

# Dezentrale Energienutzung mit Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen

Dr. Gerhard Wolkerstorfer  
STEWEAG/Forschung und Kraftwerksstrategie

Die Weltbevölkerung wird nach Schätzungen die 10-Milliarden-Marke bis zur Mitte dieses Jahrhunderts erreichen. Das wären dann 4 Milliarden Menschen mehr als heute. Wie wird ihr Energiebedarf gedeckt werden können, welche Ressourcen werden dafür zur Verfügung stehen und wie werden die Techniken zu Ihrer Nutzung aussehen? Die Antworten auf diese Fragen müssen heute gesucht werden um der Notwendigkeit eines nachhaltigen Wirtschaftens zum Schutze der Lebensgrundlagen kommender Generation Rechnung tragen zu können. Politik und Wirtschaft haben eine ressourcenschonende Umwelt- und klimaverträgliche Energieversorgung zu verantworten. Die dezentrale Energienutzung mit Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen<sup>1</sup> erlaubt in Verantwortung mit den vorhandenen Ressourcen pflichtbewußt umzugehen einen ökologischen Beitrag zu erbringen.

## 1. Einleitung

Im Pflichtbewußtsein der nachhaltigen Energienutzung hat die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) einen sehr hohen Stellenwert in Österreich erlangt. Insgesamt stammen rd. 27 % der Elektrizitätsproduktion aus KWK-Anlagen. Die kombinierte Nutzung von Strom und Wärme muß daher auch auf die dezentrale Energieversorgung im kleinen Leistungsbereich anwendbar sein.

Die Motivation für den vermehrten Einsatz von dezentralen Erzeugungseinheiten in den letzten Jahren sind mehrfach. Die Infrastruktur in vielen Ländern begünstigt eine dezentrale Erzeugung durch den Umstand, daß Standorte für kleinere Kraftwerke häufig deutlich einfacher zu erschließen sind als für Großkraftwerke. Dadurch ist eine lastnahe Erzeugung mit u.U. geringeren Durchleitungskosten erzielbar. Verbrauchsnahe kleine Wärme- und Stromerzeuger können kostengünstig ausgelegt werden. Die Frage, ob dezentrale Erzeugungsanlagen durch einen liberalisierten Markt begünstigt werden, ist stark abhängig von den jeweiligen Rahmenbedingungen.

Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Energietechnologien, wobei die elektrische Leistungsgröße im Sinne der Vergleichbarkeit der Investitions- und Gesamterzeugungskosten festgelegt wurde.

---

<sup>1</sup> STEWEAG-Studie: „Brennstoffzellen- und Mikrogasturbinen-Technologie in der dezentralen Energienutzung“, Durchgeführt in Kooperation mit der Energieverwertungsagentur Wien (E.V.A.)

Technologie	Elektrische Leistung	Investitionskosten [ATS/kW <sub>el</sub> ]	Gesamterzeugungskosten [ATS/kWh <sub>el</sub> ]
Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (fossil)	40 MW	6.500 bis 12.000	0,55 bis 0,80
Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (Biomasse)	0,7 MW	20.000 bis 22.000	0,80 bis 1,00
Kraft-Wärme-Kopplung Brennstoffzellen (Erdgas befeuert)	0,2 MW	15.000 bis 22.000	1,10 bis 1,50
Windkraftanlagen (Windpark, Land)	15 MW	12.000 bis 18.000	0,55 bis 1,30
Windkraftanlagen (Windpark, offshore)	100 MW	20.500 bis 27.500	0,70 bis 1,70
Laufwasserkraftwerke	5 MW	12.000 bis 14.000	0,25 bis 0,45
Gasturbinenkraftwerke	5 MW	11.000 bis 12.000	0,25 bis 0,80
Gasmotorenkraftwerke	5 MW	6.500 bis 11.000	0,45 bis 0,65
Photovoltaikanlagen	5 MW	85.000 bis 130.000	10,30 bis 13,80
Mikroanlagen mit konv. Gas- oder Ölmotoren	50 kW	8.500 bis 22.000	1,00 bis 2,10
mit Mikrogasturbinen	50 kW	4.000 bis 5.000	0,40 bis 0,70
mit Brennstoffzellensystemen	50 kW	12.000 bis ....	1,25 bis 2,10

Tabelle 1: Investitions- und Energiekosten von dezentralen Energieerzeugungsanlagen

## 2. Brennstoffzellen

Die technischen Grundlagen und Charakteristika der einzelnen Brennstoffzellensysteme für die dezentrale Anwendung ist in der Tabelle 2 zusammengefaßt. Insbesondere die PEFC- und SOFC-Systeme stehen für den Einsatz in der Haustechnik zur Verfügung. Die Vor- und Nachteile dieser beiden Technologien und der daraus entwickelten Anlagen sind in der jeweiligen Systemkonzeptierung und in den Anforderungen für die Brennstoffaufbereitung zu sehen, welche in den entsprechenden Wirkungsgraden bzw. im flexiblen/inflexiblen Verhalten beim An- und Abfahren der Anlagen resultieren.

Brennstoffzellentyp	Elektrolyt	Arbeitstemperatur	Brennstoff	Oxidationsmittel
Polymermembran-Brennstoffzellen (PEFC)	Polymer-Elektrolyt	60 bis 90 °C	Wasserstoff aus Erdgas nach Reformierung	Luftsauerstoff
Phosphorsaure Brennstoffzellen (PAFC)	Konzentrierte Phosphorsäure	180 bis 205 °C	Wasserstoff aus Erdgas nach Reformierung	Luftsauerstoff
Karbonatschmelze-Brennstoffzellen (MCFC)	Gemisch geschmolzener Karbonate	rd. 600 °C	Wasserstoff aus Erdgas nach Reformierung	Luftsauerstoff
Oxidkeramische Brennstoffzellen (SOFC)	Keramischer Feststoff $ZrO_2$	800 bis 1000 °C	Wasserstoff aus Erdgas nach Reformierung, Kohlenmonoxid	Luftsauerstoff

Tabelle 2: Charakteristika der verschiedenen Brennstoffzellensysteme für dezentrale Anwendungen

Grundsätzlich stehen in Europa derzeit drei unterschiedliche Brennstoffzellensysteme mit einer elektrischen Leistung von weniger als 25 kW zur Verfügung:

Die Eigenentwicklung von Sulzer Hexis AG, welche auf der oxidkeramischen Technologie basiert und mit Zusatzbrenner und Wärmespeicher ausgerüstet ist.

Die PEFC-Anlagen der Hamburger Gas Consult (HGC)/Dais Analytic Corp., die vorwiegend als stromgeführte Einheit entwickelt wurde und von HGC für europäische Verhältnisse adaptiert wird.

Das Brennstoffzellen-Heizgerät von Vaillant, das vorwiegend für den wärmegeführten Betrieb ausgelegt und ebenfalls mit Zusatzbrenner und Speicher ausgerüstet ist.

Die genannten Anlagen sind derzeit in einem Pilotentwicklungsstatus. Zum Teil verfügen die Firmen über Spezifikationsblätter. Die Firmen kündigen erste kommerzielle Kleinserien bis zum Jahr 2004 an.

### 3. Mikrogasturbinen

Mikrogasturbinen sind kleine Turbomaschinen bis zu einer Leistung von 250 kW<sub>el</sub>, welche für stationäre Anwendungen entwickelt worden sind und in den letzten Jahren eine sehr dynamische Entwicklung hin zu marktfähigen Produkten durchgemacht haben. Mikrogasturbinen sind für die Anwendungsgebiete Grundlast, Strom- und Wärmeerzeugung und für den Inselbetrieb vorgesehen. Die wesentlichen Komponenten einer stationären Gasturbinenanlage sind Verdichter, Brennkammer, Turbine und speziell bei Mikrogasturbinen ein Rekuperator. Für den Einsatz als Blockheizkraftwerk (BHKW) ist ein zusätzlicher Wärmetauscher erforderlich (siehe Abbildung 1 und 2).

Die Anlagen weisen elektrische Wirkungsgrade von bis 30 % (Gesamtwirkungsgrad > 75 %) und sehr niedrige Emissionen auf bzw. werden vorwiegend für den Grundlastbetrieb eingesetzt.

Weltweit wurden vier Firmen für KWK-Anwendungen identifiziert, die für die Markteinführung in Europa von Bedeutung sind: Capstone Turbine Corp., Bowman/Elliott Energy Systems, IR Energy Systems und Turbec AB.

Die angebotenen Systeme unterscheiden sich zum Teil erheblich und sind für unterschiedliche Applikationen entwickelt worden. Der Einsatzbereich spannt sich von der reinen Stromerzeugung (inkl. Inselbetrieb) über den KWK-Einsatz bis hin zu den mechanischen „drive“ Applikationen.

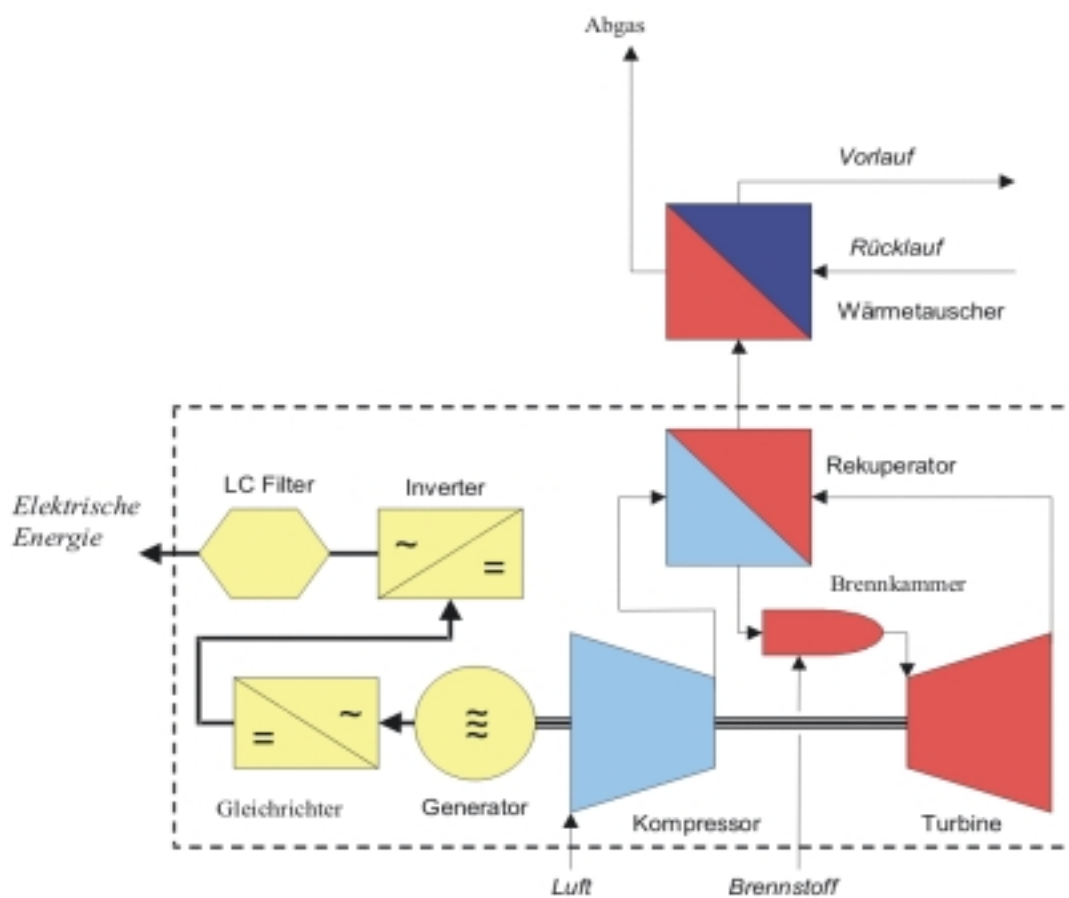


Abbildung 1: Schaltbild einer Mikrogasturbine



Abbildung 2: Capstone Micro Turbine™ (Quelle: Capstone Turbine Corp.)  
Abmaße: ca. L: 2.213 x B: 615 x H: 1.625 mm

#### **4. Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen**

Brennstoffzellen stehen heute nur als Prototyp- und Pilotanlagen für Feldversuchszwecke zur Verfügung. Die daraus abgeleiteten Preise beinhalten noch erhebliche Anteile an F&E-Kosten.

Die Anlagenhersteller bestätigen, daß die Brennstoffzellen für die Gebäudetechnik den gleichen Komfort aufweisen werden wie konventionelle Heizungssysteme. Damit wird vorausgesetzt, dass ein ähnlicher Wartungs- und Instandhaltungsaufwand für die Anlagen erforderlich sein wird wie für die konventionellen Kessel.

Die Preisvorstellungen für derartige Geräte sind als noch sehr vage zu bezeichnen. Die Abbildung 3 zeigt die Mehrkosten gegenüber konventionellen Heizgeräten für drei Anwendungsfälle als Funktion der „tolerierbaren“ Amortisationszeit.

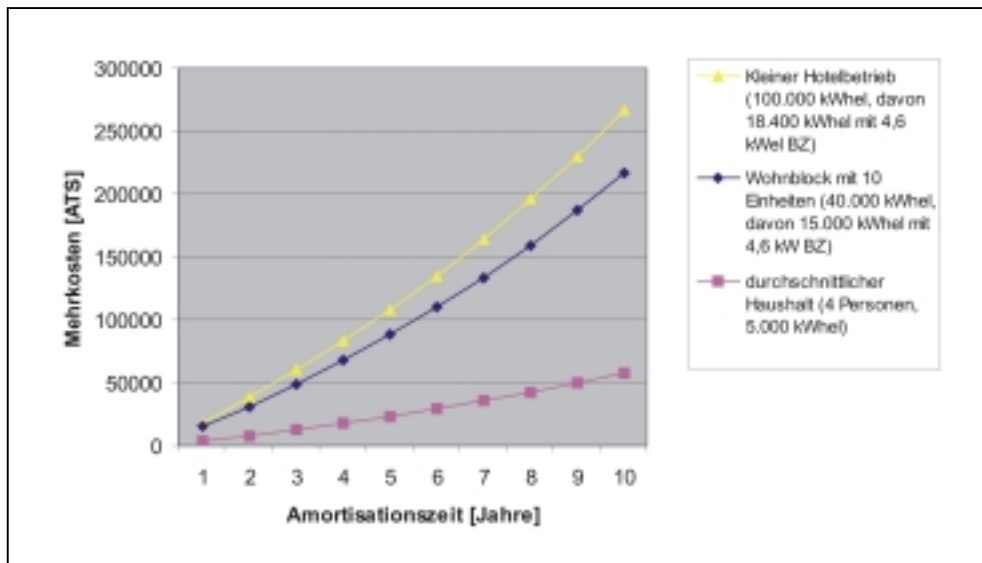


Abbildung 3: Tolerierbare Mehrkosten für Brennstoffzellen-Heizgeräte verglichen mit reinen Brennwertkesseln (Quelle: E.V.A)

Erlöse ergeben sich für alle drei Fallbeispiele durch die vermiedenen Stromkosten.

- (i) Fall 1 (violette Linie) zeigt einen 4 Personen-Haushalt mit einem Jahresstromverbrauch von 5.000 kWh. Ein Mehrpreis der Anlage von ATS 100.000,- wird sich für den Haushalt in einer vernünftigen Laufzeit nicht amortisieren. Dies gilt auch unter der sehr günstigen Annahme, dass der gesamte Stromverbrauch mit der Brennstoffzelle gedeckt wird.
- (ii) Die Fälle 2 und 3 repräsentieren ein kleines Hotel (Jahresstromverbrauch 100.000 kWh davon 18.400 kWh mit Brennstoffzelle) bzw. einen Wohnblock mit 10 Einheiten (Verbrauch: 40.000 kWh davon 15.000 kWh mit Brennstoffzelle). In diesen Anwendungsfällen kommt es bereits zu einer guten Ausnutzung der installierten Leistung. Im Gegensatz zum Haushalt amortisiert sich eine Investition von ATS 100.000,- bereits in vier bis fünf Jahren.

Zum Vergleich: Konventionelle kleine BHKWe ( $5,0 \text{ kW}_{el}$ ,  $12,3 \text{ kW}_{th}$ ) finden in Österreich insbesondere im Gewerbebereich bei einem Anlagenpreis von ca. ATS 140.000,- (entspricht rd.  $28.000,- \text{ ATS/kW}_{el}$ ) eine sehr gute Verbreitung. Als Wartungskosten werden für derartige Anlagen rd.  $0,28 \text{ ATS/kW}_{el}$  angegeben.

In Tabelle 3 sind die Zielpreise für kommerzielle Brennstoffzellen-Heizgeräte zusammengefasst.

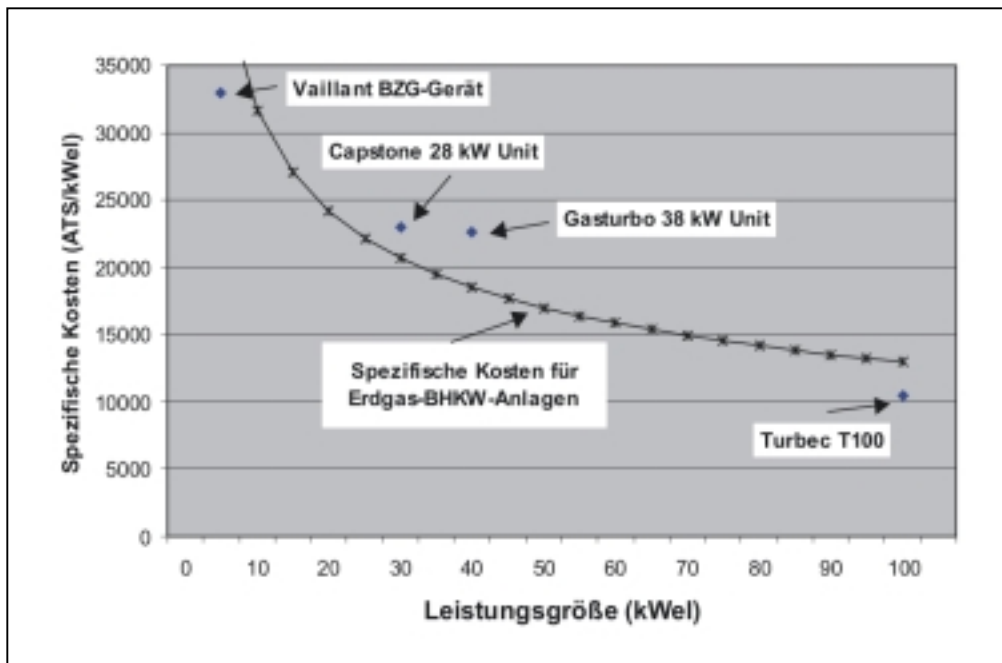
Anlagenhersteller / Vertreiber bzw. Packager	Zielpreis für die kommerzielle Brennstoffzellen-Einheit	Derzeitiger Preis für Prototyp und/oder Pilotanlage
<b>Sulzer Hexis AG</b> 1 $\text{kW}_{el}$ , 3 $\text{kW}_{th}$	SFr 6.300 <sup>1</sup> (ATS 53.500)	-
<b>Hamburger Gas Consult</b> <b>Dais Analytic Corp.</b> <sup>2</sup> 3 $\text{kW}_{el}$ , 8 $\text{kW}_{th}$	Keine Angaben	Voraussichtlich DM 150.000 (ATS 1.056.000) ab dem Jahr 2002/2003
<b>Vaillant</b> 4,6 $\text{kW}_{el}$ , 7 $\text{kW}_{th}$	ATS 150.000 <sup>2</sup> (ab 2004)	Derzeit keine Anlagen verfügbar

<sup>1</sup> Preisangabe inkludiert die Kosten für das Brennstoffzellen-Modul (Preisbasis Jahr 1997).

<sup>2</sup> Preisangabe inkludiert die Kosten für das Brennstoffzellen-Heizgerät, basierend auf 100.000 verkauften Stück pro Jahr im Jahr 2004 (Preisbasis: Jahr 2000)

Tabelle 3: Preise von Prototyp-/Pilotanlagen und kolportierte Zielpreise

Die Richtpreise für BHKW-Anlagen mit Gasmotoren im Leistungsbereich unter 100 kW<sub>el</sub> sind in der Abbildung 4 angeführt. Diese variieren dabei zwischen 10.000,- und 35.000,- ATS/kW<sub>el</sub>. Diese angegebenen Preise beinhalten die Nebenaggregate, Schallemissionsvorrichtungen, Transport und Inbetriebnahme.



BHKW-Richtpreise: „Richtpreisübersicht MHKW-Anlagen 1999 und 2000“,Energierreferat der Stadt Frankfurt/Main

Abbildung 4: Richtpreise von Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen

Anlagenhersteller / Vertreiber bzw. Packager	Richtpreis der Anlage [ATS]	Elektr. Leistung [kW]	Elektr. Wirkungsgrad [ $\eta_{el}$ ]	Richtpreis pro kW <sub>el</sub> [ATS / kW <sub>el</sub> ]	Instand- haltung [ATS/kWh <sub>el</sub> ]
G.A.S. Energietechnik GmbH (Capstone Turbine Corp.)	625.000	28	25	22.200	0,13
Gasturbo (Bowman Power Systems Ltd.)	860.000	38	24	22.600	0,21
Turbec	1,050.000	100	30	10.050	0,15
Durchschnittliches Gasmotor-BHKW (20 bis 100 kW)	500.000 bis 1,400.000	20 bis 100	28 bis 33	14.000 bis 25.000	0,25 bis 0,35

Tabelle 4: Preisübersicht von Mikrogasturbinen

Die Mikrogasturbinen zeichnen sich bereits heute in der Markteinführung durch ähnliche bzw. niedrigere Investitionskosten und niedrigere Instandhaltungskosten als BHKW mit Gasmotoren aus (siehe Tabelle 4). Vorteile hinsichtlich langer Standzeiten müssen erst durch Feldtests bestätigt werden.

Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, daß gegenüber einem durchschnittlichen BHKW niedrigere Stromgestehungskosten erzielt werden können. Die Stromgestehungskosten im Vergleich mit der Mikrogasturbine T100 von Turbec, einer konventionellen BHKW-Anlage und den prognostizierten Zielkosten des DOE (Department of Energy) für Mikrogasturbinen (siehe Abbildung 5).

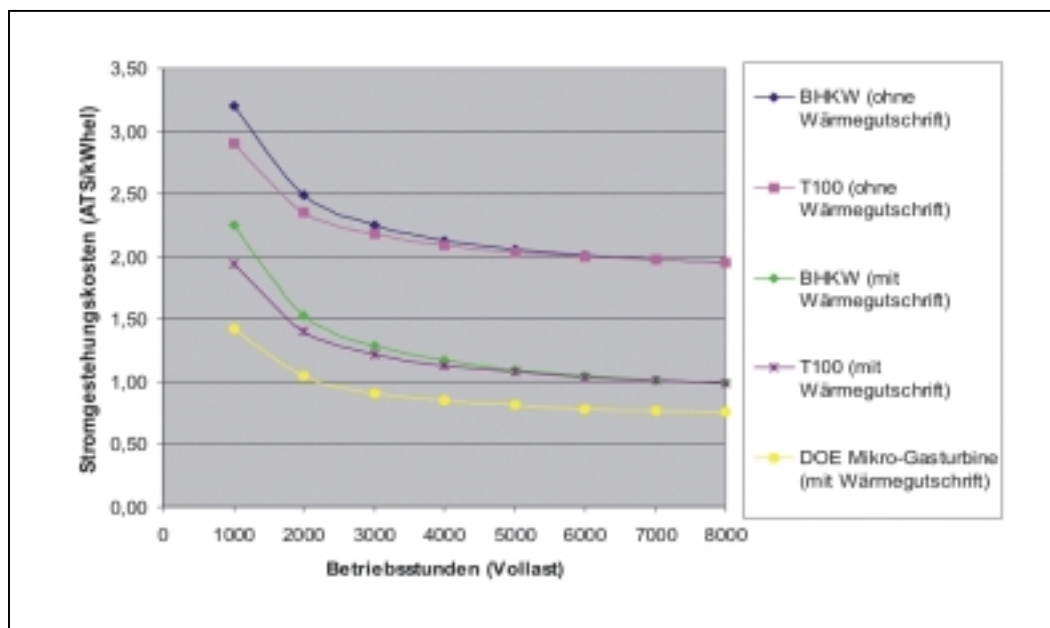


Abbildung 5: Stromgestehungskosten im Vergleich

Wenn die Mikrogasturbine die prognostizierten Richtpreise von US-\$ 500,- und die niedrigen Instandhaltungskosten von ATS 0,10/kWh<sub>el</sub> (Zielvorgaben des DOE Mikrogasturbinen Programms) erreicht sowie günstige Einsatzbedingungen vorliegen (z.B. über 4000 Vollaststunden) überwiegen die preislichen Vorteile gegenüber den Motor-BHKW-Systemen.



## 5. Emissionen von Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen

Die Emissionen sowohl der Brennstoffzellen-Systeme als auch der Mikrogasturbinen liegen deutlich unter den österreichischen Grenzwerten. In der Abbildung 6 werden die Emissionswerte einer PC25-C – stellvertretend für alle Brennstoffzellen-Systeme – und der T100-Anlage der Firma Turbec – stellvertretend für alle Turbinenhersteller – gezeigt. Damit kann die Umweltfreundlichkeit der Brennstoffzellen- und Mikrogasturbinen-Technologie anhand österreichischer Grenzwerte (LRV-K 1989 in der Novelle vom 30.9.1994), der deutschen TA-Luft und anhand der Emissionsdaten (bezogen auf 5 % O<sub>2</sub> im Abgas) von Gasmotoren („Stand der Technik“) dargestellt werden. Weiters finden sich in diesem Diagramm die maximalen Emissionsgrenzwerte für Gasmotoren ≤ 800 kW<sub>el</sub>, welche zur Erlangung einer Förderung durch die Kommunalkredit Austria AG eingehalten werden müssen.

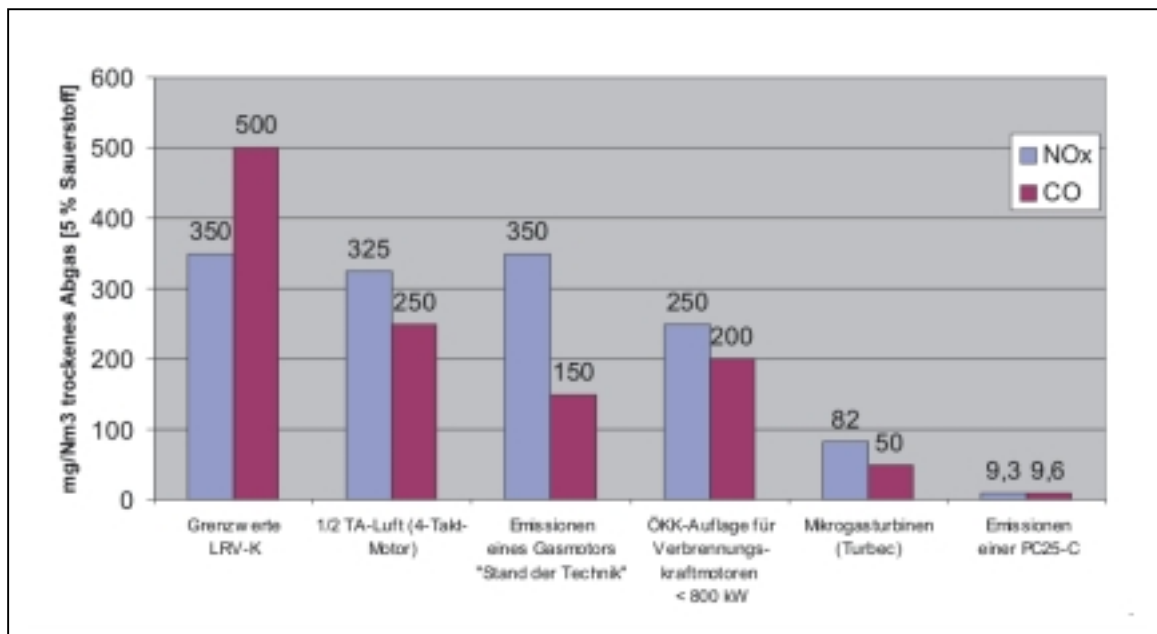


Abbildung 6: Emissionswerte von Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen

Die Brennstoffzellen und die Mikrogasturbinen erfüllen die österreichischen Grenzwerte der Abgasemissionen von CO und NO<sub>x</sub>. Im Vergleich können diese beiden Technologien am Energiemarkt stark etablierte Systeme in den Emissionen weit unterbieten.

## 6. Resümee

Brennstoffzellensysteme im kleinen Leistungsbereich stehen vorwiegend als Pilotanlagen mit kombinierter Strom- und Wärmeerzeugung im Gebäudebereich zur Verfügung. In Europa gibt es derzeit drei Entwicklungs- bzw. Vertriebsfirmen von Brennstoffzellensystemen Sulzer Hexis AG, HGC und Vaillant. Alle drei Firmen kündigen erste kommerzielle Kleinserien bis zum Jahr 2004 an. Die Motivation für die Entwicklung derartiger Systeme wird von den Firmen damit beantwortet, daß Wettbewerbsvorteile hinsichtlich Emissionen, elektrischer Wirkungsgrade (auch im Teillastbetrieb) und flexiblen Betriebsweisen (gilt für PEFC-Systeme) gegenüber konventionellen Systemen gegeben sind und daß davon mittelfristig Marktvorteile erwartet werden.

Aufgrund der vermehrt einsetzenden F&E Aktivitäten in Bezug auf die PEFC-Systeme wird erwartet, daß sich der Entwicklungsstand gegenüber den SOFC-Systemen in den nächsten Jahren egalisiert. Die Anzahl der publizierten Testdaten hält sich bis dato in Grenzen.

Insbesondere das kombinierte Brennstoffzellen-Heizgerät von Vaillant, das eine Weiterentwicklung der klassischen Brennstoffzellen-Heizgeräte darstellt, kann als ein zukunftsweisendes System bezeichnet werden. Vaillant bringt zudem als einzige europäische Brennstoffzellen-Firma ein ausgedehntes Vertriebs- und Supportsystem ein, das bei der Markteinführung von besonderer Bedeutung ist.

Die Herausforderungen für die weitere Entwicklung der Brennstoffzellensysteme sind vorwiegend darin zu sehen, daß innerhalb der nächsten Jahre ein technologisch möglichst ausgereiftes Produkt zu konkurrenzfähigen Marktpreisen angeboten werden kann. Dies stellt sowohl an die Entwicklungsfirmen als auch an die Vertriebsfirmen derartiger Anlagen hohe Anforderungen. Um die installierten elektrischen Leistungen insbesondere im Haushaltsbereich optimal nutzen zu können, sind Betreibermodelle zu entwickeln, die es dem Stromlieferanten oder dem Systembetreiber ermöglichen, auf freie Kapazitäten flexibel zugreifen zu können. Diese optimierte Betriebsweise könnte eindeutige wirtschaftliche Vorteile generieren und damit zur erfolgreichen Markteinführung bzw. Verbreitung derartiger Systeme beitragen.

Kostenseitig wird vor allem bei den Mikrogasturbinen in den nächsten Jahren ein Anlagenpreis erwartet, der deutlich unter dem der Konkurrenzsysteme wie z. B. des Gasmotors zu liegen kommt. Obwohl die Wirkungsgrade der Mikrogasturbinen im Vergleich zu Motor- und Brennstoffzellensystemen deutlich geringer sind, sind diese aufgrund der erwarteten niedrigen Preise bzw. der niedrigen Wartungs- und Instandhaltungskosten eine attraktive Option für die verschiedenen Anwender.

Graz, im Dezember 2001

Dr. Gerhard Wolkerstorfer