



**Klimaschutz
durch effiziente Energienutzung
Einsatzmöglichkeiten
der Mikrogasturbine in
Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen**

Ergebnisbericht



Impressum

Augsburg, 2007

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg
Tel.: (0821) 90 71 - 0
Fax: (0821) 90 71 - 55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Auftraggeber : Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz

Durchführung : Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und -technik (BIfA GmbH)
Am Mittleren Moos 46
86167 Augsburg
Tel.: (0821) 70 00 – 0
Fax : (0821) 70 00 – 1 00
E-Mail. marketing@bifa.de

Verfasser: René Peche
Dr. Dieter Tronecker
Prof.-Dr.-Ing. Wolfgang Rommel

Stand : Mai 2006

Zitiervorschlag:

Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.):

Klimaschutz durch effiziente Energienutzung – Einsatzmöglichkeiten der Mikrogasturbine in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen
Augsburg, 2007

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des
Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).



Dieses Projekt wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im Rahmen der EU-Strukturförderung für regionale Entwicklung (EFRE) finanziert.



Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG	1
1 EINFÜHRUNG.....	3
2 KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG.....	4
Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung.....	4
Einsatzmöglichkeiten	5
Technologiekonzepte.....	5
Anforderungen an Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen	7
Auslegung und Betriebsweise	8
Energieeffizienz / Umweltaspekte.....	8
Wirtschaftlichkeit kleiner Blockheizkraftwerksanlagen.....	11
Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung im Überblick.....	12
3 MIKROGASTURBINE	13
Prinzip.....	13
Anbieterübersicht.....	18
Technisch / wirtschaftliche Faktoren.....	20
Mögliche Anwendungsgebiete.....	24
Ausblick, Weiterentwicklung	28
4 MARKTCHANCEN UND -HEMMNISSE	32
Vorteile der Mikrogasturbine gegenüber Kolbenmotoren	32
Nachteile der Mikrogasturbine gegenüber Kolbenmotoren	34
Hemmnisse der Markteinführung.....	35
Contracting als eine Möglichkeit zur Überwindung der Hemmnisse.....	36
LITERATUR	39

Zusammenfassung

ZUSAMMENFASSUNG

Strom und Wärme werden in Deutschland zum überwiegenden Teil auf konventionellem Weg getrennt erzeugt. Dabei bleiben etwa 40 Prozent der eingesetzten Primärenergie ungenutzt. Durch die Kopplung der Strom- und Wärmeerzeugung (Kraft-Wärme-Kopplung) wird eine bessere Brennstoffausnutzung erreicht, indem die Abwärme aus der Stromerzeugung genutzt wird. Die Energieverluste reduzieren sich dadurch auf weniger als 20 Prozent. Die Kraft-Wärme-Kopplung weist demnach gegenüber der getrennten Strom- und Wärmeerzeugung eine höhere Energieeffizienz auf, was mit einer geringeren Umweltbelastung, insbesondere durch CO₂-Emissionen und Luftschadstoffe wie NO_x und CO, verbunden ist.

Der wichtigste Faktor für den wirtschaftlichen Betrieb von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen ist eine möglichst hohe Auslastung. Je länger eine Anlage im Jahr läuft, desto mehr verteilen sich die Investitions- und Betriebskosten auf größere Strom- und Wärmemengen. Dadurch sinken die Energieerzeugungskosten.

Kraft-Wärme-Kopplungs-Konzepte decken ein Leistungsspektrum von 1 kW bis hin zu mehreren 100 MW ab. Kleinere Anlagen, meist als Blockheizkraftwerk ausgeführt, basieren entweder auf dem klassischen Kolbenmotorprozess oder auf einer der neuen Technologien Mikrogasturbine, Brennstoffzelle oder Stirling-Motor.

Mikrogasturbinen sind kleine schnelllaufende Gasturbinen bis zu einer elektrischen Leistung von ca. 250 kW_{el}. Als Brennstoff wird hauptsächlich Erdgas, vereinzelt auch Heizöl, Diesel oder Propangas eingesetzt. Darüber hinaus werden seit mehreren Jahren Anstrengungen unternommen, Mikrogasturbinen auch für den Einsatz alternativer Brennstoffe wie Biogas oder Pflanzenöl umzurüsten.

Mikrogasturbinen können prinzipiell in allen Anwendungsfeldern der Kraft-Wärme-Kopplungs-Technik eingesetzt werden. Aufgrund der gasturbinenspezifischen Abwärmecharakteristik eignen sie sich aber vor allem dort, wo ein höheres Temperaturniveau bei der Wärmenutzung benötigt wird.

Neben den erweiterten Einsatzmöglichkeiten aufgrund der konstant anfallenden Abwärme auf hohem Temperaturniveau sind gegenüber konventionellen Kolbenmaschinen weitere Aspekte vorteilhaft. Mikrogasturbinen sind einfach und kompakt gebaut und weisen sehr niedrige Abgas-Emissionswerte auf. Kennzeichnend sind ein breites Lastspektrum und geringe elektrische Wirkungsgradverluste im Teillastbetrieb. Da nur rotierende Bewegungen auftreten und bei kleineren Anlagen Luftlager verwendet werden, ist der Verschleiß gering und der Verbrauch an Hilfsstoffen niedrig. Die Folge sind deutlich längere Wartungsintervalle, was mit niedrigen Wartungskosten verbunden ist.

Gegenüber Kolbenmaschinen bestehen aber auch Nachteile. Die spezifischen Investitionskosten sind höher und der elektrische Wirkungsgrad ist geringer, weshalb es hier für die Wirtschaftlichkeit besonders wichtig ist, eine hohe jährliche Stundenauslastung zu gewährleisten. Für den Betrieb ist ein gewisser Brenngasdruck notwendig, was in vielen Anwendungsfällen einen Gasverdichter erforderlich macht. Der Wirkungsgrad sinkt mit höheren Ansauglufttemperaturen, in größeren Leistungsbereichen ist ein schlechteres Teillastverhalten zu verzeichnen und die Leistung nimmt mit der Höhenlage des Aufstellungsortes ab.

Betreiber von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen sehen sich oft mit weiteren Hemmnissen konfrontiert. Neben fehlendem Know-how und komplexer Betriebsweise werden die gegebenen Finanzierungsmöglichkeiten bei hohen Investitionskosten und langer Kapitalbindung als

Zusammenfassung

Haupthemmnisse genannt. Weiterhin führt der verbesserte Wärmeschutz bei Gebäuden tendenziell zu kürzeren Heizperioden. Dadurch reduzieren sich die Volllastzeiten, was zu einer Verringerung der Rentabilität solcher Anlagen führen kann. Auch der vermehrte Einsatz moderner Kraftwerkstechnologien mit hohen elektrischen Wirkungsgraden, wodurch die Vorteile der KWK-Technologie schrumpfen, kann die breitere Markteinführung der Kraft-Wärme-Kopplung/Mikrogasturbine erschweren.

Eine in vielen Fällen praktizierte Möglichkeit zur Überwindung von Hemmnissen bei der Errichtung und Modernisierung von Energiegewinnungsanlagen ist das Contracting, bei dem ein externes Unternehmen die Finanzierung und gegebenenfalls auch den Betrieb der Anlage und die Energielieferung übernimmt.

In diesem Praxisbericht wurde mit der Mikrogasturbine eine interessante Technik aufgegriffen, die im praktischen Betrieb noch nicht weit verbreitet ist, jedoch in bestimmten Bereichen das Potenzial besitzt, zukünftig gerade in Kombination mit der Kraft-Wärme-Kopplung stärkere Bedeutung zu erlangen.

1 EINFÜHRUNG

Aus Gründen des **KLIMASCHUTZES** werden Maßnahmen zur Minderung von Treibhausgasen forciert. Der **KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG** kommt in diesem Zusammenhang besondere Bedeutung zu, weil die kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung sehr energieeffizient und damit umweltverträglich ist.

Im Bereich der dezentralen Strom- und Wärmeerzeugung stellen gasmotorisch betriebene Blockheizkraftwerke die derzeit meistgenutzte Technologie dar. Die relativ neue, innovative **MIKROGASTURBINEN**-Technologie gewinnt aber als ressourcenschonende und emissionsarme Technologie gegenüber den konventionellen Kolbenmaschinen an Bedeutung. Unter den gegebenen energiepolitischen Rahmenbedingungen kann diese Technologie gerade im kleineren und mittleren Leistungsbereich neue Einsatzpotenziale erschließen. Dies eröffnet dem Mittelstand sowie den Handwerksbetrieben Möglichkeiten, sich in innovativen Energiebereitstellungsverfahren einen Wettbewerbsvorteil zu erarbeiten.

Im vorliegenden **PRAXISBERICHT** wird im **ERSTEN ABSCHNITT** auf die Kraft-Wärme-Kopplung eingegangen. Neben dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung werden Einsatzmöglichkeiten und Technologiekonzepte vorgestellt sowie Aspekte zur **ENERGIEEFFIZIENZ**, **EMISSIONSVERHALTEN** und **WIRTSCHAFTLICHKEIT** kleiner Blockheizkraftwerke erörtert.

Im **ZWEITEN ABSCHNITT** wird die Energieerzeugung mit Mikrogasturbinen ausführlicher betrachtet. Nach Erläuterungen zum Aufbau, zur Funktion und Installation von Mikrogasturbinen werden technische Aspekte und Fragen der Wirtschaftlichkeit erörtert sowie Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt. So sind Mikrogasturbinen seit einigen Jahren schon erfolgreich in industriellen und kommunalen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen sowie in Kombination mit Absorptionskältemaschinen in Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlagen im Einsatz. Ein **AUSBLICK** auf die weitere technologische Entwicklung sowie mögliche **KOSTENREDUKTIONSPOTENZIALE** rundet die Ausführungen zur Mikrogasturbine ab.

Auch bei nachgewiesener Wirtschaftlichkeit sehen sich Nutzer bzw. Interessenten sowohl bei der Errichtung wie auch bei der Modernisierung von Anlagen zur Energieerzeugung oft mit einer Reihe von Hemmnissen konfrontiert. Diese werden im **DRITTEN ABSCHNITT** zusammen mit den Chancen für eine breitere Markteinführung der Mikrogasturbine in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen erörtert. Als eine Möglichkeit zur Überwindung der Hemmnisse, vor allem des Hauptproblems der Finanzierung, wird zum Abschluss das Contracting mit seinen Vorteilen und Grenzen sowie verschiedenen Modellen vorgestellt.

Kraft-Wärme-Kopplung

2 KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG

Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung

Strom wird in Deutschland zum überwiegenden Teil (ca. 90 %) immer noch auf konventionellem Weg erzeugt. Mit fossilen Brennstoffen oder Kernenergie wird Dampf produziert, der in großen Kraftwerken über eine Dampfturbine und einen Generator zur Stromerzeugung genutzt wird. Dieser Prozess ist mit hohen Verlusten verbunden. Neue hochmoderne Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke erreichen zwar elektrische Wirkungsgrade von fast 60 %, die größten Anteile des Stromes liefern aber Braun- und Steinkohle-Kraftwerke, bei denen moderne Anlagen elektrische Wirkungsgrade zwischen 40 % und 45 % erreichen. Das heißt, 100 % Primärenergie kann derzeit maximal zu 50 % bis 60 % in Strom umgewandelt werden. Die restliche Primärenergie entweicht meist ungenutzt als Abwärme in Flüsse oder in die Atmosphäre.

Bei der Erzeugung von Wärme ist der Anteil fossiler Brennstoffe noch größer (ca. 95 %). Zwar werden thermische Wirkungsgrade bis 90 % erreicht, jedoch bleibt auch hier die restliche Primärenergie ungenutzt.

Durch die Kopplung der Strom- und Wärmeerzeugung soll eine bessere Brennstoffausnutzung erreicht werden. In Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen wird die bei der Stromerzeugung anfallende Abwärme genutzt, um beispielsweise Räume oder Gebäude zu beheizen, Wasser zu erwärmen, Kälte zu erzeugen oder auch Dampf und Prozesswärme für Produktionsprozesse bereitzustellen. Das heißt, Kraft-Wärme-Kopplung nutzt die brennstoffeigene Energie zum Einen zur Stromerzeugung und zum Anderen zur Wärmeengewinnung. Je nach Größenordnung der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage werden dadurch Gesamtwirkungsgrade von 80 % bis zu über 90 % erreicht.

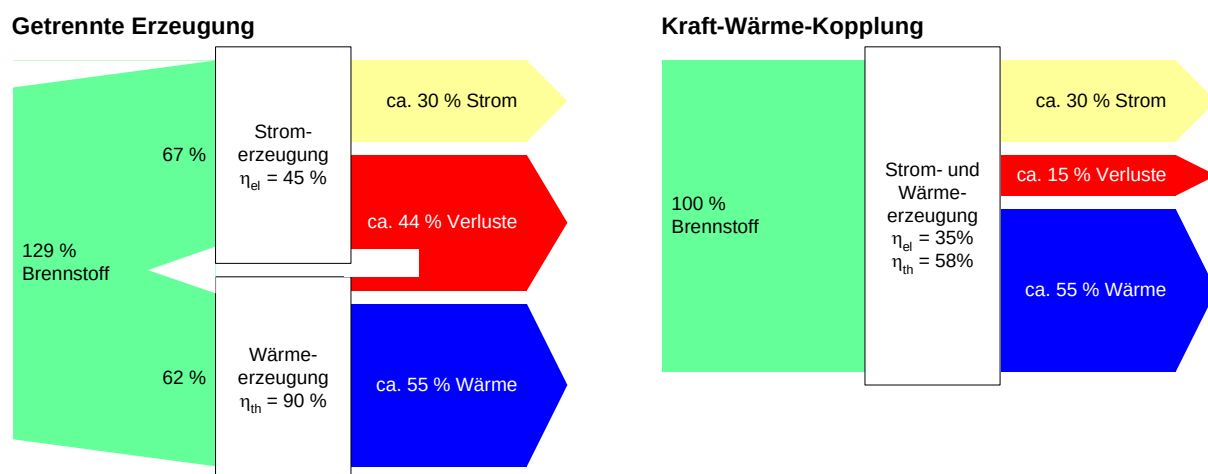


Abbildung 2.1: Vergleich der Wirkungsgrade von moderner, getrennter und gekoppelter Energieerzeugung bei der gleichen erzeugten Menge an elektrischer Energie und nutzbarer Wärme

Kraft-Wärme-Kopplung

Einsatzmöglichkeiten

Der Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung ist vor allem in den Fällen sinnvoll, in denen die erzeugte Wärme kontinuierlich benötigt wird:



Bild: Stadtwerke München

Abbildung 2.2: Heizkraftwerk Nord der Stadtwerke München mit elektrischer Leistung von 360 MW und Wärmeleistung von 900 MW

Heizkraftwerke

Versorgen Nah- und Fernwärmenetze oder große Industriegebiete.

Große Blockheizkraftwerke

Werden überwiegend für die Wärmeversorgung von Industrie- und Gewerbegebieten oder landwirtschaftlichen Betrieben bis hin zu Wohngebieten eingesetzt.



Bild: Köhler & Ziegler Anlagentechnik GmbH

Abbildung 2.3: Erdgas-BHKW in Uslar mit elektrischer Leistung von 140 kW und Wärmeleistung von 240 kW

Kleine Blockheizkraftwerke

Versorgen einzelne Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude (z.B. Schwimmhallen oder Krankenhäuser) sowie kleine bis mittlere Industrie- und Handwerksbetriebe mit der notwendigen Wärme.

Der erzeugte Strom wird vor Ort verbraucht oder in das öffentliche Stromnetz eingespeist.

Technologiekonzepte

Kraft-Wärme-Kopplungs-Konzepte decken ein Leistungsspektrum von 1 kW bis hin zu mehreren 100 MW ab. Große Anlagen, sogenannte Heizkraftwerke, arbeiten nach dem Dampfturbinenprozess, dem Gasturbinenprozess oder einer Kombination aus beiden Prozessen. Kleinere Anlagen, meist als Blockheizkraftwerk ausgeführt, basieren entweder auf dem klas-

Kraft-Wärme-Kopplung

sischen Kolbenmotorprozess oder auf einer der neuen Technologien Mikrogasturbine, Brennstoffzelle bzw. Stirling-Motor.

Da das Hauptaugenmerk dieser Broschüre auf dem Einsatz von Mikrogasturbinen in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen liegt, werden nachfolgend nur Technologiekonzepte vorgestellt, die sich im Leistungsbereich von Mikrogasturbinen (bis zu ca. 250 kW_{el}) bewegen und damit direkte Konkurrenten sind.



Bild: MDE Dezentrale Energiesysteme GmbH

Abbildung 2.4: Hubkolbenmotor in einem Energiemodul der MDE Dezentrale Energiesysteme GmbH

Blockheizkraftwerk mit Kolbenmotor

Technologiestand: bewährt

übliche Brennstoffe: Erdgas, Biogas, Diesel

alternative Brennstoffe: Vergasungsprodukte

elektrische Leistung: 1 kW_{el} bis 20 MW_{el}

elektrischer Wirkungsgrad: 25 bis 44 %

Gesamtwirkungsgrad: bis 90 %



Bild: E-quad Power Systems GbR

Abbildung 2.5: Mikrogasturbine der Capstone Turbine Corporation

Blockheizkraftwerk mit Mikrogasturbine

Technologiestand: Kleinserien

übliche Brennstoffe: Erdgas, Heizöl, Diesel

alternative Brennstoffe: Pflanzenöl, Biogas

elektrische Leistung: 20 bis 250 kW_{el}

elektrischer Wirkungsgrad: bis 29 %

Gesamtwirkungsgrad: bis 93 %

Kraft-Wärme-Kopplung



Bild: Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Abbildung 2.6: Stirling-Motor der Solo Stirling GmbH

Blockheizkraftwerk mit Stirling-Motor

Technologiestand: Kleinserien

übliche Brennstoffe: Kohle, Erdöl, Biomasse

alternative Brennstoffe: grundsätzlich ist jeder Brennstoff möglich

elektrische Leistung: 1 bis 40 kW_{el}

elektrischer Wirkungsgrad: 10 bis 30 %

Gesamtwirkungsgrad: bis 85 %



Bild: Siemens AG

Abbildung 2.7: SOFC/Gasturbinen-Hybridanlage der Siemens AG.

Blockheizkraftwerk mit Brennstoffzelle

Technologiestand: Pilotanlagen

erforderliche Betriebsstoffe: Wasserstoff, Sauerstoff/Luft, Elektrolyt

elektrische Leistung: 1 bis 250 kW_{el}

elektrischer Wirkungsgrad: 30 bis 47 %

Gesamtwirkungsgrad: bis 90 %

Anforderungen an Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen

Die grundlegenden Anforderungen an Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen werden folgendermaßen definiert:

- möglichst hoher Gesamtwirkungsgrad
- hohe Verfügbarkeit
- umweltfreundlicher Betrieb
- geringer Platzbedarf

Darüber hinaus sollten KWK-Anlagen leicht zu montieren sein sowie niedrige Investitions-, Betriebs-, Wartungs- und Instandsetzungskosten aufweisen.

Kraft-Wärme-Kopplung

Auslegung und Betriebsweise

Die Auslegung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen kann wärmeorientiert, stromorientiert oder kostenorientiert erfolgen.

Bei der **WÄRMEORIENTIERTEN AUSLEGUNG** und Betriebsweise wird die Anlage auf den benötigten Wärmebedarf ausgerichtet. Die Stromerzeugung ist zweitrangig, überschüssiger Strom wird in das Stromnetz eingespeist.

Bei der **STROMORIENTIERTEN AUSLEGUNG** und Betriebsweise steht die Stromerzeugung im Vordergrund. Die Menge nutzbarer Wärme variiert in Abhängigkeit von der Stromerzeugung.

Die **KOSTENORIENTIERTE AUSLEGUNG** und Betriebsweise verursacht die geringsten Betriebskosten. Sie wird angewandt, wenn weder Strom noch Wärme primär zur Verfügung stehen muss.

Von entscheidender Bedeutung bei allen drei Auslegungsvarianten ist das Erreichen vieler Volllaststunden, damit sich die relativ hohen Investitionskosten schnell amortisieren. Aus diesem Grund sind Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen oft zur Abdeckung der Wärmegrundlast dimensioniert. Wärmelastspitzen werden dann durch separate Spitzenheizkessel aufgefangen.



Bild: ProTech Energiesysteme GmbH

Abbildung 2.8: KWK-Anlage im Park- und Sporthotel Stumpf, Neunkirchen (3 x Blockheizkraftwerk 5 kW_{el} mit Spitzenkessel 150 kW)

Eher seltener werden Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen auch für die Spitzenlastabdeckung verwendet. Eine solche Auslegung und Betriebsweise wird dann vorgenommen, wenn die konventionelle Abdeckung von Spitzenlasten sehr teuer ist.

Energieeffizienz / Umweltaspekte

Für den Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung gegenüber der konventionellen getrennten Erzeugung von Strom und Wärme sprechen aus umweltpolitischer Sicht vor allem

- ein geringerer Primärenergieverbrauch und
- eine geringere Umweltbelastung, insbesondere durch CO₂-Emissionen und Luftschadstoffe wie NO_x und CO.

Kraft-Wärme-Kopplung

Stromerzeugung

Bei der modernen konventionellen Stromerzeugung wird kaum mehr als die Hälfte der eingesetzten Primärenergie genutzt. Der Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung und der damit verbundenen deutlich geringeren Verluste von 10 bis 20 % führt dagegen zu einer deutlichen Reduzierung des Brennstoffeinsatzes und zu einer drastischen Senkung der Treibhausgasemissionen.

Der Vergleich einiger Module aus der GEMIS-Datenbank¹, die neben den unmittelbaren Emissionen aus den Verbrennungsprozessen auch die Vorkette² berücksichtigen, zeigt, dass aus der Stromerzeugung mit einem Blockheizkraftwerk auf Erdgasbasis zwischen 70 und 80 % geringere Treibhausgasemissionen resultieren, als aus der Stromerzeugung mit einem konventionellen Kohle-Kraftwerk. Auch gegenüber der Stromerzeugung in modernen Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerken ohne Wärmeauskopplung werden mit dem Blockheizkraftwerk noch ca. 50 % Treibhausgasemissionen eingespart.

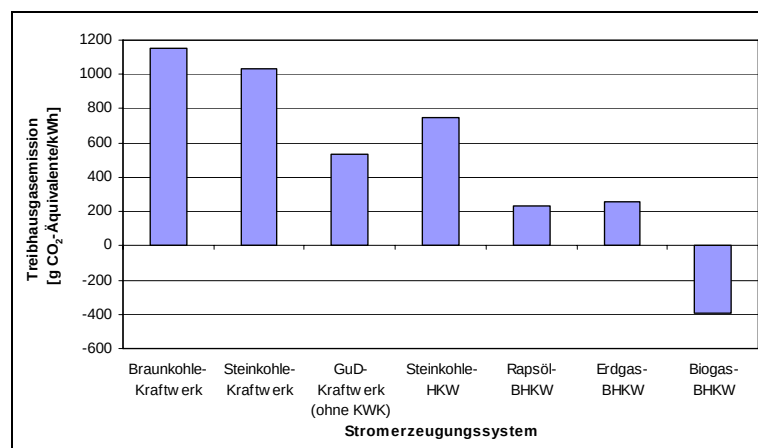


Bild: Erstellt auf Basis von Daten der GEMIS-Datenbank

Abbildung 2.9: Treibhausgasemissionen von Stromerzeugungssystemen

- Rohbraunkohle-Kraftwerk mit Dampfturbine (600 MW), nasser REA und NOx-Primärmaßnahmen unter Verwendung westdeutsche Rohbraunkohle aus dem rheinischen Revier
- Steinkohle-Kraftwerk mit Dampfturbine (700 MW) für Vollwert-Steinkohle mit nasser REA und SCR-DeNOx
- Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk (100 MW) mit Low-NOx-Brennkammer → ohne Verrechnung von Gutschrift für genutzte Koppelwärme
- Steinkohle-Heizkraftwerk (100 MW) mit Entnahme-Kondensations-Turbine, Staubfeuerung mit Nass-REA + SCR-DeNOx → inkl. Verrechnung von Gutschrift für ausgekoppelte Wärme auf Basis einer Gasheizung
- Rapsöl-Blockheizkraftwerk (0,1 MW) → inkl. Verrechnung der Gutschrift für ausgekoppelte Wärme auf Basis einer Gasheizung
- Gasmotor-Blockheizkraftwerk (0,5 MW) mit 3-Wege-Kat → inkl. Verrechnung der Gutschrift für genutzte Koppelwärme auf Basis Gas-Heizung
- Biogas-Biomüll-Blockheizkraftwerk (0,5 MW) - inkl. Verrechnung der Gutschrift für genutzte Koppelwärme auf Basis Gas-Heizung

¹ Globales Emissionsmodell integrierter Systeme

² d.h. die Bereitstellung und den Transport der Brennstoffe sowie die Herstellung der Anlagen

Kraft-Wärme-Kopplung

Wärmeerzeugung

Der Vergleich verschiedener Heizungssysteme zeigt ein ähnliches Ergebnis wie der Vergleich der Stromerzeugungssysteme. Die Wärmeerzeugung mit einem Blockheizkraftwerk auf Erdgasbasis weist ca. 66 % geringere Treibhausgasemissionen auf, als die Wärmeerzeugung mit einem modernen Gas-Brennwertkessel.

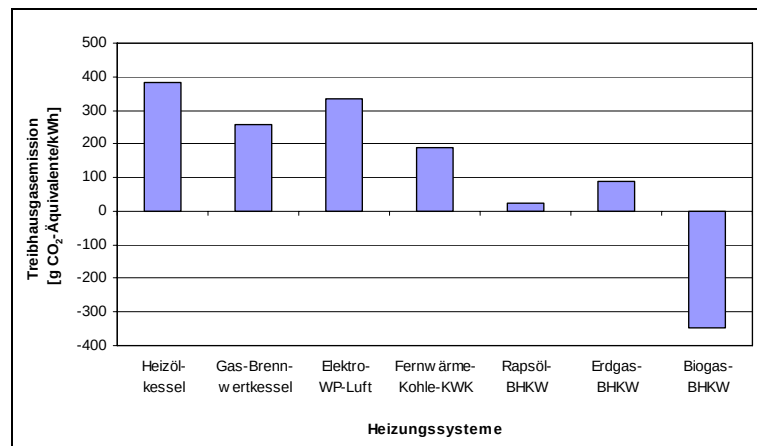


Bild: Erstellt auf Basis von Daten der GEMIS-Datenbank

Abbildung 2.10: Treibhausgasemissionen von Heizungssystemen

- Kessel für schweres Heizöl ohne REA, NO_x-Minderung nach TA Luft
- Zentrale Brennwertheizung für Erdgas mit atmosphärischem Brenner, inkl. Hilfsstrom und Wärmeverteilung
- Monoenergetische elektrische Wärmepumpe für Niedertemperatur-Heizsystem (Wärmequelle Luft) mit elektrischer Nachheizung für kalte Tage. Der Wärmepumpen-Strom kommt zu 100 % aus Steinkohle-Kraftwerken.
- Hausübergabestation und Hausverteilung für Fernwärme
- Dieselmotor-Blockheizkraftwerk (0,15 MW) ohne DeNO_x, aber mit OxKat, für Rapsöl → inkl. Verrechnung der Gutschrift für KWK-Strom auf Basis eines des deutschen Kraftwerkspark-Mix
- Erdgasmotor-Blockheizkraftwerk (0,198 MW) mit 3-Wege-Kat zur Wärmebereitstellung → inkl. Verrechnung der Gutschrift für KWK-Strom auf Basis eines des deutschen Kraftwerkspark-Mix
- Biogasmotor-Blockheizkraftwerk (0,198 MW) mit 3-Wege-Kat zur Wärmebereitstellung → inkl. Verrechnung der Gutschrift für KWK-Strom auf Basis eines des deutschen Kraftwerkspark-Mix

Sowohl beim Vergleich der verschiedenen Stromerzeugungs- als auch der Heizungssysteme fällt auf, dass die Treibhausgasemission aus einem Blockheizkraftwerk auf Biogasbasis negativ ist, so dass dieses BHKW wie eine sogenannte CO₂-Senke wirkt. Der Grund liegt in der Gutschriftenverrechnung.

Wird das BHKW als Stromerzeuger betrachtet, ist die gleichzeitig erzeugte Wärme als Sekundärprodukt (Koppelprodukt) anzusehen. Diese Wärmemenge muss nicht mehr mit konventionellen Prozessen erzeugt werden, wodurch die damit verbundenen Emissionen vermieden und dem BHKW gutgeschrieben werden. Sind diese vermiedenen Emissionen größer, als die Emissionen, die bei der Stromerzeugung im Blockheizkraftwerk anfallen, ergeben sich rechnerisch negative Emissionen. Wird das BHKW als Wärmeerzeuger betrachtet, gilt das gleiche für das Sekundärprodukt Strom.

Kraft-Wärme-Kopplung

Wirtschaftlichkeit kleiner Blockheizkraftwerksanlagen

Der wichtigste Faktor für den Betrieb einer kleinen Blockheizkraftwerksanlage ist die Wirtschaftlichkeit. Ausschlaggebend dafür ist die jährliche Laufzeit. Je mehr Volllaststunden die Anlage im Jahr erreicht, desto mehr verteilen sich die Investitionskosten auf größere Strom- und Wärmemengen. Dadurch sinken die Energieerzeugungskosten.

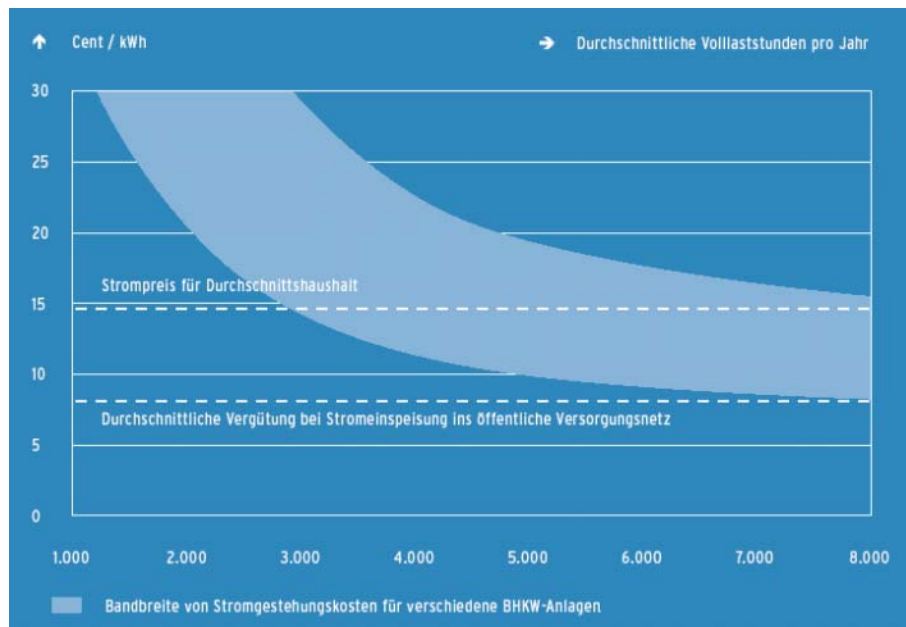


Bild: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Abbildung 2.11: Wirtschaftlichkeit der kleinen Kraft-Wärme-Kopplung

Die Laufzeit kleiner Blockheizkraftwerksanlagen ist hauptsächlich von der Auslegung und dem Wärmebedarf abhängig. Je mehr Wärme vor allem auch in den Sommermonaten (z.B. für Warmwasserbereitstellung oder Kälteerzeugung) verbraucht wird, desto wirtschaftlicher läuft die Anlage. Daher ist es notwendig, viel Umsicht bei der Planung und Errichtung von Blockheizkraftwerksanlagen aufzuwenden. Denn neben ungeeigneten Standorten können Anlagen auch falsch geplant und dimensioniert oder unvorteilhaft in ein Heizsystem eingebunden werden.

Unter den derzeitigen Rahmenbedingungen sollte jedes Anlagenkonzept so ausgelegt sein, dass möglichst wenig Strom in das öffentliche Netz eingespeist wird, da die durchschnittliche Vergütung trotz eines im Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz festgelegten Ökobonus deutlich geringer ausfällt, als der Preis für den aus dem öffentlichen Netz eingekauften Strom. Der Erlös aus der Einspeisung in das öffentliche Netz kann aber gesteigert werden, wenn als Brennstoff erneuerbare Energieträger genutzt werden. Dadurch ist es möglich, eine Vergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) zu erhalten.

Ein genereller Vorteil von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen ist die Befreiung von der Mineralölsteuer und der Öko-Mineralölsteuer³. KWK-Betreiber, deren Anlagen einen Jahresnutzungsgrad von mehr als 60 % aufweisen, sind von der Öko-Mineralölsteuer befreit. Zusätz-

³ Seit dem 01.01.2003 beträgt der Erdgassteuersatz 0,55 Euro-Cent/kWh (H_o), der sich aus dem Mineralölsteuersatz auf Erdgas von 0,184 Euro-Cent/kWh (H_o) und dem zusätzlichen Öko-Mineralölsteuersatz auf Erdgas von 0,366 Euro-Cent/kWh (H_o) zusammensetzt.

Kraft-Wärme-Kopplung

lich sind KWK-Betreiber auch von der Mineralölsteuer befreit, wenn der Jahres- bzw. Monatsnutzungsgrad ihrer Anlagen mindestens 70 % beträgt.

Die Stromeigenerzeugung aus Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis zu 2 MW ist darüber hinaus nicht von der Stromsteuer betroffen.

Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung im Überblick

Tabelle 2.1: Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung

- bessere Brennstoffausnutzung → hoher Gesamtwirkungsgrad
- hohe Wirtschaftlichkeit bei optimalen Randbedingungen (abhängig von der Auslastung und Auslegung)
- umweltfreundlicher Betrieb: geringe CO₂-Emissionen, geringer Ressourcenverbrauch
- zuverlässige, technisch ausgereifte Technik
- die Auslegung kann wärme-, strom- oder kostenorientiert erfolgen
- Einsatz erneuerbarer Energien möglich
- Befreiung von der Öko-, Mineralöl- und Stromsteuer (unter bestimmten Voraussetzungen)
- Versorgungssicherheit durch dezentrale Energieerzeugung mit Blockheizkraftwerken

Mikrogasturbine

3 MIKROGASTURBINE

Prinzip

Die Entwicklung von Mikrogasturbinen begann ca. 1990 in den USA. Mit Fördermitteln der US-Regierung wurde die Technologie für verschiedene Anwendungsgebiete, zuerst aber für militärische Zwecke, entwickelt und befindet sich heute in der weltweiten Markteinführung.

In den USA wurden die Mikrogasturbinen am Anfang nur für die reine Not- und Spitzenstromerzeugung ohne Abwärmenutzung angeboten. In Deutschland erfolgte eine Weiterentwicklung der Aggregate für verschiedene Anwendungsbereiche der Energieumwandlung, da mit der Verpflichtung zur umfangreichen Minderung von CO₂-Emissionen für den europäischen Markt nur ein Einsatz der Mikrogasturbine in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen in Frage kommt. Die in Deutschland entwickelten Anwendungen der Mikrogasturbinen im Bereich der Wärmenutzung und Kälteerzeugung wurden inzwischen auch von Firmen der USA übernommen.

Als Mikrogasturbinen werden kleine schnelllaufende Gasturbinen bis zu einer elektrischen Leistung von ca. 250 kW_{el} bezeichnet. Grundlage der Entwicklung waren Aggregate aus der Luftfahrtindustrie. Mit ähnlichen Turbinen wird in Flugzeugen Strom mittels eines Permanentmagnetgenerators ohne Zwischenschaltung eines mechanischen Getriebes erzeugt.

Aufbau

Die Hauptkomponenten einer Mikrogasturbine sind

- der Verdichter
- der Rekuperator (einige Maschinen können auch ohne Rekuperator geliefert werden)
- die Brennkammer
- die Turbine und
- der Generator zzgl. nachgeschalteter Leistungselektronik.

Beim Einsatz in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen ist die Mikrogasturbine mit einem Modul für die Abwärmenutzung gekoppelt.

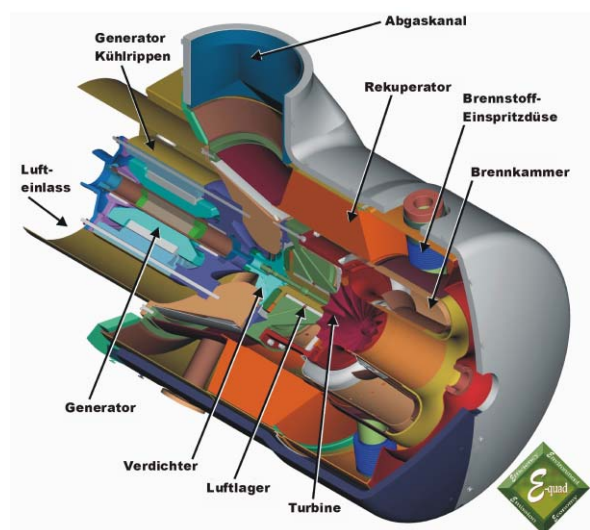


Bild: E-quad Power Systems GbR

Abbildung 3.1: Schnitt durch eine Capstone-Turbine C60

Mikrogasturbine

Funktion

Am Beispiel der Mikrogasturbine C30 von *Capstone* soll die Funktion näher erläutert werden. Durch einen Radialverdichter angesaugte Umgebungsluft tritt über den Generator (1) in die Mikrogasturbine ein und kühlt diesen dabei. Im Verdichter (2) wird die Luft auf etwa 3,8 bar Überdruck komprimiert und anschließend, vor dem Eintritt in die Brennkammer, im Rekupe-
rator (3) durch das heiße Abgas aus der Turbine vorgewärmt. Die Vorwärmung dient zur Verminderung des Brennstoffeinsatzes, was zu einer wesentlichen Erhöhung des mechanischen und damit verbunden des elektrischen Wirkungsgrades führt.

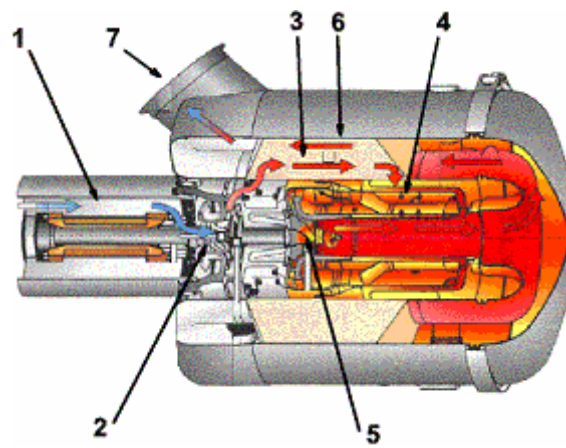


Bild: E-quad Power Systems GbR

Abbildung 3.2: Weg der Verbrennungsluft durch eine Capstone-Turbine

- | | |
|------------------|---------------|
| 1 Generator | 4 Brennkammer |
| 2 Verdichter | 8 Turbine |
| 3, 6 Rekuperator | 9 Abgaskanal |

Die verdichtete und vorgewärmte Luft wird der Brennkammer (4) zugeführt, dort mit dem Brennstoff (bisher meist Erdgas) vermischt und bei Temperaturen von mehr als 800 °C verbrannt. Die heißen Verbrennungsgase werden anschließend in der Turbine (5) entspannt und treiben so den Verdichter und den Generator an. Sie erfahren dabei eine Abkühlung auf ca. 650 °C. Bevor das Abgas die Mikrogasturbine in Richtung nachgeschaltetem Abgaswärmetauscher oder Kamin (7) verlässt, gibt es einen Teil seiner Wärme im Rekuperator (6) an die angesaugte Verbrennungsluft ab und kühlt dabei auf ca. 270 °C ab.

Der Rekuperator kann je nach Hersteller im Gehäuse der Turbine integriert oder extern angeordnet sein. Ein Vorteil des externen Rekuperators (z.B. bei Mikrogasturbinen von *Turbec*) ist, dass Gase auch mit höheren Temperaturen aus dem Turbinenprozess entnommen werden können. Das ist notwendig, wenn bei einem externen Prozess eine höhere Temperatur erforderlich ist, als die Abgase nach dem Rekuperator aufweisen.

Mikrogasturbine

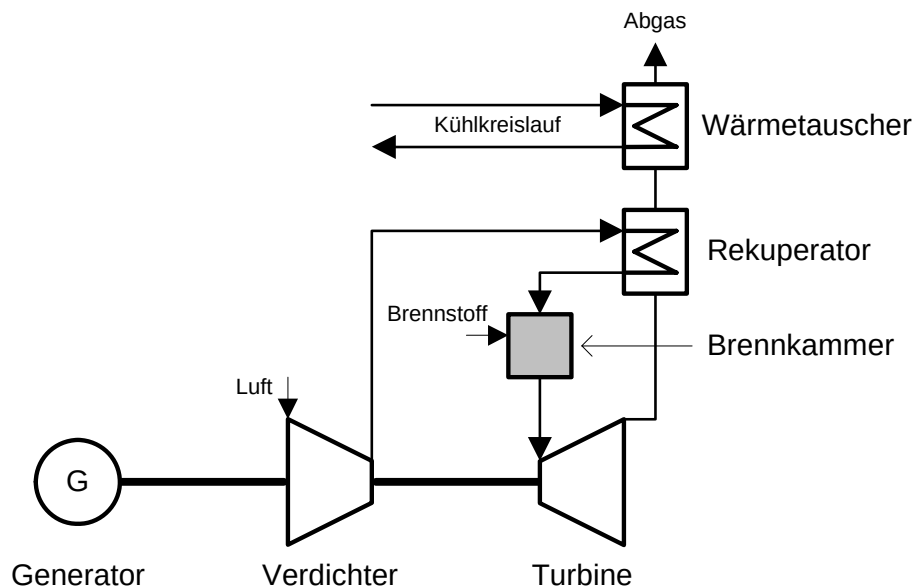


Bild: Erstellt auf Basis von HERDIN 2002

Abbildung 3.3: Fließschema einer Mikrogasturbine mit Rekuperator

Wie bei den Industrie-Gasturbinen wird auch bei den Mikrogasturbinen zwischen sogenannten „Einwellenmaschinen“ und „Zweiwellenmaschinen“ unterschieden.

Bei Einwellenmaschinen erfolgt die Stromerzeugung über einen Permanentmagnetgenerator, wobei der Permanentmagnet direkt auf der Antriebswelle der Turbine und dem Verdichter angeordnet ist. Damit läuft der Generator genauso schnell wie die Turbine.

Bei Drehzahlen zwischen 46.000 und 100.000 U/min wird ein hochfrequenter Wechselstrom (bis zu 1.600 Hz) erzeugt. In der Leistungselektronik der Turbine wird der Strom gleichgerichtet und anschließend in Wechselstrom je nach Bedarf mit 50 oder 60 Hz und einer Spannung von 400 V gewandelt. Dieses „elektronische Getriebe“ macht eine mechanische Synchronisationseinrichtung überflüssig.

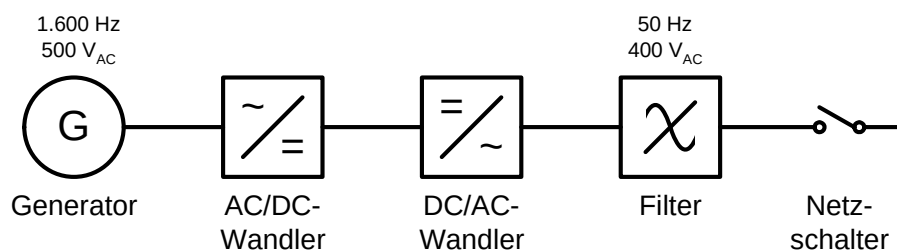


Bild: Erstellt auf Basis von ITJESHORST, 2001

Abbildung 3.4: Beispiel für die Leistungselektronik einer Mikrogasturbine

Bei Zweiwellenmaschinen besitzen der Generator und der Verdichter jeweils eine eigene Turbine. Die Turbinen laufen unterschiedlich schnell, da die Drehzahl der Turbine, die den Generator antreibt, über ein mechanisches Getriebe auf eine Drehzahl übersetzt wird, die den Anforderungen des Stromnetzes entspricht. Solche Maschinen werden aber nur von einem Hersteller (IR Energy Systems) angeboten.

Mikrogasturbine

Im Gegensatz zu herkömmlichen Industrie-Gasturbinen, bei denen die Leistungsregelung über die zugeführte Gasmenge und das erzeugte Moment erfolgt, ermöglicht das „elektronische Getriebe“ eine Leistungsregelung über die Drehzahl. Dadurch kann die Austrittstemperatur aus der Brennkammer und damit die Eintrittstemperatur in die Turbine relativ konstant gehalten werden. Da der Volumenstrom und die Drehzahl aufeinander angepasst sind, entstehen im Teillastbereich keine größeren Stoßverluste an dem Turbinen- und Verdichterrad⁴. Dadurch weisen Mikrogasturbinen im Teillastbereich einen geringen Wirkungsgradeinbruch auf.

Als Brennstoff wird hauptsächlich Erdgas eingesetzt. Einige Aggregate können aber auch Heizöl, Diesel, Propan- oder Biogas verbrennen. Seit mehreren Jahren werden Anstrengungen unternommen, Mikrogasturbinen neben Biogas auch für den Einsatz anderer regenerativer Brennstoffe umzurüsten. U.a. wurde ein Forschungsprojekt initiiert, in dem die Verwendung von Pflanzenöl als Brennstoff untersucht wird.

Installation

Für den Betrieb einer Mikrogasturbine bedarf es zweier Luftströme, eines Kühl- und eines Verbrennungsluftstroms.

Über ein Lüftungssystem wird die Zu- und Abluft der Mikrogasturbine von außerhalb des Gebäudes angesaugt bzw. nach außen abgelassen. Der Zuluftstrom dient hauptsächlich zur Kühlung. Unerwünschte Wärme infolge Turbinenoberflächenverluste und Verluste des Leistungswandlers wird vorwiegend durch ihn abtransportiert. Die Ansaugöffnung des gesamten Belüftungssystems ist mit einem Grobfilter versehen, um Verschmutzungen zu verhindern. Die Ansaugung der Verbrennungsluft erfolgt aus dem Kühlluftstrom über einen weiteren Feinfilter vor dem Eintritt der Luft in die Turbine. Damit sollen Verschmutzungen innerhalb des Verdichters und der Turbine vermieden werden.

Die Kühlluftmenge wird über die Steuerung der Turbine und einen Temperaturfühler geregelt. Zur Nutzung der Abgaswärmeenergie ist ein Abgaswärmetauscher entweder im Gehäuse der Turbine integriert oder außerhalb aufgestellt.

Für den Fall, dass kein Gasanschluss mit einem genügend hohen Gasvordruck vorhanden ist, muss ein zusätzlicher Erdgasverdichter vorgesehen werden, um den notwendigen Gasdruck am Eingang der Mikrogasturbine zu gewährleisten. Die Ansteuerung erfolgt ebenfalls über die Steuerung der Mikrogasturbine. Einige Hersteller, wie z. B. *Capstone*, haben in ihren Turbineneinheiten Gasverdichter integriert, die in die Turbinenregelung mit eingebunden sind. Diese Einheiten benötigen nur einen Gasvordruck von 0,015 bar. Dies entspricht dem Gasnetzdruck in den Niederdruckleitungen in örtlichen Gasversorgungsnetzen. Bei externen Verdichtern erfolgt die interne Regelung und Überwachung des Erdgaskompressors in einem verdichtereigenen Schaltschrank.

⁴ resultiert aus der Tatsache, dass die Eintrittsrichtung der Gase in die Räder und der Schaufelwinkel der Räder gleich gerichtet sind

Mikrogasturbine

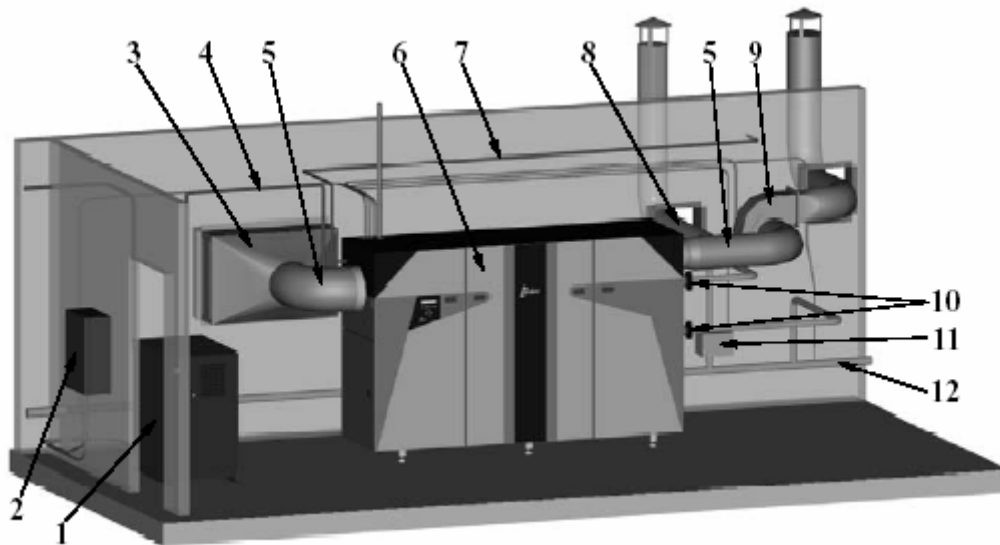


Bild: ITJESHORST, 2001

Abbildung 3.5: Beispiel für die Installation einer Mikrogasturbine Turbec T100

- | | |
|--|-----------------------------|
| 1 Erdgaskompressor | 7 Evakuierungsleitung |
| 2 Schaltschrank für den Erdgaskompressor | 8 Abgasleitung |
| 3 Grobfilter | 9 Ventilator |
| 4 Gasanschluss | 10 Vor- und Rücklaufflansch |
| 5 Lüftungssystem | 11 Heizwasserpumpe |
| 6 Mikrogasturbine | 12 Heiznetz |

Um bei einem „Notaus“ der Turbine die im Rekuperator und dem verdichteten Gas noch enthaltene Energie sofort abzubauen, wird der Luftteil des Rekuperators über Evakuierungsleitungen entspannt.

Je nach Einsatzgebiet, z.B. als Notstromeinheit, ist die Anlage mit einem Batteriesatz ausgerüstet, um auch bei fehlendem Stromnetz oder Stromausfall gestartet zu werden und einen Inselbetrieb aufrecht halten zu können.

Anbieterübersicht

Tabelle 3.1: Mikrogasturbinen, die derzeit kommerziell in Deutschland vertrieben werden

	Capstone Turbine Corporation (USA)					Turbec AB (S) ²⁾
Modell	C30		C50 ¹⁾	C60 ¹⁾	C65/CR65 ¹⁾	T100
elektrische Leistung	30 kW _{el} (+0 / -2)	29 kW _{el} (±1)	50 kW _{el} (+0 / -1)	60 kW _{el} (+0 / -2)	65 kW _{el}	105 kW _{el} (±3)
thermische Leistung	70 kW _{th}	70 kW _{th}	115 kW _{th}	125 kW _{th}	130 kW _{th}	167 kW _{th} (±5)
Brennstoff	Erdgas, Propan, Deponiegas, Biogas	Diesel, Kerosin	Erdgas	Erdgas	Erdgas, Biogas	Erdgas
Brennstoffeinsatz	115 kW	115 kW	194 kW	214 kW	224 kW	350 kW
Gasvordruck	3,6 - 3,8 bar	-	5,2 - 5,5 bar	5,2 - 5,5 bar	5,3 - 5,5 bar	6 / 8,5 bar
elektrischer Wirkungsgrad	26 % (±2)	25 % (±2)	28 % (±2)	28 % (±2)	29 %	30 % (±1)
Gesamtwirkungsgrad	87 % (±2)	86 % (±2)	85 % (±2)	86 % (±2)	87 % (±2)	78 % (±1)
Abmessungen (L x B x H)	1,52 x 0,76 x 1,94 m	1,52 x 0,76 x 1,94 m	1,96 x 0,76 x 2,11 m	1,96 x 0,76 x 1,92 m	1,96 x 0,76 x 2,11 m	2,92 x 0,87 x 1,9 m
Gewicht	405 kg	405 kg	758 kg	758 kg	758 kg	2000 kg
Vertrieb in Deutschland	E-quad Power Systems GbR					Pro2 Anlagen- technik GmbH

¹⁾ Die Capstone-Module C50 und C60 werden in der nächsten Zeit durch die Capstone-Module C65 (Erdgas) bzw. CR65 (Biogas) ersetzt.

²⁾ Die Turbec Mikrogasturbine wird inzwischen nicht mehr von Turbec AB, einem Unternehmen von VOLVO und ABB, gefertigt. Die Fertigung ist von den italienischen Unternehmen API COM S.r.l. übernommen worden.

Tabelle 3.2: Mikrogasturbinen die derzeit nicht in Deutschland vertrieben werden

	Elliot Energy Systems, Inc. (USA) ¹⁾		Bowmann Power Systems Ltd (GB) ¹⁾			IR Energy Systems (USA) ⁵⁾	
Modell	TA100 CHP	TA 100	TG 80 RC-G	TG 80 SO-G-R	TG 80 SO-G	70 L	250
elektrische Leistung	100 kW _{el}	100 kW _{el}	80 kW _{el}	80 kW _{el}	80 kW _{el}	70 kW _{el}	250 kW _{el}
thermische Leistung	172 kW _{th}	-	136 kW _{th}	136 - 216 %	-	_ ⁶⁾	_ ⁷⁾
Brennstoff	Erdgas	Erdgas	Erdgas, LPG, Propan, Buthan	Erdgas, LPG, Propan, Buthan	Erdgas, LPG, Propan, Buthan	gasförmig	gasförmig
Brennstoffeinsatz	362 kW	362 kW	_ ³⁾	_ ³⁾	_ ³⁾	_ ³⁾	_ ³⁾
Gasvordruck	0,03 - 0,3 bar	0,03 - 0,3 bar	5,5 bar	5,5 bar	5,5 bar	bis 5,2 bar	bis 13,8 bar
elektrischer Wirkungsgrad	29 % (±1)	29 % (±1)	28 %	28 - 22 %	15,5 %	28 - 29 %	29 - 30 %
Gesamtwirkungsgrad	> 75 %	_ ²⁾	75 %	75 - 80 %	_ ⁴⁾	_ ⁸⁾	_ ⁹⁾
Abmessungen (L x B x H)	3,25 x 0,85 x 2,25 m	3,25 x 0,85 x 2,25 m	3,1 x 0,88 x 1,92 m	2,19 x 0,88 x 1,92 m	2,19 x 0,88 x 1,92 m	1,18 x 1,08 x 2,22 m	3,23 x 2,16 x 2,29 m
Gewicht	1.860 kg	1.588 kg	1.930 kg	1.930 kg	1.350 kg	2200 kg	5.307 kg
Vertrieb in Deutschland	kein Vertrieb						

¹⁾ Elliot Energy Systems und Bowmann Power Systeme verwenden in ihren Mikrogasturbinen die gleiche Turbineneinheit. Auch der Rekuperator ist vom gleichen Hersteller. Die Module unterscheiden sich nur durch die Anordnung und Zusammenstellung der weiteren Bauteile, wie z. B der Leistungselektronik.

²⁾ abhängig von der thermischen Verwertung des heißem Abgas

³⁾ keine Angabe

⁴⁾ durch eine thermische Verwertung des ca. 535 °C heißen Abgases kann ein Gesamtwirkungsgrad von bis zu 90 % erreicht werden

⁵⁾ IR Energy Systeme fertigt die einzige auf dem Markt verfügbare „Zweiwellenmaschine“

⁶⁾ Heat Rate HHV: 13.080 - 13.550 BTU/kWh

⁷⁾ Heat Rate HHV: 12.645 - 13.080 BTU/kWh

⁸⁾ abhängig von der thermischen Verwertung des ca. 230 °C heißen Abgases

⁹⁾ abhängig von der thermischen Verwertung des ca. 250 °C heißen Abgases

Mikrogasturbine

Die kommerzielle Entwicklung und Vermarktung von Mikrogasturbinen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Bis Ende 2005 waren weltweit etwa 5.000 Systeme ausgeliefert.

Marktführer ist die *Capstone Turbine Corporation* in den USA, deren Mikrogasturbinen vor allem im Bereich der dezentralen Stromerzeugung eingesetzt werden. In Deutschland wurden bis 2006 über 20 Module in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen installiert.

Die Maschine mit dem zweitgrößten Marktanteil ist die Mikrogasturbine von *Turbec AB* aus Schweden. Auch von diesem Hersteller sind in Deutschland einige Module im Betrieb.

Die Unternehmen *Elliot Energy Systems*, *Bowmann Power Systems* und *IR Energy Systems* bieten momentan keine Mikrogasturbinen auf dem deutschen Markt an, sind aber z.T. an einem Vertriebsaufbau interessiert.

Das Unternehmen *Honeywell International Inc.* hat die Produktion von Mikrogasturbinen vor einigen Jahren eingestellt und die in Europa installierten Anlagen außer Betrieb gesetzt.

Technisch / wirtschaftliche Faktoren

Basis für die Beschreibung und Abschätzung der technisch/wirtschaftlichen Faktoren sind Daten, die von der *E-quad Power Systems GbR*, dem deutschlandweiten Distributor und autorisierten Service-Provider für *Capstone*-Mikrogasturbinen, zur Verfügung gestellt wurden.

Wirkungsgrade

Der elektrische Wirkungsgrad von Mikrogasturbinen beträgt derzeit zwischen 25 % und 30 % und liegt damit um ca. 5 % bis 10 % niedriger als der elektrische Wirkungsgrad von Stromerzeugungsmaschinen auf der Basis von Kolbenmotoren.

Der aktuelle elektrische Wirkungsgrad der Mikrogasturbinen ist aber durchaus mit dem Wirkungsgrad von motorischen Anlagen noch vor einigen Jahrzehnten vergleichbar. Es wird erwartet, dass noch ein erhebliches Entwicklungspotenzial vorhanden ist. Ein Ziel des U.S. Department of Energy⁵ ist u.a. die Entwicklung kommerzieller Mikrogasturbinen mit niedrigen Investitionskosten und einem elektrischen Wirkungsgrad von 40 %. Auch in anderen Expertenkreisen⁶ wird davon ausgegangen, dass Klein- und Mikro-Turbinen mit elektrischen Leistungen zwischen 5 und 250 kW_{el} bis 2010 mit einem elektrischer Wirkungsgrad von 35 % und bis 2030 von 40 % realisierbar sind.

Der thermische Wirkungsgrad und damit der Gesamtwirkungsgrad der Mikrogasturbine ist abhängig vom Temperaturniveau der Nutzwärmeabgabe. Bei einer Wärmeabgabe auf niedrigem Niveau (ca. 60 °C) ergibt sich z.B. ein Gesamtwirkungsgrad um 84 %. Eine effizientere thermische Verwertung des Abgases der Turbine würde dieses weiter abkühlen, so dass ein höherer Gesamtwirkungsgrad erzielt werden könnte. Derzeit sind oft noch Nutzwärmeabgabetemperaturen zwischen 80 und 90 °C üblich, wodurch der Gesamtwirkungsgrad nur bei etwa 75 % liegt.

⁵ U.S. Departement of Energy: „Advanced Microturbine Systems, program plan for fiscal years 2000-2006“. Washington 2000

⁶ World Information System on Energy (WISE): „Ergebnisse der Arbeitsgruppe Charpin-Dessus-Pellat: Prospektive wirtschaftliche Analyse der Atomkraft in Frankreich“. Paris 2001

Mikrogasturbine

Modulkosten

Die spezifischen Modulkosten für eine 30 kW_{el}-Mikrogasturbine von *Capstone* betragen etwa 1.700 €/kW_{el}. Die Kosten der doppelt so leistungsstarken Mikrogasturbine sind um 182 €/kW_{el} niedriger. Im Vergleich dazu sind die Modulkosten für Kolbenmotoren etwa 10 bis 25 % niedriger.

Tabelle 3.3: Modulkosten für Capstone-Mikrogasturbinen

Modul	elektrische Leistung	absolute Modulkosten	spezifische Modulkosten
Capstone C30	30 kW _{el}	51.400 € ¹⁾	1.714 €/kW _{el}
Capstone C60	60 kW _{el}	91.900 € ²⁾	1.532 €/kW _{el}
¹⁾ inklusive Gasverdichter ²⁾ ohne Gasverdichter			

Auf die Modulkosten der Mikrogasturbine wirkt sich u.a. positiv aus, dass die Kühlung von Generator und Leistungselektronik bis zu einer Leistung von ca. 60 kW_{el} noch mittels Luft erfolgen kann. Erst bei größeren Leistungen ist eine Flüssigkeitskühlung für den Generator und den Wechselrichter notwendig. Die Investitionskosten werden dagegen durch die aufwendige elektrische Frequenzumwandlungseinheit sowie den Rekuperator erhöht, der aus teuren und schwer zu verarbeitenden Materialien hergestellt werden muss.

Da bei den meisten Anwendungen kein Gasnetz mit dem notwendigen Druck für die Brennstoffbeschickung zur Verfügung steht, ist zusätzlich ein Gasverdichter zu installieren. Wenn der Gasverdichter nicht in den Kosten für das Mikrogasturbinenmodul enthalten ist, müssen dafür weitere 3.500 € bis 11.000 € veranschlagt werden. Diese Kosten können reduziert werden, wenn mehrere Mikrogasturbinen in Modulbauweise mit einem Gaskompressor betrieben werden⁷.

Anlagenkosten

Neben den Modulkosten müssen weitere Kosten berücksichtigt werden, die u.a. auf

- den Bau von Gebäude inklusive Fundament,
- die elektrische und hydraulische Einbindung,
- das Abgassystem,
- die Zu- und Abluftanlagen sowie
- Planung und Inbetriebnahme

entfallen. Im Vergleich zu den Einbindungskosten von Kolbenmotoren in Blockheizkraftwerke sind diese aber etwas günstiger, da die Turbine weniger Vibrationen verursacht und einen geringeren Lärmpegel aufweist.

⁷ Bei einem *Capstone* C60-Modul sind 11.000 € für den Gasverdichter notwendig. Wird ein zweites Modul an den selben Gasverdichter angeschlossen, fallen dafür nur Kosten von ca. 1.000 € an.

Mikrogasturbine

Beispielsweise kostet der Einbau eines *Capstone* C30-Moduls in einen vorhandenen Heizungskeller ca. 12.000 €. Für einen komplett ausgestatteten Container mit einem *Capstone* C50-Modul würden Gesamtinvestitionskosten von ca. 130.000 € anzusetzen sein. Die Modulbauweise ermöglicht es aber auch, mehrere Mikrogasturbinen zu kombinieren und in einem Container zu betreiben. Dadurch reduzieren sich die spezifischen Investitionskosten deutlich.

So wurden in den USA bereits bis zu 40 Turbineneinheiten zusammengeschaltet, wobei die Steuerung des Gesamtsystems über die Steuereinheit einer Turbine erfolgt.

Wartungskosten

Gegenüber Kolbenmotoren ist der Wartungsaufwand für Mikrogasturbinen konstruktionsbedingt geringer, da im Wesentlichen nur rotierenden Teile vorhanden sind. Bei Mikrogasturbinen mit einer Leistung unter 100 kW_{el} werden darüber hinaus von einigen Herstellern (z.B. *Capstone*) Luftlager verwendet, die für den Betrieb der Turbine ölgeschmierte Gleitlager inklusive Zusatzkomponenten überflüssig machen. Bei größeren Anlagen (z.B. von *Turbec*) werden dagegen noch ölgeschmierte Lager eingesetzt, die jedoch aufgrund der thermisch geringeren Belastung einen weniger häufigen Ölwechsel erfordern als bei Kolbenmotoren.

Ältere Modelle von *Capstone* zeigten schnelle Abnutzungserscheinungen an Stellen der Brennkammer, die überdurchschnittlich heiß wurden. Modifikationen an der Position der dafür verantwortlichen Injektoren haben das Problem gelöst.

Die Lebenserwartung seiner Mikrogasturbinen beträgt laut *Capstone* 80.000 Betriebsstunden. Eine Generalüberholung ist nach 40.000 Betriebsstunden fällig. Planmäßige Wartungen werden alle 8.000 Betriebsstunden durchgeführt⁸. Im Vergleich dazu sind die Wartungsintervalle von Kolbenmotoren etwa viermal kürzer, d.h. Mikrogasturbinen können bis zu viermal mehr Betriebsstunden laufen, bis die nächste Wartung ansteht.

Die Wartungskosten liegen bei *Capstone* zwischen 0,32 ct/Betriebsstunde für das C30-Modul und 0,41 ct/Betriebsstunde für das C60-Modul. Die Wartungskosten von Kolbenmotoren im gleichen Leistungsbereich liegen mit 0,63 ct/Betriebsstunde bzw. 0,78 ct/Betriebsstunde deutlich höher.

Die Kosten für eine Generalüberholung einer Mikrogasturbine von *Capstone* betragen zwischen 12.300 € für das C30-Modul und 15.100 € für das C60-Modul.

Üblicherweise bieten die Hersteller von Mikrogasturbinen Wartungsverträge mit langen Laufzeiten zu festen Kosten an. Aufgrund der derzeit geringen Anzahl installierter Anlagen und der damit geringen Erfahrungen bezüglich der Kosten für Wartung und Generalüberholung über längere Zeiträume müssen diese Kosten in den nächsten Jahren noch verifiziert werden.

⁸ z.B. werden alle 8.000 Betriebsstunden die verschiedenen Luft- und Brennstofffilter ersetzt sowie der Gasverdichter (soweit vorhanden) gewartet; nach 16.000 Betriebsstunden sind zusätzlich auch die Zündvorrichtung und die Brennstoffeinspritzung zu ersetzen

Mikrogasturbine

Monetäre Amortisation

Ausgangsdaten:

- Laufzeit pro Jahr: 7.900 h
- Eigenstrombezug: 65 MWh
- Gaspreis:
 - Leistungspreis: 14 €/kW
 - Arbeitspreis: 3,6 ct/kWh
 - Mineralölsteuer-Erstattung: 5,5 €/MWh
- Stromkosten
 - eingesparter Strom: 0,15 €/kWh
 - Stromgutschrift: 0,098 €/kWh
- Wärmepreis: 4,0 ct/kWh

Berechnung:

Tabelle 3.4: Wirtschaftlichkeitsberechnung für Capstone-Mikrogasturbinen

Modul	Capstone C30	Capstone C60
Investitionskosten	51.400 €	91.900 €
Zinssatz	5 %	5 %
Nutzungsdauer	10 Jahre	10 Jahre
Kapitalkosten	6.657 €/a	11.901 €/a
Gaspreis H _o	36.703 €/a	57.890 €/a
Erstattung Mineralölsteuer	- 5.344 €/a	-8.429 €/a
Wartungskosten	2.528 €/a	3.239 €/a
Betriebskosten	33.887 €/a	52.699 €/a
eingesparter Strom	15.323 €/a	32.373 €/a
Stromgutschrift	9.750 €/a	9.750 €/a
Wärmegutschrift	22.120 €/a	36.340 €/a
Erlöse	47.193 €/a	78.463 €/a
jährlicher Gewinn, statisch (Erlöse - Betriebskosten)	13.307 €/a	25.763 €/a
jährliche Investkosten (Kapitalkosten)	- 6.657 €/a	- 11.901 €/a
Jahresüberschuss	6.650 €/a	13.862 €/a
Amortisationszeit, statisch	3,86 Jahre	3,57 Jahre

Unter Berücksichtigung der oben genannten Ausgangsdaten unterscheiden sich die Amortisationszeiten von Kolbenmotoren im gleichen Leistungsbereich nur gering von denen der

Mikrogasturbine

Mikrogasturbinen. Bei einem 30 kW_{el}-Motor ist die Amortisationszeit um ca. 12 % niedriger (3,41 Jahre) und bei einem 60 kW_{el}-Motor um ca. 1 % höher (3,61 Jahre).

Mögliche Anwendungsgebiete

Mikrogasturbinen können prinzipiell in allen Anwendungsfeldern der Kraft-Wärme-Kopplungs-Technik eingesetzt werden. Aufgrund der gasturbinenspezifischen Abwärmecharakteristik eignen sie sich aber vor allem dort, wo ein höheres Temperaturniveau der Abwärme benötigt wird.

Dazu zählen neben industriellen und gewerblichen Anwendungen zur Strom- und Dampferzeugung, wie z.B. Heißwassernetze über 100 °C, Nahwärmenetze, Wäschereien, Brauereien und Trockneranlagen in der Keramikindustrie⁹ auch der Einsatz in Blockheizkraftwerken im Dienstleistungsbereich und kommunalen Einrichtungen, wie z.B. in Krankenhäusern, Altenheimen, Hallenbädern, Schul- und Bürokomplexen.

Auch für private Nutzer kann der Einsatz von Mikrogasturbinen für die Strom- und Wärmeversorgung von Wohnsiedlungen und -blocks, Einkaufszentren, Supermärkten, Sportzentren, etc. interessant sein.

Beispiele für den Einsatz von Mikrogasturbinen in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen

Landesvertretung Nordrhein-Westfalen

Nordrhein-Westfalen setzt für die Energieversorgung seiner Landesvertretung in Berlin erstmalig bei einem Gebäude dieser Größe auf die neue Brennstoffzellen-Technik und eine Mikrogasturbine (Neubau 2003). Erdgas wird dabei zur Erzeugung von Strom, Wärme und Kälte genutzt.

Die Brennstoffzelle deckt die Grundlast und im Parallelbetrieb mit der Mikrogasturbine die Mittellast des Gebäudes ab. Bei Spitzenlasten im Winter (Heizung) wie auch im Sommer (Klimakälteerzeugung) wird in das Netz Fernwärme eingespeist.

Hessische Kelterei

Seit Juli 2005 liefert eine Mikrogasturbine Strom und Wärme für die Produktionsanlagen der Kelterei Elm im hessischen Fliesen.

Die elektrische Energie wird für den Betrieb der Abfüll- und Spülanlage verwendet. Mit der Wärmeenergie wird Heißwasser für die Flaschenreinigungsanlage produziert.

Eigentümer und Betreiber der Anlage ist nicht die Kelterei, sondern ein Contractor, der damit für den reibungslosen Betrieb während der laufenden Produktion in der Kelterei sowie für Wartungsarbeiten verantwortlich ist.

Landwirtschaftszentrum Eichhof

Im Juli 2005 startete offiziell der Betrieb einer Mikrogasturbine im Landwirtschaftszentrum Eichhof bei Bad Hersfeld.

Der aus Biogas erzeugte Strom wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist, die produzierte Wärme wird als Heizenergie verwendet.

⁹ bei höheren Temperaturen kann der innere Rekuperator teilweise umfahren werden

Mikrogasturbine

Neben der Energiebereitstellung soll mit dem Projekt auch herausgefunden werden, welche Vor- und Nachteile die Mikrogasturbine im Vergleich zu bisher üblichen Kolbenmotoren bei der Kraft-Wärme-Kopplung unter Verwendung von Biogas als Brennstoff hat.

HEW Hof Energie+Wasser GmbH

Die HEW Hof Energie+Wasser GmbH ersetzte im Juni 2005 in einer Gasdruckregleranlage konventionelle Gasheizkessel durch eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage mit Mikrogasturbine.



Bilder: HEW Hof Energie+Wasser GmbH

Abbildung 3.6: Die Mikrogasturbine wurde in einer Betonfertigteilstation neben der Gasregleranlage installiert

In der Gasdruckregleranlage, die ein Heizkraftwerk mit Erdgas versorgt, wird der Erdgasdruck des Vorlieferanten auf den erforderlichen Versorgungsdruck reduziert. Die zum Ausgleich der Abkühlung beim Entspannungsvorgang notwendige Beheizung des Erdgases erfolgt mit der erzeugten Wärme der Mikrogasturbine. Der erzeugte Strom wird in das Stromnetz eingespeist.

Mit einem zusätzlich installierten Wärmetauscher konnte die ausgekoppelte Wärmeleistung von 60 kW auf 80 kW gesteigert werden. Aus dieser „Brennwertnutzung“ resultiert ein Gesamtwirkungsgrad der Anlage von ca. 95 %.

Beispiele für den Einsatz von Mikrogasturbinen in Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlagen

Aufgrund der hohen Temperatur von ca. 280 °C¹⁰ eignet sich das Abgas von Mikrogasturbinen auch zur Kälteerzeugung mittels Absorptionskältetechnik.

Wenn eine Kühlanlage notwendig ist, wird verstärkt versucht, die Abwärme von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen zum Betreiben von Absorptionskältemaschinen zu nutzen. Diese benötigen zur Kälteerzeugung Wärme auf hohem Niveau. Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen

¹⁰ bei Verwendung eines Rekuperators

Mikrogasturbine

mit Kolbenmotoren erreichen die dafür notwendigen Abgastemperaturen im Allgemeinen nicht. Deshalb werden dort technische Anpassungen gepaart mit hohen Investitions- und Wartungskosten notwendig.

Dagegen zeigen Forschungsvorhaben und Betriebserfahrungen erster kommerzieller Anlagen, dass es sich wirtschaftlich durchaus lohnen kann, eine Mikrogasturbine mit einer Absorptionskältemaschine zu kombinieren, wenn man bereit ist, die relativ hohen Investitionskosten zu akzeptieren.

Vereinzelt werden auch Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen mit Adsorptionskältemaschinen gekoppelt. Obwohl diese auch Niedertemperaturwärme nutzen können, erschweren die z.T. deutlich höheren spezifischen Investitionskosten gegenüber Absorptionskältemaschinen sowie das hohe Gewicht und große Bauvolumen den Einsatz in vielen Anwendungsfällen.

Bayerngas GmbH



Bilder: Bayerngas GmbH



Abbildung 3.7: Verwaltungsgebäude der Bayerngas GmbH in München (oben) und Mikrogasturbine im Heizungskeller (links)

Seit Oktober 2001 ist bei der Bayerngas GmbH die bayernweit erste Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlage mit Mikrogasturbine in Betrieb.

Die erzeugte elektrische Energie wird für den Eigenbedarf des Verwaltungsgebäudes verwendet. Mit der produzierten Wärmeenergie wird im Sommer über eine Absorptionskältemaschine Kälte erzeugt. Im Winter dient die Wärme als Heizenergie.

Bayerngas will mit der Pilotanlage zur breiteren Markteinführung der KWK-Technik im kleinen Leistungsbereich beitragen.

Graz-Thondorf (Österreich)

Gute Erfolge wurden mit einer Trigeneration-Anlage¹¹ mit Mikrogasturbine, die Sommer 2003 in Graz-Thondorf (Österreich) in Betrieb genommen wurde, erreicht. Neben der Erzeugung von Kälte dient die Anlage zur Versorgung eines Autowerkes mit Wärme sowie der Stadt Graz mit Strom und Fernwärme.

¹¹ Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlage

Mikrogasturbine



Bilder: energytech.at

Abbildung 3.8: Trigeneration-Anlage in Graz-Thondorf (Österreich): Mikrogasturbine mit geöffnetem Schaltschrank (links), geöffnete Absorptionskältemaschine (mitte), Kühlturm auf dem Dach (rechts)

Die garantierten Leistungsdaten konnten um mehr als 5 % übertroffen werden. Nach einem Jahr wurden die gemachten Betriebserfahrungen als sehr gut eingestuft. Nach Abzug betriebsbedingter Stillstände kam die Anlage im ersten Betriebsjahr auf eine Verfügbarkeit von 95 % mit einem geringen Wartungsaufwand. Um die Emissionsgrenzwerte sicher einzuhalten war es aber erforderlich, die Mikrogasturbine mit über 70 % der Volllast zu betreiben.

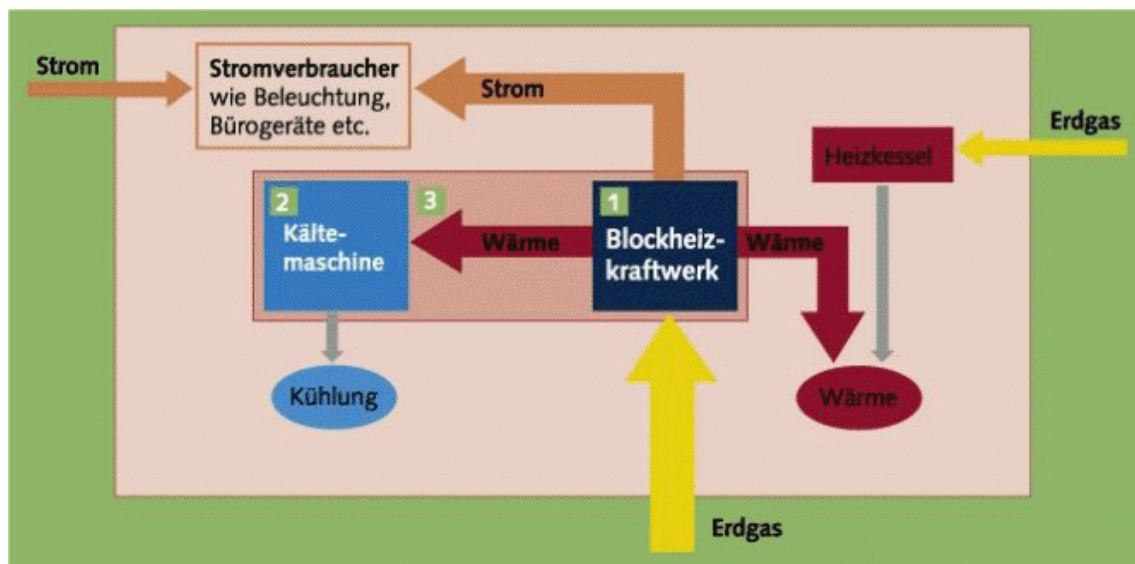


Bild: Bremer Energie-Konsens GmbH

Abbildung 3.9: Funktionsschema für die Kopplung eines BHKW mit einer Absorptionskältemaschine

Mikrogasturbine

Ausblick, Weiterentwicklung

Unter den neuen Technologien zur dezentralen Energieversorgung werden neben der Brennstoffzelle und dem Stirlingmotor hauptsächlich auch der Mikrogasturbine gute Chancen eingeräumt. Der Marktanteil, der aber letztendlich erreicht wird, hängt stark davon ab, welche Fortschritte im Rahmen der weiteren technologischen Entwicklung erzielt und welche Kostenreduktionspotenziale erschlossen werden.

Wirkungsgrade

Experten¹² gehen davon aus, dass der elektrische Wirkungsgrad von Klein- und Mikrogasturbinen mit elektrischen Leistungen zwischen 5 bis 250 kW_{el} bis 2010 auf 35 % und bis 2030 auf 40 % erhöht werden kann. Auch das U.S. Department of Energy schrieb in Forschungsprogrammen für Mikrogasturbinen¹³ (2000) ursprünglich einen elektrischen Wirkungsgrad von 40 % fest.

Um einen elektrischen Wirkungsgrad in dieser Größenordnung zu erreichen, ist es primär notwendig, die Verbrennungstemperatur in Bereiche zu erhöhen, für die die derzeit ungekühlten metallischen Werkstoffe nicht geeignet sind. Deshalb wird an langlebigen keramischen Werkstoffen geforscht. Es darf aber nicht unterschlagen werden, dass mit einer höheren Verbrennungstemperatur neben dem elektrischen Wirkungsgrad auch die NO_x-Emissionen steigen. Gegebenenfalls kann das dazu führen, dass Emissionsminderungsmaßnahmen nachgeschaltet werden müssen.

Eine weitere Möglichkeit, den elektrischen Wirkungsgrad zu verbessern, besteht darin, die Abgase weiter herabzukühlen. D.h., im idealen Fall bis auf wenige Grad über der Umgebungstemperatur. Es muss dabei ein Kompromiss zwischen der möglichen austauschbaren Wärmemenge und der erforderlichen Energie zur Überwindung des Druckverlustes im Wärmetauscher gefunden werden.

Modulkosten

Die Mikrogasturbine ist eine verhältnismäßig neue Technologie¹⁴. Es darf deshalb davon ausgegangen werden, dass die Modulkosten in Zukunft aufgrund von Lern- und Skaleneffekten noch stark reduziert werden können. Der Umfang der Reduzierung hängt im Wesentlichen von der Zahl der verkauften Anlagen sowie von den Fortschritten in der Produktion ab. So ging das U.S. Department of Energy im Jahr 2000 davon aus, dass bei einer Umsetzung von bis zu 200.000 Einheiten im Jahr die Modulkosten für Mikrogasturbinen bis 2006 auf 500 \$/kW_{el} reduziert werden können. Dieses Ziel wurde jedoch nicht erreicht. Heute liegen die Modulkosten bei ca. 1.300 bis 1.800 €/kW.

Bei einem Wachstum um den Faktor 100 in den nächsten fünf Jahren würde bereits ein Kostendegressionsfaktor von 0,9 ausreichen, um die Modulkosten innerhalb der fünf Jahre zu halbieren. Statistische Auswertungen der Kostendegressionsfaktoren vergleichbarer Branchen zeigen, dass neue Technologien einen solchen Kostendegressionsfaktor meist sogar übertreffen.

¹² World Information System on Energy (WISE): „Ergebnisse der Arbeitsgruppe Charpin-Dessus-Pellat: Prospektive wirtschaftliche Analyse der Atomkraft in Frankreich“. Paris 2001

¹³ U.S. Department of Energy: „Advanced Microturbine Systems, program plan for fiscal years 2000-2006“. 2000

¹⁴ z.B. bietet Capstone kommerziell Mikrogasturbinen erst seit 1998 an

Mikrogasturbine

Bei der Abschätzung zukünftiger Modulkosten darf nicht vergessen werden, dass sich die geplante Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades (wie oben beschrieben) auf Grund eventuell teurerer Werkstoffe negativ auf die Modulkosten auswirken kann.

Lebensdauer/Emissionen

Expertenkreise prognostizieren für Klein- und Mikroturbinen bis 2030 eine Verminderung der CO₂-Emissionen von 661 g/kWh auf 514 g/kWh. Im selben Zeitraum sollte sich auch die Lebensdauer von 15 auf 20 Jahre und bis 2040 auf 25 Jahre erhöhen.

Sollten die angestrebten höheren elektrischen Wirkungsgrade erreicht werden, führt das nur über höhere Verbrennungstemperaturen, einhergehend mit höheren NO_x-Emissionen (vgl. Absatz Wirkungsgrade)

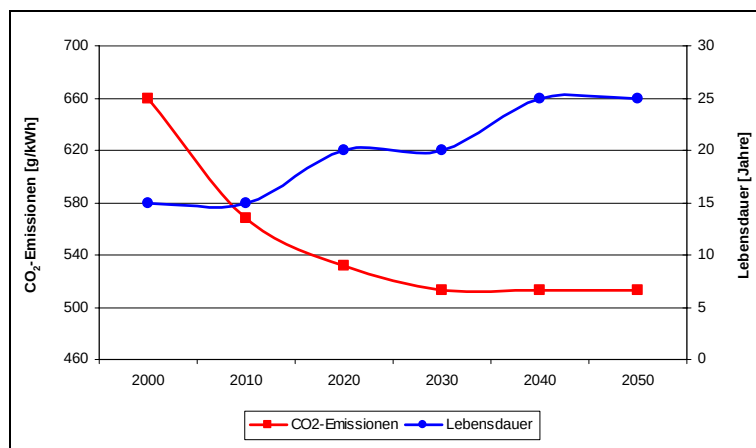


Bild: Erstellt auf Basis von WISE 2001

Abbildung 3.10: Im Jahr 2000 prognostizierte Entwicklung der CO₂-Emissionen und Lebensdauern von Mikrogasturbinen

Brennstoffe

Nahezu alle Hersteller von Mikrogasturbinen arbeiten heute an der Verwendung regenerativer Brennstoffe als Ersatz für das bisher hauptsächlich eingesetzte Erdgas.

Auf Grund ihres Aufbaus sind Mikrogasturbinen besonders für den Einsatz regenerativer Gase wie Klärgas, Deponie- oder Biogas geeignet. Ein Einsatz solcher Gase in Kolbenmotoren wird wegen der Bildung von schwefliger Säure gefürchtet. Gelangt diese in den Ölkreislauf, können als Folge der chemischen Belastung die ölgeschmierten Lager schneller verschleifen. Im Gegensatz dazu ist bei der Mikrogasturbine die schnell laufende Antriebswelle das einzige bewegliche Bauteil. Wird die Antriebswelle darüber hinaus auch noch luftgelagert, wie z.B. bei den Mikrogasturbinen von Capstone, so ist überhaupt kein Schmiermittel mehr nötig. Dadurch werden die bei Kolbenmotoren auftretenden Korrosionsprobleme aufgrund des Schwefelwasserstoffs im Biogas vermieden.

Capstone-Turbinen wurden bereits mit Gasen betrieben, die einen Schwefelanteil von 7 % aufwiesen. Es muss nur der Säuretaupunkt bei Nutzung von nachgeschalteten Wärmetauschern berücksichtigt werden.

Mikrogasturbinen, die mit Standard-Brennkammer und -Brennstoffsystem ausgerüstet sind, können mit einem minimalen Methangehalt von ≥ 35 % noch stabil betrieben werden. Ist ein

Mikrogasturbine

katalytisches Brennkammersystem installiert, können auch Gase mit Methangehalten von bis zu 10 % verbrannt werden. Entsprechende Systeme befinden aber noch im Versuchstadium.

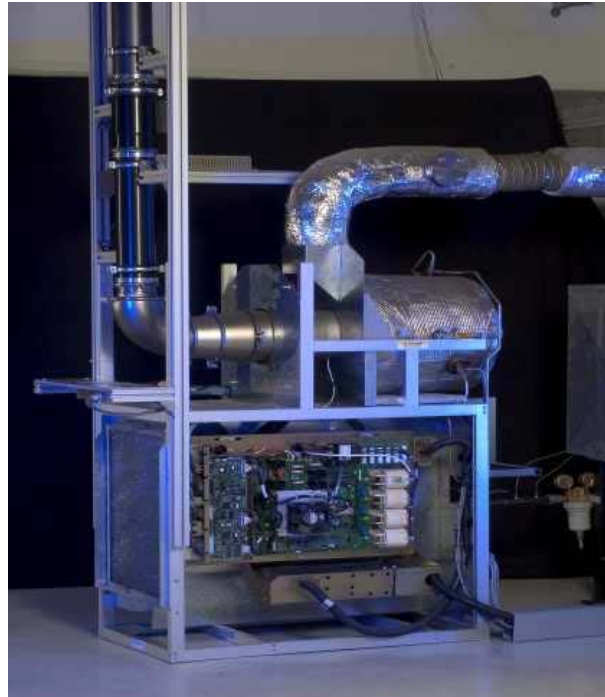


Bild: ISET e.V.

Abbildung 3.11: Biogasbetriebene Gasturbine Capstone C30 im Labor des ISET e.V. in Hanau

Der Einsatz von Pflanzenöl in einer ursprünglich mit Dieselkraftstoff betriebene Mikrogasturbine ist Gegenstand eines Forschungsprojektes. Rapsöl, das hier zum Einsatz kommt, kann nach Ernte und Ölpresse in nativer Form ohne weiteren Energieeinsatz als Brennstoff verwendet werden. Eine Umesterung zu Biodiesel ist nicht notwendig. Der regionale Anbau unter ökologischen Aspekten, die dezentrale und technisch einfache Weiterverarbeitung sowie die verbrauchernahe Vermarktung würden einen regional-wirtschaftlichen Stoff- und Wertkreislauf schaffen, der sowohl hohen ökologischen, als auch ökonomischen und strukturpolitischen Erwartungen gerecht wird.

Für einen Einsatz von Pflanzenölen werden im Rahmen des Forschungsprojektes die Eigenschaften der Öle und deren Einfluss auf den Betrieb von Mikrogasturbinen untersucht. Näher zu betrachten sind dabei die höhere Viskosität und die höhere Zündtemperatur des Pflanzenöls. Hier kann es zu nicht ausreichender Zerstäubung bzw. zu einer nicht vollständigen Verbrennung des Öls in der Brennkammer kommen. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass nicht unerhebliche Partikelemissionen in der gleichen Größenordnung wie bei Kolbenmotoren, die mit Pflanzenöl betrieben werden, auftreten.

Mikrogasturbine

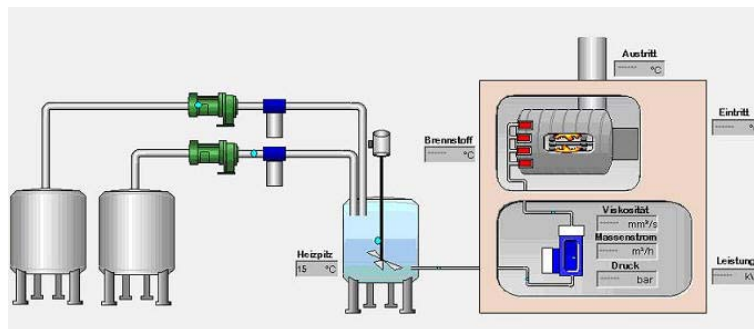


Bild: NOWUM-Energy

Abbildung 3.12: Versuchsaufbau einer mit Pflanzenöl betriebene Mikrogasturbine

Neue Anwendung im Versuchsstadium

Eine neue Anwendungsmöglichkeit für Mikrogasturbinen bietet die Kopplung mit Hochtemperaturbrennstoffzellen (SOFC), wofür das Temperaturfenster der Mikrogasturbine ideale Voraussetzungen bietet. Es wird davon ausgegangen, dass bei Ausschöpfung aller Potenziale dieser Technologie elektrische Wirkungsgrade weit über 60 % erreicht werden könnten.

Marktchancen und -hemmnisse

4 MARKTCHANCEN UND -HEMMNISSE

Hauptkonkurrent der Mikrogasturbine für den Einsatz in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen ist der Kolbenmotor. Stirling-Motoren und Brennstoffzellen werden, wie die Mikrogasturbine, bislang nur in geringen Stückzahlen produziert. Ein Vergleich dieser beiden Alternativen mit der Mikrogasturbine wird deshalb nicht vorgenommen.

Vorteile der Mikrogasturbine gegenüber Kolbenmotoren

Im Vergleich zu Kolbenmotoren weisen Mikrogasturbinen folgende wesentliche ökologische, ökonomische und technische Vorteile auf:

- sehr niedrige Emissionen, wie z.B. NO_x , CO und HC

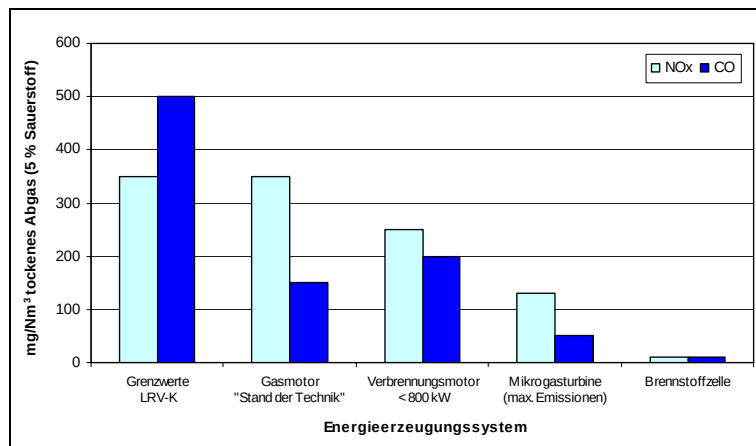


Bild: Erstellt auf Basis von Daten aus SIMADER 2002 und SIMADER 2003

Abbildung 4.1: NO_x - und CO-Emissionen einer Mikrogasturbine im Vergleich zu Kolbenmotoren und Brennstoffzelle (LRV-K: Luftreinhalteverordnung für Kesselanlagen in Österreich)

- geringere Schallemissionen, z.B. ca. 65 dB(A) für ein Capstone-Modul
- fast die gesamte Abwärme fällt auf konstant hohem Temperaturniveau im Bereich um 280 °C¹⁵ an (bei Umfahrung des Rekuperators sogar bis 678 °C, wobei der elektrische Wirkungsgrad auf ca. 15 % sinkt) → Mikrogasturbinen sind sehr variabel den nachgeschalteten Verbrauchern anzupassen
- keine konstante Temperaturspreizung für Vor- und Rücklauf notwendig, wie es beim Kolbenmotor zur Motorkühlung erforderlich ist.
- einfacher Aufbau → das einzige bewegliche Teil ist die Welle mit dem Verdichter, der Turbine und dem Generator-Läufer
- geringes Gewicht, geringe Größe, kompakte Bauweise → Betriebsfläche kann gering gehalten werden

¹⁵ Mit 280 °C lässt sich zwar technisch eine Dampferzeugung mit Abgaswärmetauschern realisieren, dies ist aber energetisch nur sinnvoll, wenn das Speisewasser mit einer sehr kleinen Temperatur vorliegt. Viel effizienter ist die direkte Verwendung des Abgases, z.B. bei Trocknungsprozessen oder als Input für Absorptionskältemaschinen (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung).

Marktchancen und -hemmnisse

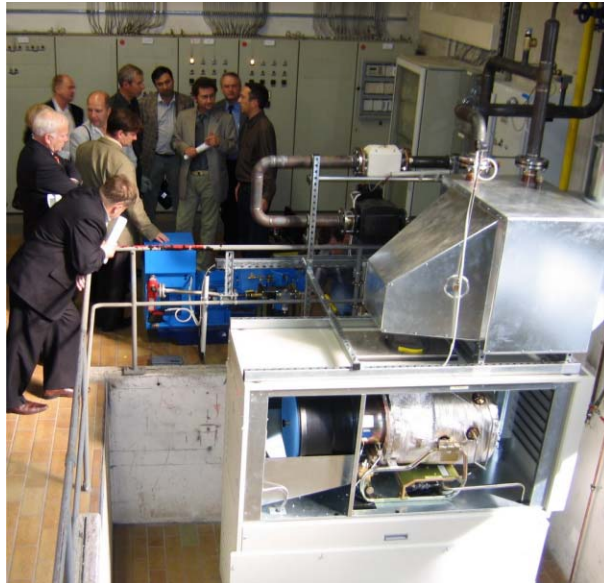


Bild: E-quad Power Systems GbR

Abbildung 4.2: Mikrogasturbine im Staatstheater Wiesbaden als Beispiel für die kompakte Bauweise

- geringer Verbrauch von Hilfsstoffen und geringer Verschleiß, da nur rotierende und keine oszillierenden Bewegungen auftreten → z.B. werden bei kleineren Anlagen Luftlager verwendet, dadurch kann auf den Einsatz von Schmierstoffen vollständig verzichtet werden¹⁶
- Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe → schnelle Umstellung möglich
- durch ein fast konstantes Verhältnis Drehzahl/Volumenstrom ist der elektrischen Wirkungsgradverlust im Teillastbetrieb relativ klein → relativ konstanter Wirkungsgrad über ein breites Lastspektrum

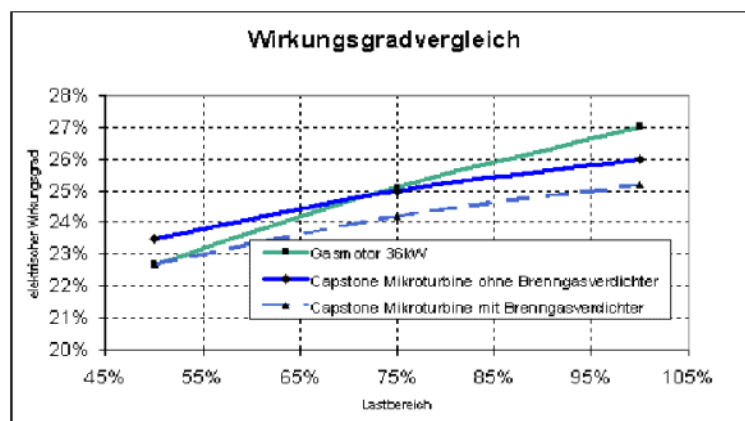


Bild: E-quad Power Systems GbR

Abbildung 4.3: Elektrische Wirkungsgrade einer Mikrogasturbine (mit und ohne Brenngaskompressor) und eines Kolbenmotors

¹⁶ Luftlager können auch bei größeren Anlagen eingesetzt werden. Ergebnisse zu Versuchen mit Mikrogasturbinen bis ca. 200 kW_{el} wurden aber bisher noch nicht veröffentlicht.

Markchancen und -hemmnisse

- aufgrund des „elektronischen Getriebes“ ist keine Synchronisationseinrichtung notwendig
- niedrigere Wartungskosten, bei Wartungsintervallen zwischen 6.000 und 8.000 Betriebsstunden bis zu viermal mehr Betriebsstunden bis zur nächsten Wartung als bei Kolbenmotoren

Nachteile der Mikrogasturbine gegenüber Kolbenmotoren

Die wesentlichen Nachteile gegenüber Kolbenmotoren können wie folgt zusammengefasst werden:

- höhere spezifische Investitionskosten, z.B. ca. 25 % für die *Capstone*-Module C30 und C50 gegenüber Kolbenmotoren vergleichbarer Leistungen¹⁷
- geringerer elektrischer Wirkungsgrad von ca. 3 % bis 5 % (bei den sich im Moment auf dem Markt befindlichen Anlagen)
- Nennleistung bis zu einer Ansauglufttemperatur von ca. 15 °C konstant, bei höheren Temperaturen sinkt der Wirkungsgrad (z.B. bei 30 °C um ca. 3 bis 4 %)

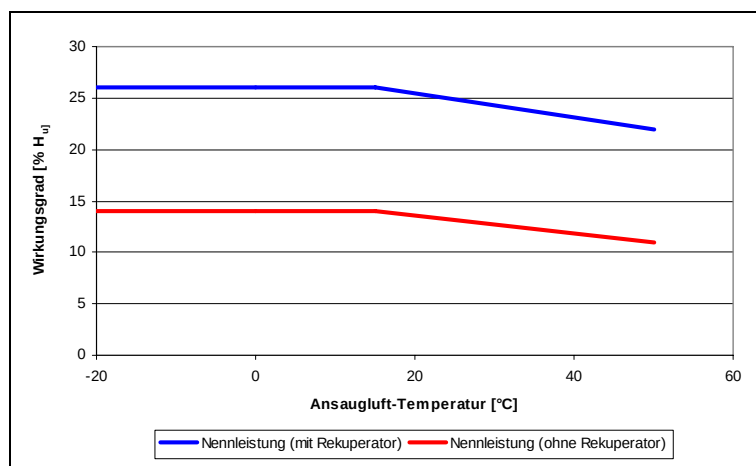


Bild: Erstellt auf Basis von Daten aus HERDIN 2002

Abbildung 4.4: Wirkungsgradverläufe einer Mikrogasturbine mit und ohne Rekuperator in Abhängigkeit der Temperatur der angesaugten Luft

- innerhalb der Brennkammer ist ein Brenngasdruck zwischen 3,5 und 6 bar notwendig, dies macht oft einen Gasverdichter erforderlich → der elektrische Wirkungsgrad sinkt um ca. 1,7 %
- ab einer Aufstellungshöhe von ca. 400 m über N.N.¹⁸ nimmt die Leistung von Mikrogasturbinen ab
- Hochleistungskolbenmotoren erzielen in größeren Leistungsbereichen ein besseres Teillastverhalten

¹⁷ Hier spielt die Stückzahl eine Rolle. Würden die Mikrogasturbinen auf gleiche Stückzahlen wie die Kolbenmotoren kommen, wären sie billiger, da sie weniger Bauteile haben.

¹⁸ Höhe über N.N.: Höhenwert eines Punktes über der Bezugsfläche Normalnull

Markchancen und -hemmnisse

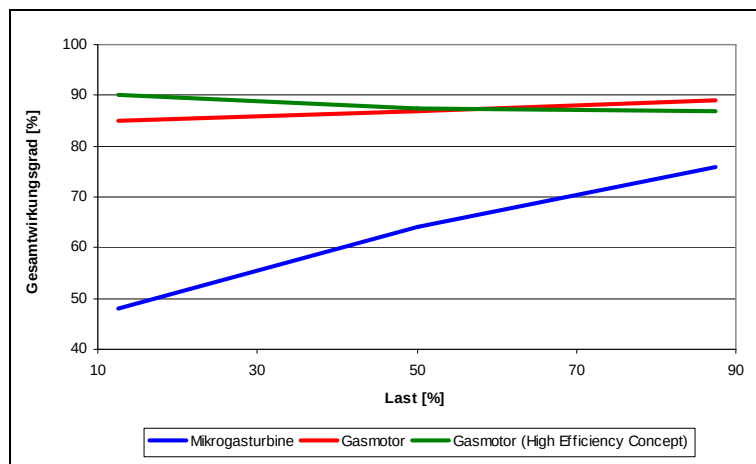


Bild: Erstellt auf Basis von Daten aus HERDIN 2002

Abbildung 4.5: Gesamtwirkungsgrade einer Mikrogasturbine und zweier Kolbenmotor-Konzepte

Hemmnisse der Markteinführung

Auch wenn die Wirtschaftlichkeit einer Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage mit Mikrogasturbinentechnik gegeben sein sollte, sehen sich Nutzer bei der Modernisierung einer bestehenden Anlage bzw. Interessenten bei der Errichtung einer neuen Anlage oft mit einer Reihe von Hemmnissen konfrontiert.

Neben der Abwägung von Vor- und Nachteilen der konkurrierenden Technologien sind dies fehlende Finanzmittel bzw. eine hohe Kapitalbindung bei der Investition, fehlendes Know-how und komplexe Betriebsweisen.

Tabelle 4.1: Überblick über die Vor- und Nachteile der Mikrogasturbine

Vorteile	Nachteile
- niedrige Emissionswerte - Abwärme fällt auf konstant hohem Temperaturniveau an → erweiterte Einsatzmöglichkeiten - keine konstante Temperaturspreizung für Vor- und Rücklauf notwendig - einfacher Aufbau - geringes Gewicht, geringe Größe, kompakte Bauweise - geringer Verschleiß - geringer Verbrauch von Hilfsmitteln - verschiedene Brennstoffe bei geringem Umstellungsaufwand nutzbar - relativ konstanter Wirkungsgrad über breites Lastspektrum - niedriger Wartungsaufwand, niedrige	- hohe spezifische Investitionskosten - geringer elektrischer Wirkungsgrad → dadurch ist es besonders wichtig, dass die Auslastung mit möglichst vielen Volllaststunden gesichert ist - mit höheren Ansaugtemperaturen sinkt der Wirkungsgrad - höherer Brenngasdruck notwendig → macht oft einen Gasverdichter erforderlich - Leistung nimmt mit der Höhenlage des Aufstellungsortes ab (unter 400 m über N.N. nicht relevant) - schlechteres Teillastverhalten in größeren Leistungsbereichen

Markchancen und -hemmnisse

Wartungskosten	
----------------	--

Auch die langfristige Tendenz zu kürzeren Heizperioden durch verbesserten Wärmeschutz im Gebäudebereich (z.B. Dämmung der Außenwände) kann sich negativ auf die Rentabilität einer Anlage auswirken. Die freigewordenen Wärmekapazitäten müssen anderweitig verwendet werden.¹⁹ Dies gilt besonders für Anlagenkonzepte mit hohen Investitionskosten, wie Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen mit Mikrogasturbinentechnik, die mehr als andere Technologien auf möglichst lange jährliche Volllastzeiten angewiesen sind.

Ein weiteres Hemmnis für die breitere Markteinführung der Kraft-Wärme-Kopplung/Mikrogasturbinen-Technik könnte sich auch dadurch ergeben, dass bei vermehrtem Einsatz moderner Kraftwerkstechnologien und damit steigenden elektrischen Wirkungsgraden (z.B. 55 % bei hochmodernen Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerken) es zu Vorteilseinbußen bei der KWK-Technologie hinsichtlich der Primärenergienutzung kommt.

Generell stellen Finanzierungsfragen sowie eine nicht leicht zu kalkulierende Wirtschaftlichkeit die entscheidenden Hindernisse dar.

Contracting als eine Möglichkeit zur Überwindung der Hemmnisse

Eine Möglichkeit, die Hemmnisse zu überwinden ist das *Contracting*, bei dem eine externe Firma vor allem die Finanzierung und gegebenenfalls auch den Betrieb der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage und damit die Energielieferung übernimmt. Die Vorfinanzierung der Anlage sowie gegebenenfalls die Kosten für die Energielieferung werden vom Nutzer/Interessenten über einen festgelegten Vertragszeitraum zurückerstattet.

Vorteile und Grenzen des Contractings

Die Übernahme der Energiebereitstellung und -lieferung durch ein darauf spezialisiertes Unternehmen bietet Vorteile für alle Beteiligten:

- für den Kunden (privater oder öffentlicher Contracting-Nehmer):
 - es wird kein eigenes Kapital gebunden
 - Energiekosten können sinken, da der Contractor als Großabnehmer oft günstigere Einkaufskonditionen für Primärenergie, Technik oder Kreditmittel erzielen kann
 - der Contractor verfügt häufig über eine höhere Fachkompetenz in technischen Fragen → Risikominimierung bezüglich der nicht leicht zu kalkulierenden Wirtschaftlichkeit
- für die örtliche Wirtschaft:
 - Contractoren greifen gern auf lokale Handwerksbetriebe zurück, da diese meist mit den Verhältnissen vor Ort vertraut sind
 - mit der anhaltend positiven Auftragslage für Energiedienstleistungsunternehmen (wie z.B. Contractoren) werden neue Arbeitsplätze geschaffen
- für die Umwelt:
 - Ressourcenschonung und Verringerung von Treibhausgasemissionen durch die Realisierung moderner energieeffizienter Anlagentechnik

¹⁹ Eine weitere Möglichkeit, auch bei verringerten Wärmebedarf den wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten, besteht in der verstärkten Erzeugung von Kälte.

Markchancen und -hemmnisse

Bei allen Vorteilen des Contractings stellt ein notwendiger langjähriger Vertragsabschluss sowohl für den Contractor als auch für den Contracting-Nehmer gleichermaßen eine zu überwindende Barriere dar.

Der Contractor verpflichtet sich über Jahre zur vereinbarten Energiebereitstellung und steht damit in der Gewährleistung. Der Contracting-Nehmer muss sich über lange Zeiträume an einen einzigen Energielieferanten binden und setzt sich dem Risiko aus, dass dieser aus finanziellen oder anderen Gründen seinen Verpflichtungen nicht mehr nachkommen wird oder kann.

Contracting-Modelle

Tabelle 4.2: Contracting-Modelle und deren Leistungskomponenten (Entwurf DIN 8930-5)

Contracting-Modell	Energieliefer-Contracting ¹⁾	Einspar-Contracting ²⁾	Finanzierungs-Contracting ³⁾	technisches Anlagenmanagement ⁴⁾
Finanzierung	X	X	X	
Planung/Errichtung	X	X	X	
Betriebsführung	X			
Bedienung	X	X		X
Instandhaltung	X	X		X
Energieträgereinkauf	X			
Nutzenergieverkauf	X			
Einweisung der Nutzer		X		
Garantierte Kosteneinsparung		X		
<u>Synonyme:</u> ¹⁾ Anlagen-Contracting, Nutzenergie-Lieferung ²⁾ Performance-Contracting, Energie-Einspar-Contracting ³⁾ Third-Party-Finanzing, Anlagenbau-Leasing ⁴⁾ Betriebsführungs-Contracting, technisches Gebäudemanagement				

Eine Mitgliederbefragung des Verbandes für Wärmelieferung e.V. (2004) ergab folgende Häufigkeiten der Contracting-Formen:

- 82 % Energieliefer-Contracting
- 8 % Einspar-Contracting
- 6 % Finanzierungs-Contracting
- 4 % Technisches Anlagenmanagement

Die vier Contracting-Formen sind selten in isolierter Form anzutreffen und werden vom Contractor oft miteinander gekoppelt angeboten.

Energieliefer-Contracting ist die häufigste und auch erfolgreichste Form des Contracting am Markt. Es wird hauptsächlich bei Neu-, Ersatz- und Ergänzungsinvestitionen von energietechnischen Anlagen angewendet. Energieliefer-Contracting zielt auf die Angebotsseite und

Markchancen und -hemmnisse

betrifft vor allem die Finanzierung von Technologien zur Energieerzeugung, wie z.B. Blockheizkraftwerke.

Je nach Leistungsumfang übernimmt der Contractor die Planung, Errichtung, Finanzierung und den Betrieb mit Instandhaltung und Bedienung der Energieerzeugungsanlage auf eigenes Risiko.

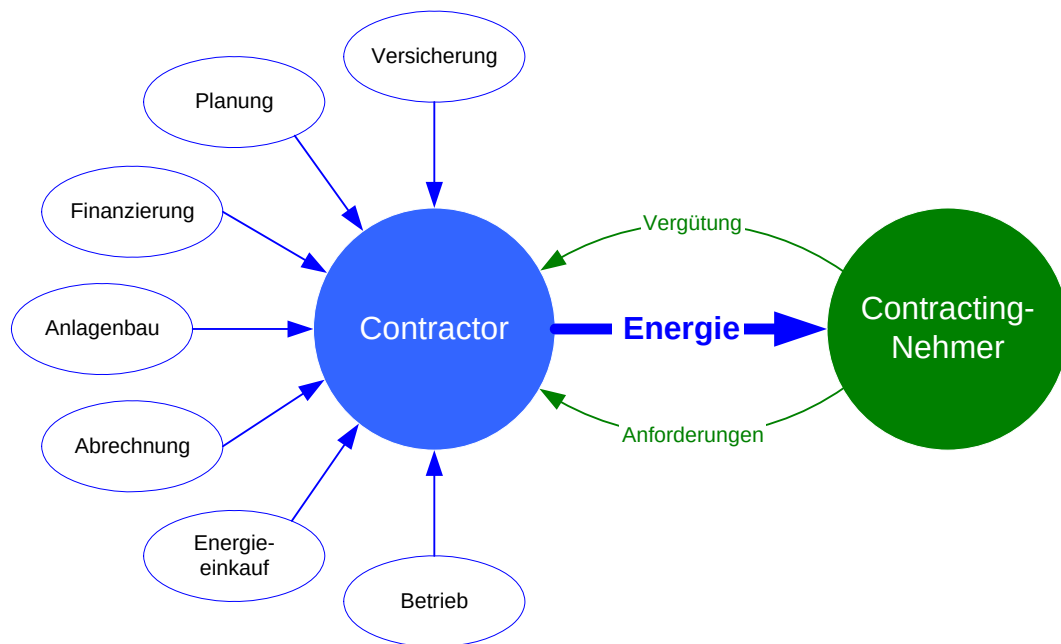


Bild: Erstellt auf Basis von SIMADER 2004

Abbildung 4.6: Informations-, Energie- und Geldflüsse zwischen Kunden und Contractor beim Energieliefer-Contracting

Die Leistungsvergütung des Contractors besteht aus einem Entgelt für die Energiebereitstellung und die bezogene Nutzenergie. Investitionskosten fallen für den Contracting-Nehmer nicht an. Die Tarife werden im Vorfeld vereinbart. Deshalb liegt das unternehmerische Risiko für die Betriebssicherheit und die Energieausbeute der Anlage ausschließlich beim Contractor.

Deshalb ist es das wirtschaftliche Ziel des Contractors, die Umwandlung der Primärenergie in Nutzenergie so effizient wie möglich zu gestalten, denn davon hängt der Gewinn ab. Im Vordergrund stehen günstige Betriebs- und Bereitstellungskosten. Das damit einhergehende ureigene Interesse des Contractors an effizienter Anlagentechnik und Betriebsführung wirkt sich als „Nebeneffekt“ auch positiv auf den Primärenergieverbrauch und die Emissionsbelastung der Umwelt aus.

Vertiefende Informationen

Im Rahmen des Umweltpaktes Bayern werden u.a. auch die Möglichkeiten der Förderung von Contracting-Maßnahmen untersucht. Die Ergebnisse eines bayernweiten Pilotprojekt stehen im Internet unter <http://www.ffe.de/contracting> zum Download bereit.

Weiterführende Informationen gibt es auch auf der Internetseite des Bundesverbandes Privatwirtschaftlicher Energie-Contracting-Unternehmen e.V. unter <http://www.pecu.de>.

LITERATUR

Der Praxisbericht basiert auf folgenden Literaturquellen, Internetseiten und persönlichen Mitteilungen.

Literaturquellen

- Aschenbrenner, N. (2002): Energieversorgung - Dezentralisierung und Brennstoffzellen: Leise Revolution. Pictures of the Future 1/02, Artikel 19, Siemens AG, Download von <http://www.siemens.com>
- ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umwelt-freundlichen Energieverbrauch e.V. (2001): MikroKWK: Motoren, Turbinen und Brennstoffzellen. Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, Download von <http://www.asue.de>
- ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umwelt-freundlichen Energieverbrauch e.V. (2002): KWK-Gesetz 2002 - Grundlagen, Fördermechanismus, praktische Hinweise. Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, Download von <http://www.asue.de>
- ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umwelt-freundlichen Energieverbrauch e.V. (2003): Die „ökologische Steuerreform“ - Vorteil für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, Download von <http://www.asue.de>
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2004): Leitfaden für die effiziente Energienutzung in Industrie und Gewerbe. Augsburg
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2001): Effiziente Energienutzung in der Industrie. Tagungsband zur Fachtagung am 29.11.2001, Augsburg
- B.KWK - Bundesverband Kraft-Wärmekopplung e.V.: Kraft-Wärme-Kopplung - Chance für Wirtschaft und Umwelt. Download von <http://www.bkwk.de>
- Bard, J.; Krautkremer, B. (2003): KWK-Konzepte im Vergleich. Erneuerbare Energien 4/2003, S. 64 - 67
- Bard, J. (2001): Dezentrale Kraftwärmekopplung - Konversionstechnologien und Einsatzmöglichkeiten. In: FVS - ForschungsVerbund Sonnenenergie (2001): Themenheft 2001: Integration erneuerbarer Energien in Versorgungsstrukturen. Berlin, Download von <http://www.fv-sonnenenergie.de>
- Bauknecht, D.; Bürger, V. (2003): Report zur Entwicklung des Versorgungsektors Strom. Öko-Institut, Verbundprojekt im Förderschwerpunkt „Sozial-ökologische Forschung“ des Bundesministeriums für Forschung und Bildung, Freiburg, Download von <http://www.mikrosysteme.org>
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2005): Erneuerbare Energie in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung, Stand: Juni 2005. Berlin, Download von <http://www.erneuerbare-energien.de>
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; IZES - Institut für Zukunftssysteme (2005): Kleine Kraft-Wärme-Kopplung für den Klimaschutz, Berlin, Download von <http://www.bmu.de>
- BMWA - Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (2003): Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke: Bericht der COORETEC-Arbeitsgruppen. Dokumentation Nr. 527, Berlin
- Bouvy, C., Kuperjans, I. (2004): Mikro-Gasturbinen: Eine neue Technologie zur Kraft-Wärme-Kopplung in kleinen und mittleren Unternehmen?. In VDI-GET (Hrsg.): Expertenforum Entwicklungslinien der Energietechnik 2004, Themengebiet Rationelle Energieverwendung, Düsseldorf
- Dielmann, K. (2001): Mikrogasturbinen - Technik und Anwendung. Brennstoff - Wärme - Kraft, Bd. 53, Nr. 6, S. 6 - 9
- Dielmann, K. (2003): Betrieb einer Mikrogasturbine mit Pflanzenöl. Forschungsprojekt der FH Aachen im Fachbereich 3 Angewandte Naturwissenschaften und Technik, Aachen, <http://www.fh-aachen.de>
- Dielmann, K. (2002): Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit Mikrogasturbinen. NOWUM-Energy/FH Aachen im Auftrag des Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Aachen, Download von <http://www.nowum-energy.com>
- Dienhardt, H.; Nitsch, J. (1999): Ökologische Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung. In: Einführung für BHKW-Plan, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, Stuttgart

Literatur

- Dronnikov, D.; Steuber, D.; Schulz, W. (2003): Integrierte Mikrosysteme der Versorgung - Sektorreport Gas. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Berlin, Download von <http://www.ewi.uni-koeln.de>
- Elcher, H.; Rigassi, R.; Meier, R.; Bhend, M.; Rognon, F.; Rüegg, K.; Zeller, U.; Graber, W.; Pauli, H. (2003): Zukünftige Marktbedeutung von WKK-Anlagen mit 1 - 1000 kW elektrischer Leistung. Dr. Eicher + Pauli AG im Auftrag des BFE - Bundesamt für Energie, Bern, Download von <http://www.energie-schweiz.ch>
- EnBW - Energie Baden-Württemberg AG (2003): Innovationsbericht 2002. Karlsruhe
- Fritz, B. (2004): KWKK-Kälteversorgungssysteme in der Praxis Beispiele für energieoptimierte Systeme. Beitrag zum Workshop „Aus heiß mach kalt IV: Neues aus der Kältetechnik“ am 29.04.2004, ISUE FraunhoferInstitut Umwelt-, Sicherheit-, Energietechnik UMSICHT
- Gampe, U.; Haier, E.; Vogeler, K.; Will, G. (2003): Entwicklungen im Turbomaschinenbau und Beiträge der Dresdner Hochschulforschung. Beitrag zum 35. Kraftwerkstechnischen Kolloquium der TU Dresden am 23./24.09.2003, Dresden, Download von <http://www.tu-dresden.de>
- Genath, B.: Neubau der Berliner Vertretung des Landes Nordrhein-Westfalen - Mit Mikro-Gasturbine und Brennstoffzelle. CCI.Net vom 25.10.2002, <http://www.cci-promotor.de>
- Gobmaier, T.; Endres, M.; Köhler, D: Erprobung von Contracting in gewerblichen Unternehmen. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE) und Energiewirtschaftliche Konzepte GmbH (enwikon) im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, München, Download von <http://www.ffe.de>
- Golbach, A. (2004): Die Zukunft des Erdgases heißt Kraft-Wärme-Kopplung. Gaswärme International 1/2004
- Grünberg, F. (2005): Kraftwerk im Keller. Technology Review, Dezember 2005, S. 21 - 22
- Hansen U.; Kautz, M. (2003): Simulation von extern gefeuerten Gasturbinen (EFGT-Cycle). In: Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung (VDI-Bericht 1746), Tagung am 11./12.03.2003, Stuttgart
- Herdin, G.R. (2002): Stand der BHKW Technik im Vergleich zu Brennstoffzellen und Mikrogasturbine. Beitrag zur Fachtagung „Blockheizkraftwerke 2002“ am 11./12.04.2002, Leverkusen, Download von <http://energytech.at>
- hessenEnergie - Gesellschaft für rationelle Energienutzung mbH (2004): Mikrogasturbinen im Markt der Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Wiesbaden, <http://www.hessenenergie.de>
- Hildebrandt, E.-A. (2005): Landwirtschaftszentrum Eichhof startet Pilotprojekt mit Mikrogasturbine. Pressemitteilung des LLH - Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen vom 26.05.2005, Bad Hersfeld, <http://www.llh-hessen.de>
- Itjeshorst, C. (2001): Mikrogasturbine für dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung. In: ISET - Institut für Solare Energieversorgungstechnik: Sechstes Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik (Tagungsband), Tagung am 15./16.11.2001, Kassel, Download von <http://www.iset.uni-kassel.de>
- Mainova AG (2002): Panoramabad verfügt über innovative Technik: Mikrogasturbine vermindert CO₂-Ausstoß erheblich. Pressemitteilung der Mainova AG vom 04.12.2002, Frankfurt, <http://www.mainova.de>
- Meixner, H.: Klein-KWK in der dezentralen Energieerzeugung. hessenEnergie - Gesellschaft für rationelle Energienutzung mbH, Wiesbaden, <http://www.hessenenergie.de>
- N.N. (2002): Technologie Portrait Kraft-Wärme-Kopplung. Institut für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik der Technischen Universität Graz im Auftrag der Energieverwertungsagentur (E.V.A.) und des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, Graz, Download von <http://energytech.at>
- N.N.: SOFC-/Gasturbinen-Hybridsystem. Siemens AG, <http://www.powergeneration.siemens.com>
- N.N. (2001): Einsatz einer Mikrogasturbine im Haus der Bayerngas. Haus der Bayerngas GmbH, München, <http://www.bayerisches-energie-forum.de>
- N.N. (2005): Hocheffiziente Flugzeug-Turbine im Netz. Gas- und Wasserversorgung Fulda GmbH, Fulda, <http://www.gvw-fulda.de>
- N.N.: Unser Haus in Berlin. Die Vertretung des Landes Nordrhein-Westfalen beim Bund, Berlin, <http://www.bund.nrw.de>
- N.N. (2003): Erste Mikrogasturbine mit Trigeneration in Österreich. <http://energytech.at>
- N.N. (2001): Erste Mikrogasturbine Österreichs in Voitsberg im Einsatz. <http://energytech.at>
- N.N. (2005): Mutige Ideen für den Klimaschutz. Rhein Main Presse, 02.03.2005, Ausgabe 200

Literatur

- N.N. (2003): Hohe Wachstumschancen - ausgehend von einem relativ schwachen Einstiegsmarkt bei den Technologien: Wärmepumpen, Mikrogasturbinen, Brennstoffzellen (ab ca. 2008). Saarländische Perspektiven für Zukunftssysteme a, 20.02.2003, IZES - Institut für Zukunftssysteme, Saarbrücken, Download von <http://www.izes.de>
- N.N. (2002): Starthilfe für den Innovationssprung - Kooperation mit dem Handwerk. Initiative Brennstoffzelle, IBZ Nachrichten, Oktober 2002
- N.N. (2002) Den Einsatz von Energieeffizienztechnologie ermöglichen – Ein Leitfaden zur Projektabwicklungsform Contracting. Energieagentur Nordrhein-Westfalen, Wuppertal, Download von <http://www.ea-nrw.de>
- N.N. (2002): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG 2002 - Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz). Bundesgesetz in der Fassung vom 19.03.2002, Download von <http://www.bmu.de>
- N.N. (2000): Energie ideal. Kundenzeitschrift für BHKW-Technik der Köhler & Ziegler Anlagentechnik GmbH, Ausgabe 4 / Dezember 2000
- Ramesohl, S.; Kristof, K.; Fishedick, M.; Thomas, S.; Irrek, W.; Barthel, C.; Hennicke, P.; Merten F.; Brügge vor der, T. (2002): Die technische Entwicklung auf den Strom- und Gasmärkten, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Wuppertal, Download von <http://www.wupperinst.org>
- Rath, H. (2005): Handwerkskammer Münster unterstützt Einsatz regenerativer Energien. IWG Info 1/2005, Gladbeck, Download von <http://www.iwg-gladbeck.de>
- Schmellekamp, Y. (2004): Nutzung von Biogas in Mikrogasturbinen. Beitrag zur Fachtagung „Innovationen in der Biogastechnologie“ am 2.12.2004, Deggendorf, Download von <http://www.regierung.niederbayern.bayern.de>
- Simader, G. (2001): Mikro-Gasturbinen: Making Way for Micro Power. Energy - Die Zeitschrift der Energieverwertungsagentur, Nr. 4/2001, S. 28 - 29
- Simader, G. (2002): Brennstoffzellen- und Mikrogasturbinen-Systeme für die dezentrale Energienutzung. E.V.A. - Austrian Energy Agency im Auftrag der Steirischen Elektrizitäts- und Wasserkraft-AG, Wien
- Simader, G. (2003): Dezentrale Stromerzeugung. Referat im Rahmen des Seminars „Neue Klimaschutztechnologien - dezentrale Stromerzeugung am 11.03.2003, Attnang-Puchheim, Download von <http://www.opet-chp.net>
- Simader, G. R.; Ritter, H.; Benke, G. (2004): Micro- and Mini-CHP Plants in Austria. E.V.A. - Austrian Energy Agency im Auftrag des Directorate-General for Energy and Transport der European Commission, Wien, Download von <http://www.opet-chp.net>
- Suttor, W. (2005): Blockheizkraftwerke - Ein Leitfaden für den Anwender. TÜV Verlag GmbH, Köln
- Thon, M. (2003): Untersuchung einer Mikrogasturbine im Hinblick auf Wirksamkeit und Optimierung des Kraft-Wärme-Kopplungs-Einsatzes. Diplomarbeit am Fachbereich Energie- und Wärmetechnik der Fachhochschule Gießen-Friedberg
- Thuncke, K.; Remmele, E. (2002): Leitfaden Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Materialien Umwelt & Entwicklung Bayern 170, Download von <http://www.bayern.de/ifu>
- Wagner, E. (2004): Warum ist der elektrische Wirkungsgrad von Kernkraftwerken in der Regel niedriger als der von Kohlekraftwerken? Download von <http://www.energie-fakten.de>
- WISE - World Information System on Energy (2001): Ergebnisse der Arbeitsgruppe Charpin-Dessus-Pellat: Prospektive wirtschaftliche Analyse der Atomkraft in Frankreich. Wise-Paris 01/2001, Download von <http://www.bmu.de>
- Würdinger, E.; Wagner, E.; Tränkler, J.; Rommel, W. (1998): Studie über die energetische Nutzung der Biomasseanteile in Abfällen. BIfA - Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und -technik GmbH im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, BIfA-Text Nr. 5, Augsburg, Textfassung unter <http://www.bifa.de>

Literatur

Internetseiten

- <http://www.aif.de>: AiF - Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V., fördert Forschung und Entwicklung zu Gunsten kleiner und mittlerer Unternehmen
- <http://www.bayerisches-energie-forum.de>: Informationsdrehscheibe für die Bereiche Rationelle Energienutzung, Erneuerbare Energien und Neue Energietechnologien in Bayern
- <http://www.bkwk.de>: Bundesverband Kraft-Wärmekopplung e.V.
- <http://www.bhkw-Infozentrum.de>: Informationsplattform zum Thema Blockheizkraftwerke und Kraft-Wärme-Kopplung
- <http://www.bowmanpower.co.uk>: Mikrogasturbinen von Bowman Power Systems Ltd.
- <http://www.carmen-ev.de>: Centrales-Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk - fördert die Entwicklung von ökologisch und ökonomisch attraktiven und wettbewerbsfähigen Techniken zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe
- <http://energytech.at>: Plattform für innovative Technologien in den Bereichen Erneuerbare Energie und Energieeffizienz in Österreich
- <http://www.hamburger-bildungsserver.de>: Zentrale pädagogische Plattform des Bildungssektors in Hamburg (offizieller Landesbildungsserver der Freien und Hansestadt Hamburg)
- <http://www.irenergysystems.com>: Mikrogasturbinen von Ingersoll-Rand Energy Systems
- <http://www.iset.uni-kassel.de>: Institut für Solare Energieversorgungstechnik, Verein an der Universität Kassel e.V.
- <http://www.microturbine.com>: Mikrogasturbinen von Capstone Turbine Corporation
- <http://www.microturbine.de>: E-quad Power Systems GbR - deutscher Vertrieb der Mikrogasturbinen von Capstone
- <http://www.nowum-energy.com>: NOWUM-Energy - Institut in der Fachhochschule Aachen
- <http://www.pro-2.de>: Pro-2 Anlagentechnik GmbH - deutscher Vertrieb der Mikrogasturbinen von Turbec
- <http://www.tapower.com>: Mikrogasturbinen von Elliott Energy Systems, Inc.
- <http://www.thema-energie.de>: Portal für Energiesparen und Erneuerbare Energien betrieben von der Deutsche Energie-Agentur GmbH
- <http://www.turbec.com>: Mikrogasturbinen von Turbec AB
- <http://www.wärmekraftkopplung.de>: Schweizerische Verband für Wärmekraftkopplung
- <http://www.verdesis.ch>: Verdesis Suisse SA - Schweizer Unternehmen, setzt zur Nutzung von Biogas Mikrogasturbinen von Capstone ein
- <http://www.vfw.de>: Verband für Wärmelieferung e.V. - Unterstützung bei der Verbreitung des Energiecontractings mit Wärme, Kälte, Druckluft und elektrischen Strom; Schulung von Betrieben zum Energielieferanten; Sicherstellung der Einhaltung professioneller Standards; Beratung von Betrieben

Persönliche Mitteilungen

Bayerngas GmbH
E-quad Power Systems GbR
HEW Hof Energie+Wasser GmbH
Landesvertretung NRW in Berlin
Professor Dielmann, FH Aachen

Danksagung

Die Verfasser bedanken sich recht herzlich bei

MARCUS MEHLKOPF und BERNHARD PETERS
der E-quad Power Systems GbR

sowie bei

Professor KLAUS-PETER DIELMANN
der Fachhochschule Aachen

für ihre Unterstützung bei der Erstellung dieses Praxisberichtes!