonnene Serienproduktion von **Mini-Blockheizkraftwerken** mit einer elektrischen Leistung von 5,5 kW_{el} (Bild 2) kann ein großes zusätzliches Einsatzpotential für BHKW-Anlagen wirtschaftlich erschlossen werden. Diese Heizkraftanlagen sind insbesondere für Wohnanlagen ab einem jährlichen Wärmeverbrauch von 75 MWh, Hotels sowie öffentliche Gebäude (Hallenbäder, Altenheime, kleinere Kliniken, Sporthallen, Kindergärten) geeignet. Im ersten Jahr der Serienproduktion wurden rund 800 Module verkauft. Mittelfristig soll der Absatz auf 5000 Einheiten pro Jahr gesteigert werden. Auch die **Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung** kann zu einem verstärkten BHKW-Einsatz führen, da in diesem Fall auch im Sommer die Wärme der Blockheizkraftwerke für den Antrieb einer Absorptionskältemaschine genutzt und die Nutzungsdauer der Anlagen erheblich verbessert wird. Aufgrund der FCKW-/Halonverbotsverordnung aus dem



(Foto: SenerTec, Schweinfurt)

Bild 2 Sager Heiz-Kraft-Anlage

Jahre 1991, die einen stufenweisen Ausstieg aus FCKW-Produktion und -Verbrauch bis zum Jahre 2030 vorsieht, erscheint in den nächsten Jahren eine verstärkte Installation von wärmegetriebenen Kälteanlagen realistisch. Eine im Rahmen dieser Studie [1] durchgeführte Expertenbefragung kommt zu dem Ergebnis, daß der Anteil aller in Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung befindlichen stationären Verbrennungsmotoren von 1,7 % (1995) auf 6,2 % (2005) steigen wird.

Eine Option für die Zukunft stellen **Stirlingmotoren** und **Brennstoffzellen** dar. Ein großer Vorteil des Stirlingmotors liegt in der Unabhängigkeit der Wärmezufuhr. Dadurch kann das durch die BHKW-Technik

Stundenauslastung und kompletter Eigenstromnutzung. Um dies zu erreichen, bedarf es geeigneter Planungshilfsmittel. Basis der BHKW-Planung bildet die Tagesganglinie des Strom- und Wärmeleistungsbedarfs so-

meiden, schreibt diese Richtlinie neben der Erstellung von Tagesganglinien auch die Berücksichtigung zukünftiger energiewirtschaftlicher Änderungen, wie z. B. den Einsatz rationeller Energietechniken, im Umfeld der Anlage vor. Ein weiteres Hilfsmittel stellt die von der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) erarbeitete „BHKW-Checkliste“ [3] dar.

Typ		Betriebs-temperatur	Elektrolyt	elektrischer Wirkungsgrad	Entwicklungs-stand
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell	80 °C	Festpolymer	60 %	in Entwicklung
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	200 °C	Phosphorsäure	36-46 %	kommerziell verfügbar
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	650 °C	Lithium- und Kaliumkarbonat	48-56 %	in Entwicklung
SOFC	Solid Oxid Fuel Cell	1000 °C	Zirkonoxid, Yttrium dotiert	55-65 %	in Entwicklung

Tabelle 2 Übersicht über Brennstoffzellen-Technologien

bislang ungenutzte Potential der Feststoffverbrennung von Biomasse und Abfällen erschlossen werden. Wird eine kontinuierliche Gasfeuerung als Wärmequelle eingesetzt, können Abgaswerte kleiner $1/10$ TA-Luft erreicht werden. Schwierigkeiten bestehen in einer kostengünstigen Serienfertigung, welche sich aufgrund der extrem hohen Anforderungen an die Hochtemperaturbeständigkeit von Wärmetauscher und Regenerator sowie an die Dichtheit des Arbeitsvolumens bei einem Druck von 150–190 bar nur schwer realisieren läßt. Prototypen von Stirlingmotoren erreichen elektrische Wirkungsgrade von mehr als 40 %. Bei den Brennstoffzellen liegen die Vorteile in den höheren elektrischen Wirkungsgraden, den – gegenüber den konventionellen BHKW-Anlagen – noch geringeren Emissionen (siehe Bild 3) und dem lautlosen Betrieb. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die gegenwärtigen Brennstoffzellen-Technologien. In Deutschland befinden sich derzeit sechs PAFC-Anlagen mit einer Gesamtleistung von rund 1,1 MW_{el} in Betrieb. Zur Zeit sind die spezifischen Investitionen noch deutlich über den Aufwendungen für eine Motor- oder Gasturbinenanlage anzusiedeln. Ob durch einen verstärkten zukünftigen Brennstoffzeleinsatz neue BHKW-Anwendungsfelder geschaffen werden oder ob dies lediglich zu einer Substitution der vorhandenen konventionellen BHKW-Anlagen führt, ist bei den Experten sehr umstritten.

Planung von Blockheizkraftwerken

Wichtig bei einer Objektversorgung ist nicht die maximale Stromausbeute, sondern größtmögliche Wärmeabdeckung bei hoher

wie die thermische Jahresdauerlinie. Besonders wichtig ist dabei die Erhebung und Auswertung der Tagesganglinien, um dadurch den gleichzeitigen Strom- und Wärmebedarf abschätzen zu können. Während im industriellen Bereich die hierfür erforderlichen Daten meistens vorliegen, müssen diese im kommunalen/gewerblichen Bereich sehr häufig noch aufgenommen werden. Dabei wird eine zwei- bis dreiwöchige Aufnahmedauer als ausreichend angesehen. Als Faustwert gilt eine Auslegung in Höhe von 30 % der Spitzenwärmeleistung. Mit dieser Auslegung können durch das BHKW je nach Gebäude 60 % bis 80 % des

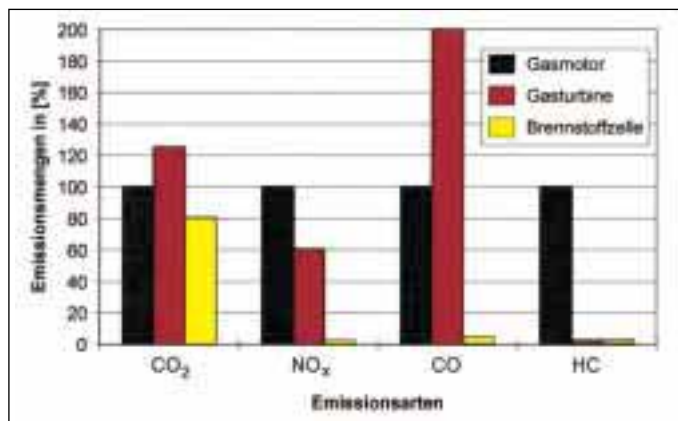


Bild 3 Emissionsmengenvergleich einiger BHKW-Technologien

Jahreswärmebedarfs gedeckt werden. Heute stehen zahlreiche computerunterstützte Planungshilfen wie z. B. Simulationen für die BHKW-Anlagen-Projektierung zur Verfügung. Um die Planung einer BHKW-Anlage zu vereinfachen, wurde die VDI-Richtlinie 3985 „Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplung mit Verbrennungskraftmaschinen“ [2] erarbeitet, in der die Erkenntnisse und Erfahrungen aus den bisherigen BHKW-Planungen festgehalten und formalisiert wurden. Um Fehlentscheidungen zu ver-

Kommunale BHKW-Potentiale

Im **kommunalen Bereich** wird aufgrund der besseren Wärmedämmung und der stärkeren Nutzung solarthermischer Anlagen mit einer 15 %igen Abnahme des Raumwärmebedarfs und einer 10 %igen Strombedarfszunahme für das Jahr 2010 in bezug auf das Jahr 1995 ausgegangen. Im folgenden werden die BHKW-Potentiale im kommunalen Bereich erläutert (siehe auch Tabelle 3), wobei generell angemerkt werden muß, daß für die Potentialabschätzung eine – insbesondere mittelfristig einsetzende – sukzessive Verbesserung der in Bild 4 dargestellten Rahmenbedingungen angenommen wird. Das größte Potential des kommunalen Bereichs liegt in der **Nahwärmeversorgung der Wohn- und Gewerbegebiete**. Dabei wird von einer 15 %igen Wohnflächenzunahme bis zum Jahre 2010 ausgegangen. Aufgrund der prognostizierten 30 bis 40 %igen Kostendegression

beim Nahwärmeausbau erscheint ein Potential von 26 250 GWh_{el} bei einer Nutzungsdauer von 5000 Jahresstunden technisch-wirtschaftlich realisierbar. Dies entspricht einer installierten Leistung von 5250 MW_{el}. Insbesondere Neubaugebiete eignen sich für den Nahwärmeausbau. Hier kann die beschriebene Kostendegression durch Nutzung neuer Ver-

legungstechniken besonders einfach erreicht werden. In bereits fertiggestellten Wohngebieten kann durch Verlegung der Wärmeleitungen in Gebäudekellern durch Wegfall der Aufwendungen für den Tiefbau eine Kostenersparnis von bis zu 50 % er-

	Gesamtpotential [MW _{el}]	Jahresnutzungsdauer [h]	Stromerzeugung [GWh _{el} /a]	Installierte Leistung [MW _{el}]
Nahwärmenetze	5250	5000	26250	k. A.
Wohnungen	100	4500	450	k. A.
Bürogebäude	217	4500	977	k. A.
Altenheime	150	4500	675	k. A.
Behindertenheime	35	4500	158	k. A.
Kirchenverbund	15	4500	68	k. A.
Schulen	106	4500	477	k. A.
Krankenhäuser	650	6000	3900	195
Justizvollzugsanstalten	5	4500	23	k. A.
Freizeitsportanlagen	20	6000	120	k. A.
Hallen-/Freibäder	180	5500	990	118
Flughafen	40	5800	232	16,7
Gasübernahmestationen	55	5500	303	3
Gewächshäuser	40	5000	200	20
Holzgas	35	6000	210	0,3
Biogas	75	4600	345	7
Klärgas	132	7000	924	100
Deponiegas	220	5000	1100	120
Pyrolysegas	50	6800	340	0
kommunales Gesamtpotential	7375		37742	2035

Tabelle 3 Kommunales BHKW-Potential

reicht werden. Werden mehrere Objekte über ein Nahwärmenetz zusammengeschlossen, so ist die Höchstlast am Netzeinspeisepunkt geringer als die Summe der Höchstlasten der einzelnen Verbraucher. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt, der durch den sogenannten Gleichzeitigkeitsfaktor beschrieben wird, beim Zusammenschluß verschiedenartiger Versorgungsobjekte. Gegenüber individuellen Anlagen ist die insgesamt zu installierende Wärmeleistung bedeutend geringer. Unter Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors kann ein Nahwärmeverbund von Objekten, die jeweils für sich ungünstige Jahresdauerlinien aufweisen, durchaus für die Installation von KWK-Anlagen interessant werden.

Dagegen sind Ein- oder Zweifamilienhäuser sowohl für die Einzelobjektversorgung mittels Kleinst-BHKW als auch für die Nahwärmeversorgung ungeeignet. 1994 wurden lediglich 1,3 % aller Ein- bzw. Zweifamilienhäuser durch Fern- bzw. Nahwärme versorgt. Kritisch zu hinterfragen sind in diesem Zusammenhang die Bemühungen einiger BHKW-Hersteller, Verbrennungsmotoren zu entwickeln, deren elektrische Leistung deutlich unter der Leistung bisheriger Mini-BHKW-Anlagen anzusiedeln ist. Der Markt für solche Anlagen wird aus wirtschaftlichen Gründen eher bescheiden ausfallen. Beachtet werden muß auch, daß aufgrund der Wärmeschutzverordnung insbesondere in Neubauten ein geringerer Teil des bisherigen Wärmebedarfs benötigt wird. Dies hat im allgemeinen nur

geringe Auswirkungen auf die Benutzungsdauer der (reduzierten) Höchstlast: Der Raumwärmebedarf konzentriert sich zwar zunehmend auf die kalten Wintermonate, dafür nimmt aber der Anteil des Warmwassers, also der Grundlastanteil, am gesamten Wärmebedarf zu. Dadurch wird das Wärme-/Stromverhältnis für eine BHKW-Nutzung verbessert und der Anteil selbstgenutzten Stroms erhöht.

Die übrigen Potentiale im **Wohn- bzw. Bürobereich** wurden unter Berücksichtigung neuer statistischer Daten anhand einer DLR-Studie über das wirtschaftliche und ausschöpfbare KWK-Potential in Baden-Württemberg [4] auf das Bundesgebiet angepaßt. Dabei ergibt sich ein Potential von rund 450 GWh_{el} durch den Einsatz von ca. 15 000 Kleinst-BHKW für

die Versorgung von Mehrfamilienhäusern und Bürogebäuden außerhalb von Nahwärmenetzen. Dieser Wert erscheint vor allem unter dem Gesichtspunkt realistisch, daß infolge der neuen Bundesimmissionsschutzverordnung viele Heizungsanlagen nicht mehr die gesetzlichen Bestimmungen erfüllen. So müssen nach Angaben des baden-württembergischen Landesinnungsverbandes des Schornsteinfegerhandwerkes bis zum Jahre 2004 rund 25 % der bestehenden Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg ausgetauscht werden.

Weiterhin sind in **Bürogebäuden** unter Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung rund 1080 GWh_{el} durch einmodulige größere BHKW-Anlagen wirtschaftlich erzeugbar. Diese Strommenge wird durch Diesel- und Gasmotoren bereitgestellt.

Aufgrund der demographischen Entwicklung wird bei Altenheimen mit einer Zuwachsrate von mindestens 15 % bis zum Jahre 2010 in bezug auf den Stand vom 30. 6. 1995 ausgegangen. Damals gab es 8188 Altenheime. Auf der Grundlage einer Analyse der bestehenden **Altenheime** ergibt sich ein BHKW-Potential in Höhe von 150 MW_{el} im Bereich der Einzelobjektversorgung. Ein Großteil der übrigen Heime eignet sich für einen Nahwärmeverbund. Rund 20 % der 2733 **Behindertenheime** sind von der Größenstruktur ebenfalls für einen BHKW-Einsatz geeignet. Dadurch



Bild 4 Rahmenbedingungen für einen BHKW-Einsatz in Deutschland

könnten rund 310 GWh_{th} und 158 GWh_{el} selbst bereitgestellt werden.

Die bundesweit bestehenden 46 623 **Kindertageseinrichtungen** sind für eine BHKW-Einzelobjektversorgung nur in Ausnahmefällen geeignet. Diese Objekte sind vor allem für eine Nah- bzw. Fernwärmeversorgung interessant. Bei kirchlicher Trägerschaft ist in rund 40 % der Fälle die Möglichkeit eines Verbundes zwischen dem auf demselben Grundstück untergebrachten Kirchengebäude, Gemeinde-

zentrum und Kindergarten gegeben. Dadurch könnten in Deutschland rund 3400 mit einem Klein-BHKW betriebene Verbundnetze geschaffen werden. Dies entspricht einer installierten BHKW-Leistung von ungefähr 15 MW_{el} und einem Strombereitstellungspotential von annähernd 68 GWh_{el}.

Schulen sind für eine BHKW-Einzelobjektversorgung aufgrund der Nichtnutzung in den Ferienzeiten und den Wochenenden nur bedingt geeignet. Voraussetzung hierfür ist eine Größe von mindestens 500 Schülern, eine vorhandene Sporthalle und eine Nutzung der Räumlichkeiten am Abend durch andere Veranstaltungen. Aufgrund der Klassenstrukturen wird die erforderliche Größe insbesondere von Berufsschulen und Gymnasien erreicht. Unter der Annahme, daß 1/8 dieser Objekte mit einem BHKW ausgerüstet wird, beträgt die installierbare Leistung rund 105 MW_{el}.

Seit 1996 sind die **Krankenhäuser** in den alten Bundesländern durch § 18b Krankenhausfinanzierungsgesetz (KHG) zur Entlastung der Betriebskosten angehalten, die sich u. a. im Energiesektor realisieren lassen. In den neuen Bundesländern tritt dieser Paragraph wegen der dort geplanten Investitionsprogramme erst im Jahre 2005 in Kraft. Zusammen mit dem ab 1998 vorgesehenen Leistungsvergleich der Krankenhäuser sowie der Beachtung des Grundsatzes der Beitragsstabilität werden im Krankenhausbereich Anreize für Rationalisierungsmaßnahmen im Energiesektor geschaffen. Jedoch muß angemerkt werden, daß durch diese Gesetze das Prinzip der dualen Finanzierung und die damit bestehenden Hemmnisse lediglich „aufgeweicht“, aber nicht beseitigt wurden. Sowohl Krankenhäuser als auch Rehabilitationseinrichtungen sind aufgrund des hohen, ganzjährig anfallenden Wärme- und Strombedarfs für eine BHKW-Objektversorgung besonders geeignet. Im Jahre 1995 gab es in Deutschland insgesamt 2325 Krankenhäuser und 1373 Vorsorge- und Rehabilitationseinrichtungen. Nach Abzug der zukünftig über Fernwärmenetze versorgten Anlagen und unter Berücksichtigung einer aufgrund des neuen Gesundheitsgesetzes insbesondere bei den Rehabilitationseinrichtungen sinkenden Belegungszahl ergibt sich eine mögliche BHKW-Leistung von annähernd 650 MW_{el}. Derzeit sind rund 200 MW_{el} installiert.

Das Potential der rund 122 größeren **Justizvollzugsanstalten (JVA)** fällt mit 5 MW_{el} eher gering aus. Zur Wirtschaftlichkeit dieser BHKW-Anlagen trägt die Tatsache bei, daß die Motoren die vorgeschriebene Anwesenheit eines Notstromaggregats übernehmen können. Nach der VDE 107/108 mußten bisher die jeweiligen Module als Diesel- oder Diesel-Gasmotoren ausgeführt werden. Aufgrund der hohen Zuverlässigkeit der Gasversorgung werden heute auch Notstromaggregate mit reiner Gasversorgung genehmigt. In diffizilen Bereichen, wie z. B. Krankenhäusern, stehen dieser Doppelnutzung von BHKW-Anlagen in



(Foto: Jenbacher Energiesysteme)

Bild 5 Flughafen Leipzig: BHKW-Leistung großer Dimensionierung

Deutschland einige gesetzliche Auflagen entgegen. Hier sei insbesondere auf die Bestimmung verwiesen, daß die Aggregate innerhalb von 15 Sekunden die Stromversorgung übernehmen müssen. Dies ist speziell mit größeren BHKW-Anlagen nicht realisierbar.

Freizeitsportanlagen, wie z. B. Fitneßclubs oder Squash-Center, weisen wie Schwimmbäder das ganze Jahr über einen gleichmäßigen Warmwasserbedarf auf und sind aufgrund dieser Wärmegrundlast für einen BHKW-Einsatz gut geeignet. Das Potential beträgt in diesem Bereich rund 120 GWh_{el} bei einer Nutzungsdauer von 6000 Jahrestunden.

Rund 4500 **Hallenbäder** und 3450 **Freibäder** gibt es derzeit in Deutschland, wobei die Tendenz eher fallend ist. Von den Freibädern sind ca. 70 % mit einer Wassererwärmungsanlage ausgestattet. Hierfür eignen sich besonders solarthermische Anlagen. In einigen Fällen kann auch ein mobiles BHKW zum Einsatz kommen, welches im Winter ein Verwaltungsgebäude beheizt. Bei Hallen- und Kombibädern ist unter Berücksichtigung eines verstärkten

Einsatzes rationaler Energietechniken mit einem BHKW-Potential von rund 990 GWh_{el} zu rechnen.

Passagierflughäfen kommen aufgrund ihres ganzjährigen Strom- und Wärmebedarfs besonders für einen BHKW-Einsatz in Betracht. Dies gilt vor allem dann, wenn zur Klimatisierung der Flughafen terminals Absorptionskälteanlagen genutzt und die gelandeten Flugzeuge über Bodenklima (PCA)-Anlagen versorgt werden. Derzeit sind 60 % der Großflughäfen mit Absorptionskälte- und rund 13 % mit PCA-Anlagen ausgerüstet. Auf vier der fünfzehn größten deutschen Passagierflughäfen sind 18 MW_{el} BHKW-Leistung installiert (siehe Bild 5). Aufgrund einer Analyse der Energiedaten der größten deutschen Flughäfen wird bis zum Jahr 2010 eine BHKW-Gesamtleistung von 40 MW_{el} bei einer prognostizierten durchschnittlichen Jahresnutzungsdauer von 5800 Stunden erwartet. Grundsätzlich werden die Anlagen mehrmodulig ausgeführt, wobei einige Aggregate dauerhaft in Betrieb sind, um die Notstrom- und Schnellbereitschaftsversorgung für die Flugfeldbeleuchtung sicherzustellen.

In **Gasübernahmestationen** erfolgt eine Entspannung des Erdgases. Durch den Drosselvorgang sinkt aufgrund des Joule-Thomson-Effekts die Gastemperatur um 0,4 bis 0,5 Kelvin pro bar Druckentspannung. Zur Vermeidung von Vereisung und Kondensatbildung muß das Gas vor der Drosselung vorgewärmt werden. Derzeit werden 20 % der Gasübernahmestationen mit der Abwärme eines Blockheizkraftwerks und maximal 15 % mit Fernwärme beheizt. Unter der Prämisse, daß überall dort, wo **Gasentspannungsanlagen** wirtschaftlich eingesetzt werden, sich auch der BHKW-Einsatz lohnt, ist eine installierte Leistung von 55 MW_{el} prognostizierbar.

In Deutschland sind derzeit rund 20 MW_{el} BHKW-Leistung in **Gewächshäusern** installiert. Durch die Möglichkeit der zusätzlichen Nutzung der BHKW-Abgase zur CO₂-Pflanzendüngung erscheint zumindest eine Potentialverdopplung möglich.

Ein weiteres Betätigungsfeld für BHKW-Anlagen bietet die **Bio-, Deponie-, Holz-, Klär- und Pyrolysegasverwertung** in stationären Verbrennungsmotoren. Die hierfür prognostizierte BHKW-Gesamtleistung beträgt ca. 510 MW_{el}.

Das größte Zubaupotential wird dabei im Deponie- und Biogasbereich erwartet. Die bei den biogenen Gasen eingesetzten Motoren werden aufgrund der schwankenden Gaszusammensetzung und der teilweise schädlichen Gaskomponenten sehr stark belastet. Außerdem wird ein Katalysatoreinsatz durch die im Gas enthaltenen Katalysatorgifte, wie z. B. Fluor oder Chlor, stark eingeschränkt. Häufig ist eine Gasreinigung unabdingbar. Weiterhin wird für das Jahr 2010 ein jährliches Strombereitstellungspotential von rund 160 GWh_{el} durch pflanzenölbetriebene Motoren erwartet. Dabei wird vor allem die Verwendung von Pflanzenölmethylester in leicht modifizierten Dieselmotoren zu diesem Potential beitragen. Die Wirtschaftlichkeit von Spezialmotoren, die

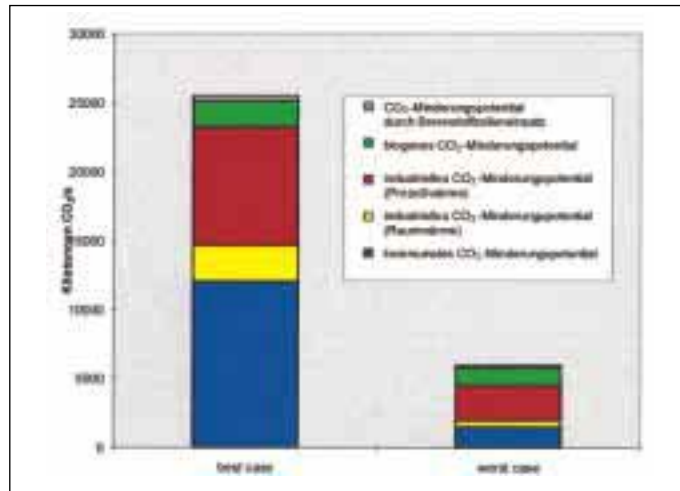


Bild 6 Durch BHKW-Ausbau erreichbares CO₂-Minderungspotential

originäres Pflanzenöl verbrennen, kann nur bei einer hohen Jahresnutzungsdauer gewährleistet werden. Durch die Nutzung von Altölen – aus Gastronomie, Lebensmittelindustrie und Privathaushalten – als biogene Treibstoffe kann die Wirtschaftlichkeit pflanzenölbetriebener Motoren verbessert werden. Um die für das Jahr 2010 vorausgesagte kommunale BHKW-Leistung von 7375 MW_{el} ausschöpfen zu können, muß

dem bestehenden Informationsdefizit bezüglich der BHKW-Nutzungsmöglichkeiten in den deutschen Architektur- und Planungsbüros durch die Gründung weiterer Energieagenturen begegnet werden. Bei dem zuvor genannten Potential bleibt die Fernwärme unberücksichtigt. Hier erwarten die Experten eine Verdichtung bestehender Netze. Durch den Einsatz von Erzeugeranlagen mit höheren Strom-

kennzahlen und die forcierte Umwandlung von Heizwerken zu Heizkraftwerken wird auch in der Fernwärmeversorgung ein großes Einsatzfeld für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen geschaffen. Positiv auf das BHKW-Potential wird sich auch auswirken, daß in Deutschland mittelfristig mehr als 50 % der Projekte über Drittfinanzierungskonzepte wie das Modell der Projektfinanzierung oder des Contractings finanziert werden.

Die in der Diskussion befindlichen Änderungen des politischen Ordnungsrahmens mit Wegfall des Gebietsschutzes und Zwangsdurchleitung zugunsten Dritter wird die Chance auf einen weiteren Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung reduzieren. Aufgrund der unsicheren Absatzpotentiale und des größeren Wettbewerbs könnten viele BHKW-Betreiber Probleme bekommen. Eine Energienovelle, wie sie zur Zeit von der Bundesregierung geplant wird, würde bei gleichbleibendem Gaspreis das Strompreisniveau insbesondere im industriellen Bereich kräftig senken und dadurch einen KWK-Einsatz unwirtschaftlich machen. Durch eine Vorrangregelung für Blockheizkraftwerke könnte dieses Manko verhindert werden.

Industrielles BHKW-Potential

Ein großes Einsatzpotential für die gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung durch Motoren- und Gasturbinenanlagen stellt die Industrie dar. Das industrielle BHKW-Potential beläuft sich insgesamt auf 29,3 TWh_{el} mit einer installierten BHKW-Leistung von annähernd 6400 MW_{el} (siehe

	Gesamtpotential [MW _{el}]	VBNS [h]	Gas-turbinen [MW _{el}]	Motor [MW _{el}]	Stromerz. [GWh _{el} /a]	Installierte Leistung [MW _{el}]
Brauereindustrie	125	4500	-	125	563	20
Genußmittelgewerbe	22	7500	-	22	165	7
	18	4500	-	18	81	8
Zuckerindustrie	42	4000	42	-	168	11,5
Ölmühlen	6	5500	6	-	33	2
übrige Ernährungsmittelgewerbe	121	4500	21	100	545	k. A.
	8	5000	-	8	40	k. A.
Chemische Industrie	1750	5500	1750	-	9625	675
Zellstoff- und Papierindustrie	810	6500	810	-	5265	370
Textilindustrie	172	3500	165	7	602	k. A.
übrige Verbrauchsgüterindustrie	63	3000	60	3	189	k. A.
Mineralölverarbeitende Industrie	168	6800	150	18	1142	k. A.
Bergbau	22	5500	22	-	121	22
Industrie der Steine und Erden	82	7500	50	32	615	k. A.
	22	6500	4	18	143	k. A.
Gummi- und Kunststoffverarb.	177	3000	57	120	531	k. A.
EST-Gießereien	33	3000 bis 3500	-	33	115	k. A.
Ziehereien, Kaltwalzwerke	20		-	20	70	k. A.
NE-Metalle-Gießereien	87		-	87	305	k. A.
Maschinenbau	694		100	594	2360	k. A.
Fahrzeugbau	579		229	350	1898	k. A.
Elektrotechnik, Feinmechanik	646		46	600	2234	k. A.
EBM-Waren-Industrie	508		58	450	1739	k. A.
übrige Investitionsgüterindustrie	130		20	110	441	k. A.
Glas- und Feinkeramik	76		-	76	266	k. A.
Gesamt	6381			3590	2791	29256

Tabelle 4 Industrielles BHKW-Potential

	BHKW	Vergleichszenario	
	Wärme- und Strombereitstellung	Wärmebereitstellung	Strombereitstellung
best case	<ul style="list-style-type: none"> Gas-Motor in der Kommune $\eta_{ges} = 85\%$ $\eta_{el} = 31,5\%$ Diesel-Motor $\eta_{ges} = 90\%$ $\eta_{el} = 37\%$ Gas-Motor in der Industrie $\eta_{ges} = 86\%$ $\eta_{el} = 34\%$ 	durch Öl- / Gasheizungen im Verhältnis 50/50 sowie der aus der Strombereitstellung resultierenden KWK-Wärme 46,3 % Ölheizung ¹ 46,3 % Gasheizung ² 7,4 % KWK-Wärme ³	derzeitiges Kraftwerkmix mit einem spezifischen CO ₂ -Emissionsfaktor von 0,58 kg je kWh _{el}
worst case	<ul style="list-style-type: none"> siehe Referenzsystem 1 	Brennwertkessel (Gas) $\eta = 101\%$ bezogen auf H _u	GuD-Kraftwerk $\eta_{el} = 57\%$

¹ spezifischer CO₂-Emissionsfaktor für leichtes Heizöl: 0,265 kg/kWh
² spezifischer CO₂-Emissionsfaktor für Gas: 0,201 kg/kWh
³ CO₂-Emission bereits im Wert für die Strombereitstellung enthalten

Tabelle 5 Vergleichszenarien zur Ermittlung der CO₂-Minderung im Raumwärmebereich

Tabelle 4). Mit 57 % wird der größte Teil der installierten Leistung durch Gasturbinenanlagen bereitgestellt. Beispielhaft werden im folgenden drei Industriebranchen näher erläutert.

Wegen des gleichzeitigen Wärme-, Kälte und Strombedarfs sind **Brauereien** für einen BHKW-Einsatz prädestiniert. In den 1278 deutschen Brauereien können rund 125 MW_{el} Leistung installiert werden.

Der leicht steigende Strombedarf bei gleichzeitig fallendem Wärmebedarf erhöht die verbrauchsseitige Stromkennzahl in der **Chemischen Industrie** so stark, daß der Anteil an selbsterzeugtem Strom nur durch eine verstärkte Anwendung der Gasturbinentechnologie gehalten werden kann. Dadurch wird in der Chemischen Industrie das mit 1750 MW_{el} größte industrielle BHKW-Potential erwartet, wobei dieses zu 97 % durch Ersetzung der vorhandenen Dampfkraftwerke erfolgt.

Ähnliche Entwicklungstendenzen sind in der **Papierindustrie**, einem Industriebereich mit traditionell starkem KWK-Einsatz, festzustellen. Bei einer zu erwartenden 50 %igen Deckung der KWK-Leistung durch Gasturbinen bedeutet dies ein BHKW-Gesamtpotential von 5300 GW_{el}. Als entscheidendes Kriterium für die Wirtschaftlichkeit stellt sich dabei der Strom- und Brennstoffpreis dar. Gegenwärtig wird die Stromvergütung primär über die neue Verbändevereinbarung abgerechnet. Ein anderer Ansatz zur Bewertung des erzeugten BHKW-Stromes stellt der von der Förder-

gemeinschaft Blockheizkraftwerke (FG-BHKW) geforderte City-Gate-Preisansatz dar. Mit der City-Gate Regelung würde der Vergütungspreis mit 13–14 Pfennig/kWh_{el} knapp zwei Pfennig über dem maximal erzielbaren Preis der Verbändevereinbarung liegen. Untersuchungen in Baden-Württemberg haben ergeben, daß sich bei der Anhebung der Vergütung von dem Niveau der ehemaligen Verbändevereinbarung auf das City-Gate-Preisniveau das Potential von wirtschaftlichen Blockheizkraftwerken verdoppeln würde.

Erreichbare CO₂-Minderung

Die Abschätzung der – durch den geschilderten Ausbau der BHKW-Anlagen erreichbaren – CO₂-Minderung wird in [1] durch einen Vergleich mit zwei Referenz-

reich ein Vergleich mit der momentan bestehenden Heizungsstruktur in Deutschland. Das „worst-case“-Szenario vergleicht die BHKW-Einspeisung wärmeseitig mit Erdgasbrennwertkesseln und stromseitig mit der GuD-Kraftwerkstechnik (siehe Tabelle 5). In der Industrie wird die gekoppelte Strom-/Wärmebereitstellung durch BHKW-Anlagen im besten Fall mit dem derzeitigen Kraftwerkmix bzw. dem gegenwärtigen Prozeßwärmemix verglichen. Im „worst case“-Szenario werden der in [1] prognostizierte zukünftige Prozeßwärmemix und die stromseitigen Emissionen eines GuD-Kraftwerkes als Vergleichsgrundlage zu Rate gezogen. Verglichen mit diesen Referenzsystemen, kann mit dem ermittelten BHKW-Potential von 67 TWh_{el}/a der jährliche CO₂-Ausstoß um 5,8 Mio. bis 25,1 Mio. Tonnen verringert werden (siehe Tabelle 6/Bild 6). Dies verdeutlicht, daß der BHKW-Einsatz einen Beitrag im Rahmen einer konsistenten CO₂-Minderungsstrategie in Deutschland erbringen kann. □

Literatur

- [1] Markus Gailfuß: CO₂-Minderungspotential durch Ausbau der Blockheizkraftwerke in Deutschland, Peter Lang Verlag, Frankfurt am Main 1998
 [2] VDI 3985: Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplung mit Verbrennungskraftmaschinen. Beuth Verlag Berlin, September 1996
 [3] ASUE (Hrsg.): BHKW-Checkliste – Orientierungshilfe zur Auslegung und Wirtschaftlichkeit. Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Hamburg 1996
 [4] Nitsch J.: Wirtschaftliches und ausschöpfbares Potential der Kraft-Wärme-Kopplung in Baden-Württemberg. Untersuchung im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrttechnik e.V., Juni 1994

	prognostizierte installierte Leistung	prognostizierte Strommenge	installierte Leistung ¹	result. CO ₂ -Minderung im besten Fall ²	result. CO ₂ -Minderung im ungünstigsten Fall ²
Industrie - Prozeßwärme	4,2 GW _{el}	21,5 TWh _{el}	2,6 GW _{el}	8578,0	2554,0
Industrie - Raumwärme	2,2 GW _{el}	7,8 TWh _{el}		2607,1	477,9
Kommune	6,9 GW _{el}	34,8 TWh _{el}	2,0 GW _{el}	12044,7	1505,5
biogen betriebene BHKW	0,5 GW _{el}	2,9 TWh _{el}		1873,1	1250,0
Brennstoffzelle und Energiespeicher				95,6	40,1
Summe	13,8 GW_{el}	67,0 TWh_{el}	4,6 GW_{el}	25198,5	5827,5

¹ Die angegebenen Werte beziehen sich auf das Jahr 1995 und stammen von der Fördergemeinschaft-Blockheizkraftwerke (FG-BHKW)
² in Kilotonnen CO₂ pro Jahr

Tabelle 6 Übersicht über BHKW-Potentiale und die daraus resultierende CO₂-Minderung

systemen vorgenommen. Das erste Vergleichsszenario stellt dabei für die BHKW das „best-case“-Szenario dar. Hierbei wird stromseitig mit den CO₂-Emissionen des derzeitigen Kraftwerkmix verglichen. Wärmeseitig erfolgt im kommunalen Be-