

Stand der BHKW Technik im Vergleich zu Brennstoffzellen und Mikrogasturbine

Jenbacher AG

Dr. G.R. Herdin

Einleitung

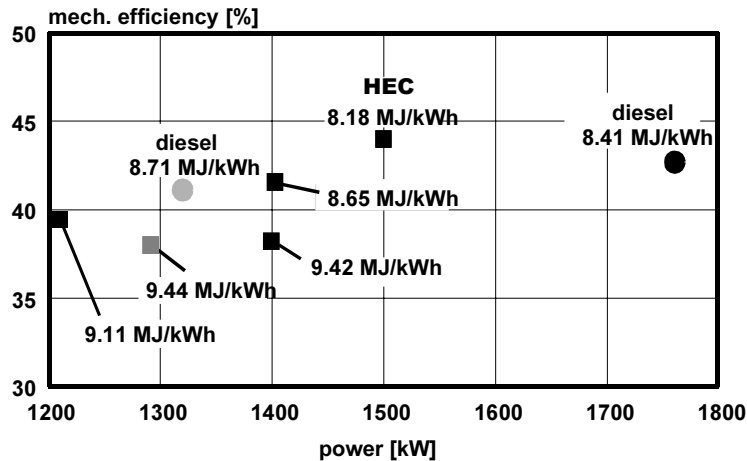
Der Anstieg des Treibhausgases CO₂ in der Atmosphäre wird in erheblichem Maße durch die nicht effiziente Verbrennung von fossilen Kraftstoffen verursacht. Das emittierte CO₂ kann von der Natur nicht mehr gebunden werden und die Wissenschaft führt das auf das „global warming“ zurück. Ein sehr effizienter Ansatz zur Verbesserung der Kraftstoffausnutzung ist die dezentrale Produktion von Strom und Wärme in BHKW-Anlagen. Diese Technologie hat im Sinne der Erreichung der Ziele von Kyoto das größte Einzelpotenzial zur Reduzierung von CO₂. Derzeit wird diese Tatsache bereits in bedeutendem Umfang durch mit Erdgas betriebenen Gasmotoren genutzt. Als nächster Schritt ist die vermehrte Verwendung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Energieträgern sinnvoll. Diesem Bereich sind speziell aus der Verklärung (anaerob) von Biomasse gewonnene Biogase (CH₄ + CO₂) zuzuordnen. Ein weiteres Potenzial wird in der Pyrolyse (Vergasung) von Biomasse gesehen. Die energetische Umwandlung der Primärenergieträger (Erdgas oder die aus Biomasse gewonnenen Kraftstoffe) kann durch mehrere Konzepte erfolgen, diese sind:

- Gasmotoren
- Dampfprozesse inkl. ORC-Prozess
- Stirlingmotor
- (Mikro) Turbinen und
- Brennstoffzellen

Der Gasmotor hat bereits derzeit einen hohen Entwicklungsstand und ist an sich die Messlatte für neue bzw. alternative Konzepte. Wesentlich ist neben der energetischen Gesamtausbeute der Verstromungswirkungsgrad (Stromkennziffer) bzw. die Eigenschaften des betrachteten Systems hinsichtlich der Einsatzbedingungen. Der Dampfprozess hat bezüglich des möglichen Verstromungswirkungsgrades ein bescheidenes Potenzial und die spez. Kosten je kW_{el.} liegen wie auch bei den Stirlingmotoren deutlich über den der Gasmotoren. Diese beiden Systeme werden daher nicht weiter behandelt.

Gasottomotor

Aus heutiger Sicht ist der Gasottomotor sehr weit entwickelt und kann es auch betreffend der erreichbaren Wirkungsgrade leicht mit dem Dieselmotor aufnehmen. Einen Überblick dazu gibt das Bild 1, wo zur besseren Vergleichbarkeit die Kraftstoffverbräuche in MJ/kWh bzw. die zugehörigen Wirkungsgrade (mech.) von modernen Diesel- bzw. Gasmotoren eingetragen sind. Im Leistungsbereich von 1,5 MW erreicht der Jenbacher Motor mit der Bezeichnung J 420 HEC (in den Bildern nur mit **HEC** bezeichnet) einen Spitzenwert von 44 %, auch moderne Dieselmotoren kommen nur mit Mühe an diesen Wert heran.



source: 3/2000

Bild 1: Vergleich des spezifischen Kraftstoffverbrauches Dieselmotoren/Ottomotoren

Das Konzept des Gasmotors ist schematisch in Bild 2 dargestellt und unterscheidet sich nicht wesentlich von PKW-Motoren (außer Otto-Direkteinspritzer).

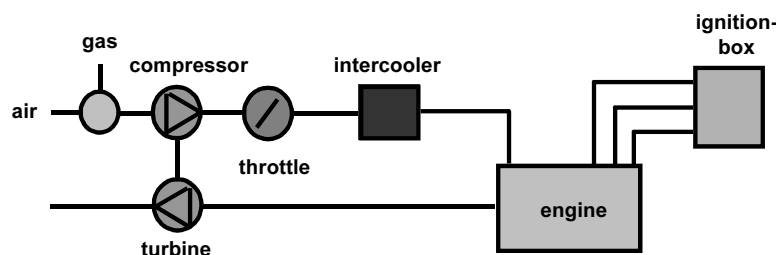
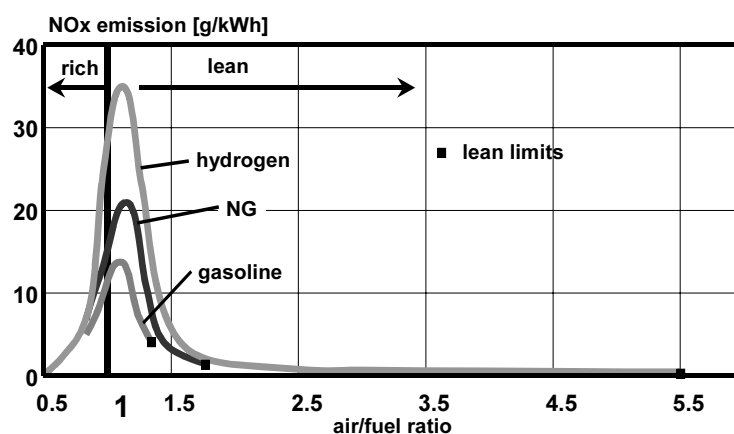


Bild 2: Schema Gasottomotor (aufgeladen)

Primär wird beim Ottomotor das zündfähige Gemisch vor dem Zylinder hergestellt (Gasmischer) und dann im Brennraum mittels der Zündkerze gezündet (sog. Fremdzündung). Zur Einhaltung der NO_x-Emissionen nach dem Stand der TA-Luft wird der Motor bei Luft/Kraftstoffverhältnissen (Lambda) über 1,65 betrieben. Um

trotz des Luftüberschusses auch eine entsprechende Leistungsdichte zu bekommen, werden diese Motoren mit Hilfe eines Turboladers aufgeladen. Nach dem Verdichter ist ein Gemischkühler angeordnet. Das wesentliche Merkmal ist, dass die Lastregelung über eine Drosselklappe erfolgt.

Die charakteristischen Verläufe der NO_x-Emissionen sind im Bild 3 für Erdgas, H₂, NG und Benzin gezeigt. Die Magermotoren zur Erreichung der Emissionsanforderungen nach der TA-Luft, werden je nach dem Verbrennungskonzept im Lambda-Bereich von 1,6 bis 2,1 (als Vorkammermotor) betrieben. Im Fall des Biogases verlagert sich bei gleichen NO_x-Werten der Betriebspunkt zur „fetteren“ Seite. Das „Abmagern“ kann aber nicht uneingeschränkt ausgenutzt werden, da sich dann ein möglicher Betriebspunkt an der sogenannten Aussetzergrenze befindet. Nur H₂- und CO-haltige Gase zeigen durch die weiteren Zündgrenzen eine bessere Eigenschaft, die NO_x-Emissionen noch weiter zu reduzieren.



source: BMW

Bild 3: Typische Verläufe der NO_x-Emissionen über Lambda

Brennstoffzellen

Die Hersteller von Brennstoffzellen aller bekannten Typen haben den Markt der dezentralen Strom- und Wärmeproduktion erkannt und versuchen, ebenso an diesem Markt teilzuhaben. Grundsätzlich können die Brennstoffzellen in zwei Basistypen eingeteilt werden. Es sind dies die Niedertemperatur- bzw. die Hochtemperaturtypen. Die Tabelle 1 zeigt dazu die verschiedenen derzeit bekannten Typen. Alle Brennstoffzellen im Niedertemperaturbereich benötigen im Fall von nicht vorhandenem Wasserstoff einen vorgeschalteten Reformer, um den erforderlichen Wasserstoff zu erzeugen. Die Hochtemperaturbrennstoffzellentypen können z.B. das Erdgas direkt im Stack reformieren und haben daher ein hohes Wirkungsgradpotenzial (siehe Tabelle 1).

Eine analytische Betrachtung zu den Konzeptvorteilen der Brennstoffzelle zeigt das Bild 4. Im Vergleich zur Verbrennungskraftmaschine (Volumsprozess) basiert die Brennstoffzelle auf einen "Flächenprozess".

	AFC	PAFC	PEMFC	MCFC	SOFC
Fuel Cell Types	Alkaline Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Proton-Exchange Membrane Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solide Oxide Fuel Cell
Operation Temperature	< 100° C	200 - 220° C	20 - 160° C	600 - 650° C	800 - 1000° C
Efficiency	> 70 %	40 % > 40% H₂-fuel	40 % > 40% H₂-fuel	> 60 % (expected)	70% (exp.)
Start Up	slow	slow	fast	slow	slow
Load Changing	slow	quick	fast	quick	quick

Tabelle 1: Grundtypen der Brennstoffzellen

Für die Leistungsdichte bedeutet dieser physikalische Zusammenhang, daß die Brennstoffzellentechnologie speziell im unteren Leistungsbereich Vorteile gegenüber ihren Mitbewerbersystemen hat. Derzeit wird von den Brennstoffzellen-Herstellern angenommen, daß sich die Brennstoffzelle speziell im Bereich der Akkumulatoren (Laptops, Videokameras usw.) durchsetzen wird.

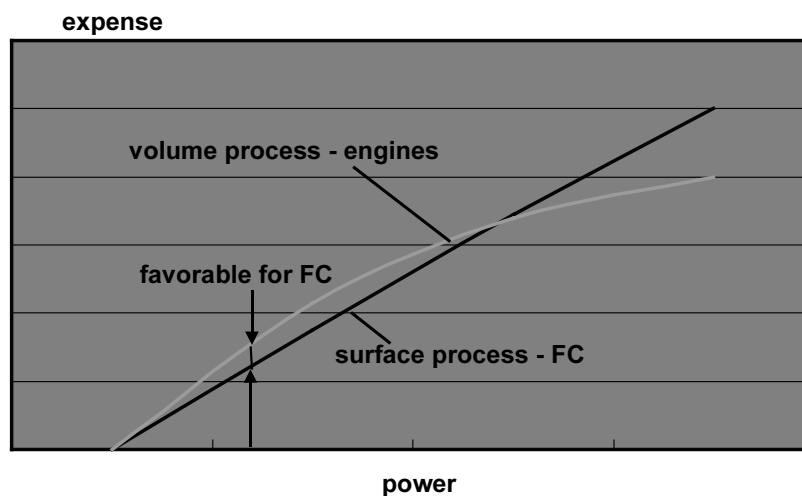


Bild 4: "Die Brennstoffzelle ist ein Flächenprozess"

Für den Bereich der BHKW's muss daher der für ein Projekt vorgesehene Brennstoffzellentyp genau analysiert werden und zwar ob diese Technologie überhaupt Sinn macht oder ob es sich nur um einen Nachweis einer Darstellung eines Anwendungsfalles handelt. Der AFC-Typ scheidet aus Systemgründen (H₂ + reiner Sauerstoff) aus. Dies gilt speziell auch für den vorgesehenen Typ des zu nutzenden Gases, da das „Schiften“ zum erforderlichen H₂ mit erheblichen Aufwand verbunden ist (siehe Bild 19).

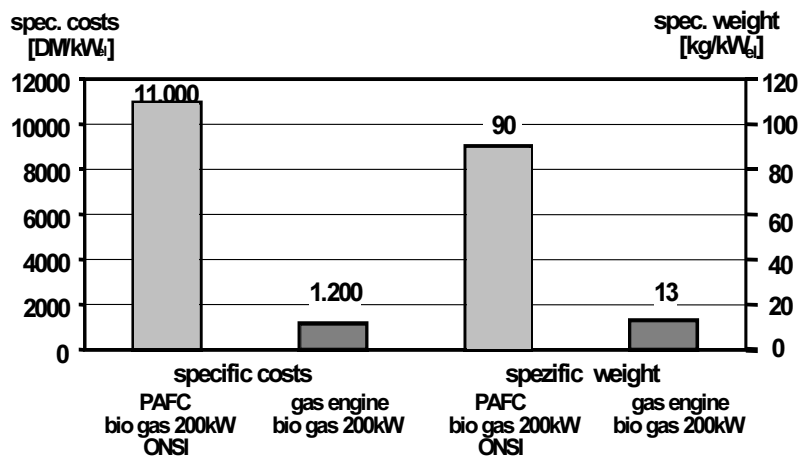
Dazu gibt es aus Sicht des Motorherstellers mehrere wichtige Vergleichsargumente:

1. Vergleich spezifischer Kosten (Bild 5):

Am Markt gibt es derzeit nur eine verfügbare (kommerzielle) Brennstoffzelle des Types PAFC von der Firma Onsi. Die spezifischen Kosten dieses Brennstoffzellentyps sind etwa 10 mal so groß wie von vergleichbaren Gasmotoren (Vergleich Gesamtsystem). D.h. für eine marktfähige Umsetzung müsste eine Förderung von 90 % ausgesprochen werden, um mit einem Gasmotor konkurrieren zu können. Andere Brennstoffzellentypen befinden sich erst im Laborstadium und sind für kommerzielle Anlagen derzeit nicht verfügbar.

2. Vergleich spezifisches Gewicht (Bild 5):

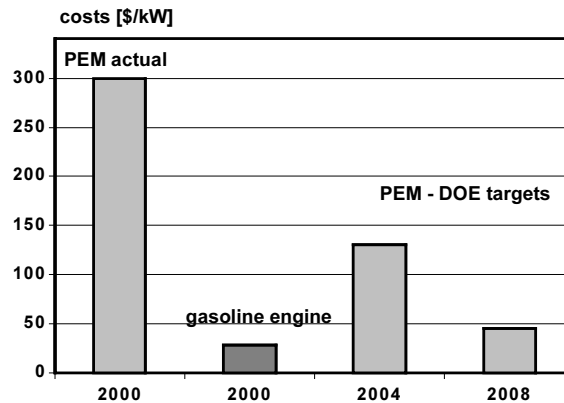
Das spezifische Gewicht einer Brennstoffzelleneinheit (z.B. für Biogas) liegt ebenfalls weit über dem der Gasmotoreinheit, so dass deutlich höhere Sekundärkosten für Fundamentierung, Transport und Sonstiges angesetzt werden müssen. Im Vergleich beträgt das spezifische Gewicht etwa 7 mal soviel wie das des Ottomotors.



source: faircolon – sewage gas FC – Köln Rodenkirchen

Bild 5: Vergleich von spez. Gewicht und spez. Kosten PAFC/Gasmotor

Das DOE (US Department of Energy) hat anlässlich der Brennstoffzellen-Tagung in Graz auch einige Zahlen für den PEM-Typ veröffentlicht. Das Bild 6 zeigt dazu die Kostensituation mit dem Ansatz einer für die Fahrzeuge angenommenen Massenherstellung der PEMFC. Die Herstellkosten würden demnach 300,00 US\$/kW betragen, die derzeit im Labormaßstab hergestellten PEM's kosten noch das Mehrfache. Für die 5 kW PEMFC des Vaillant Minikraftwerkes werden derzeit die spezifischen Kosten mit 2.000,00 €/kW angegeben, möglich scheinen spez. Kosten von 1.000,00 €. Als Vergleich dazu die Kosten eines in den USA gefertigten Gasoline-Motors mit knapp 30,00 US\$/kW. Durch Überleitung zukünftiger Entwicklungsergebnisse geht der Verfasser von Kosten um 45,00 US\$/kW für PEM's im Jahr 2008 aus, also noch immer deutlich teurer als das konventionelle Triebwerk.

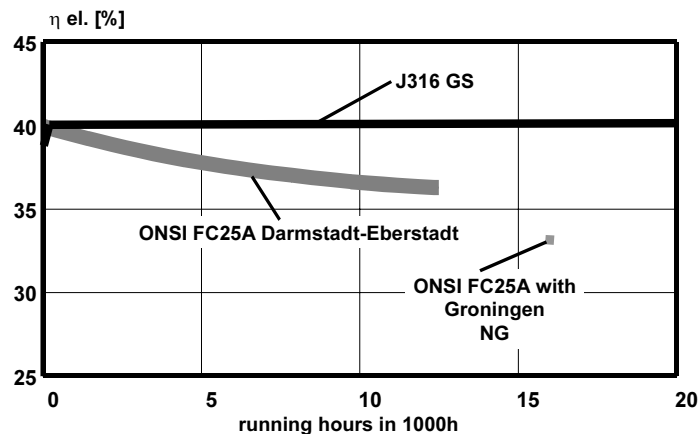


source: DOE 2001 Argon National Laboratory

Bild 6: Kostensituation der PEM im Vergleich zum Ottomotor

3. Lebensdauerverhalten (Bild 7):

Die bisherigen Erfahrungen der Verwendung von Brennstoffzellen des Typs PAFC haben gezeigt, dass sich die guten Wirkungsgrade von anfänglich 40 % über der Laufzeit deutlich verschlechtern. So sind Wirkungsgradeinbußen bis 30.000 Stunden von 10 %-Punkten bekannt ($\eta_{el.}$), damit ist dieser Brennstoffzellentyp einem Gasmotor entsprechend unterlegen, der nach einem Wirkungsgradgewinn (Einlaufverhalten) zum Beginn auf einem konstanten Niveau bleibt.



source: VDI 1195

Bild 7: Wirkungsgradvergleich PAFC-System/Gasmotor

Im Fall der SOFC von Sulzer Hexis gibt es ebenfalls bereits Veröffentlichungen zum Wirkungsgradverlust über der Lebensdauer. Anlässlich der Ueberreuter Manager-Akademie "Brennstoffzellen" am 26. und 27. 02. 2002 in Wien wurden von Thyssengas auch Werte veröffentlicht (Bild 8). Gemäß den Aussagen des Vortragenden machen speziell die Subsysteme (Wasseraufbereitung für den Reformier bzw. Luftfilterung) noch Sorgen. Für das Stack werden derzeit Wirkungsgradeinbußen von 2 - 3 Prozentpunkten pro Jahr angegeben.

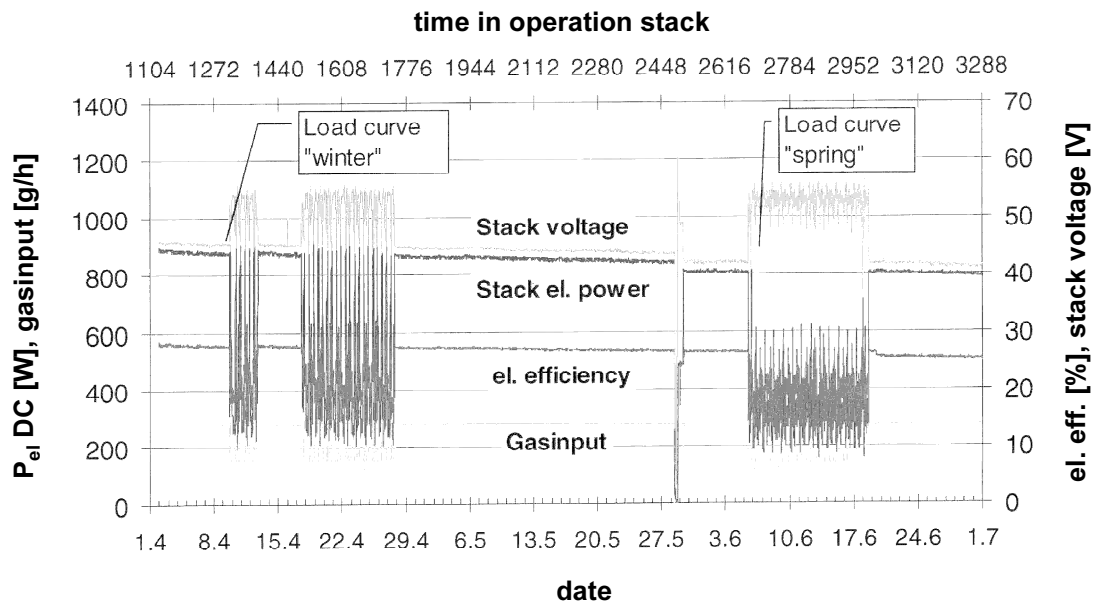
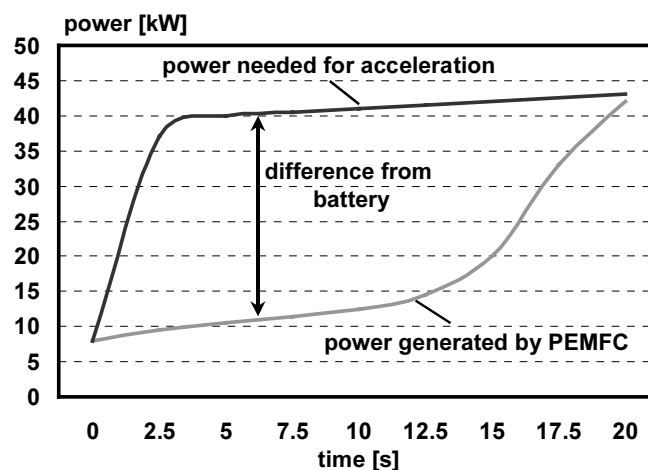


Bild 8: Wirkungsgradprobleme bei der SOFC

4. Instationärverhalten (für Inselbetriebsnetze):

Alle bekannten Brennstoffzellentypen (das gilt für Niedertemperatur- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen) haben im Vergleich zu den Verbrennungsmotoren im besten Fall ein sogenanntes "zügiges" Lastaufnahmeverhalten. Das Hauptproblem ist durch den Reformier gegeben, der auf Grund der physikalisch/chemischen Eigenschaften nur bedingt für den instationären Betrieb optimiert werden kann. Für Fahrzeugantriebe muss dieses „response fault“ durch einen geeigneten Akkumulator kompensiert werden.

Das Bild 9 zeigt die Situation am Fahrzeug Honda FCX – V3, Motoren reagieren hier im Bereich von 40 - 100 msec auf Laststöße. Je nach Betriebspunkt und eingesetzter Regelungstechnik kann der Motor auf Lastschwankungen sehr schnell reagieren (Teillast).



source: Honda FCX-V3, Ballard Mk700 stack (2/2002)

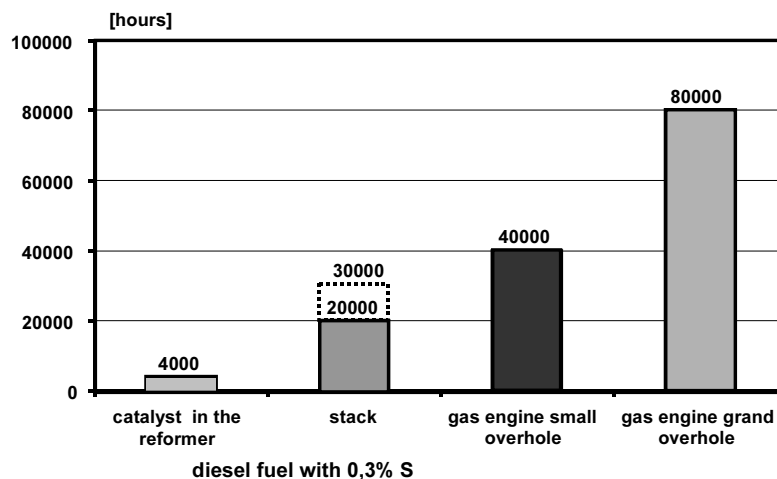
Bild 9: „Response Fault“ von PEM FC-Fahrzeugen bei der Beschleunigung

Nur bei der Verfügbarkeit von reinem Wasserstoff ist im Fall dem PEMFC eine unmittelbare Reaktion auf Laststöße möglich und hängt dann primär von der Peripherie der Brennstoffzelle ab.

Für das "Anfahren" der SOFC von Sulzer Hexis werden derzeit rund 100 Stunden benötigt. Ein Lastwechsellvorgang kann danach "zügig" erfolgen. In Bild 8 sind solche Lastwechsellvorgänge eingezeichnet.

5. Empfindlichkeit der Brennstoffzellen aufgrund diverser mit dem Kraftstoff mitgeführter Schadstoffe:

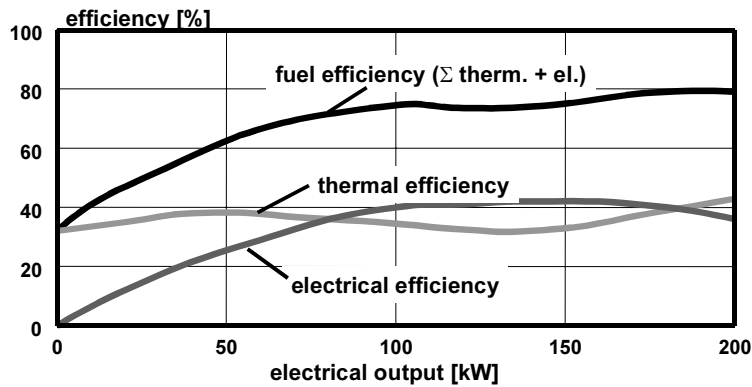
Der Schwefel ist für Brennstoffzellen ein sehr kritisches Element, der die Lebensdauer der Komponenten sowie des "Stacks" nachhaltig beeinflusst. Das Bild 10 zeigt den Einfluss von Schwefel einer militärischen Anwendung einer PAFC. So muss der Katalysator bei einem typischen Schwefelanteil von 0,3 % (USA) alle 4.000 Stunden erneuert werden und je nach Anteil des Schwefels, der zum Stack kommt, wird die Lebensdauer des Stacks beeinflusst. Der Wirkungsgradeinfluss durch diverse Vergiftungen ist im Bild 10 nicht angegeben. Im Vergleich dazu werden typische Überholungsarbeiten bei Gasmotoren nach Laufzeiten von 40.000 Betriebsstunden durchgeführt. Die grundsätzliche Auslegung beträgt bei Stationärmotoren 80.000 Betriebsstunden. Genauer wird zu diesem Thema im Punkt "Schadstoffe für Brennstoffzellen" eingegangen.



source: Navsea , Philadelphia 5/2001

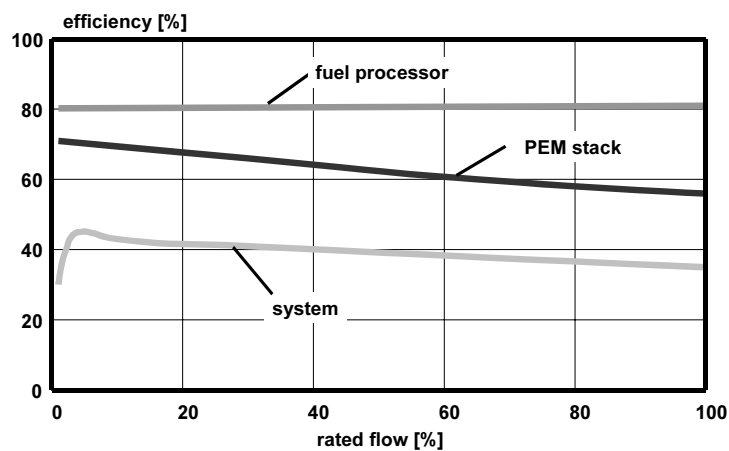
Bild 10: Lebensdauervergleich PAFC System/Gasmotor (Navsea)

Das Bild 11 zeigt das Teillastverhalten der PAFC von ONSI. Zwischen 50 bis 80 % Last überschreitet der Wirkungsgrad (el.) den Schwellwert von 40 %, der thermische Wirkungsgrad liegt zwischen 32 bis knapp über 40 %. Speziell im unteren Lastbereich sinkt der Anteil an nutzbarer Wärme wegen des sinkenden Temperaturniveaus. Das Teillastverhalten einer PEMFC ist speziell im untersten Lastbereich im Vergleich zur PAFC als sehr günstig zu bewerten (Bild 12). Diese Eigenschaft öffnet daher für diesen Typ speziell die Anwendung in Fahrzeugen und hier insbesondere für reinen H₂ als Kraftstoff (NECAR 4). Erforderlich ist für die Zukunft daher eine geschlossene Wasserstoffversorgungswirtschaft. Im Vergleich zu den konventionellen und wesentlich billigeren Motoren ergibt sich bei hohen Lasten kein Wirkungsgradvorteil der PEMFC.



Source: HGC/ONSI

Bild 11: Wirkungsgrad el. und thermisch Teillastverhalten PAFC



source: DOE, Argonne Nat. Lab.

Bild 12: Teillastverhalten der PEMFC

Wird das H₂ aus Erdgas erzeugt, so wirkt sich die ganze Prozesskette nachteilig auf den Wirkungsgrad aus. Die energetische Betrachtungsweise wird als „well to wheel“ bezeichnet. Das Bild 13 zeigt dazu die Situation gemäß einer Veröffentlichung von Daimler Chrysler, gleichartige Ergebnisse sind auch von Studien des MIT (Prof. Heywood) bekannt. Erst durch die großtechnische Gewinnung von solarem H₂ bzw. die Verknappung an fossilen Kraftstoffen wird die Kostenrelation zu Gunsten der BZ verschieben.

- Bei genauerer Betrachtung des Wirkungsgradverlaufes (el.) über der Last (Teillastverhalten) ist festzustellen, dass speziell die PAFC nur im mittleren Lastbereich gegenüber modernen Gasmotoren einen Vorteil hat. Im unteren Lastbereich (unter 40 % Last) ist das Teillastverhalten schlechter als das eines optimierten Gasmotors, im Lastbereich unter 30 % sogar schlechter als das eines Lowcost-Gasmotors (Bild 14).

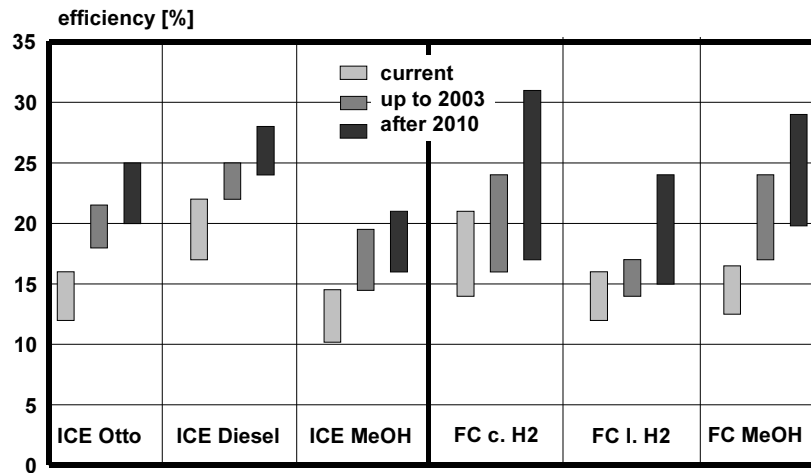
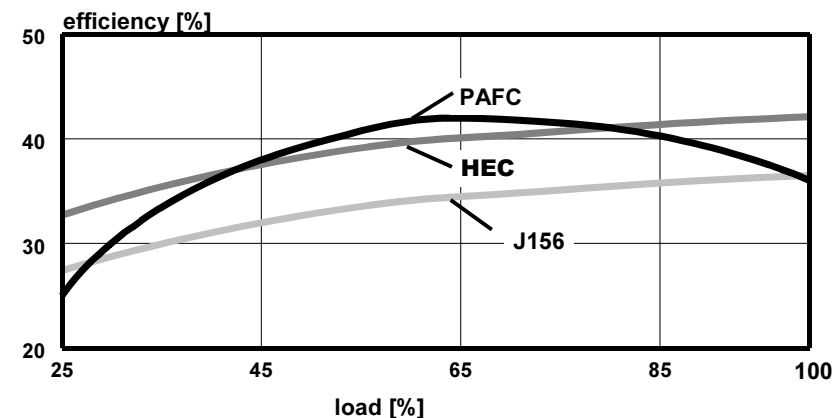


Bild 13: Daimler Nocar „Well to Wheel“

7. Sehr ungünstig ist das Analyseergebnis der PAFC im Fall der Gesamtausbeute (Strom und Wärme) im Teillastfall. Unter 50 % Last sinkt der an sich prinzipiell bereits schlechtere Gesamtwirkungsgrad der PAFC auf für BHKW-Anwendungen untragbare Ausbeuten. Das Bild 15 zeigt den Vergleich der PAFC mit zwei verschiedenen Motorkonzepten. So hat die PAFC bei 25 % Last nur mehr eine Wärmeausbeute von 37,5 % im Vergleich zu 57 % bei den Gasmotoren. Mit diesem Problem sind alle Niedertemperatur-Brennstoffzellen konfrontiert, da im Teillastbereich das Temperaturniveau sinkt und die nutzbaren Wärmen dramatisch reduziert werden. Anbieter von zukünftigen Brennstoffzellen-Systemen kompensieren diesen Nachteil durch die Kombination mit Heizgeräten, um die Gesamtausbeute im Teillastbereich zu verbessern.



Source: HGC/ONSI

Bild 14: Vergleich el. Wirkungsgrad PAFC/Gasmotor

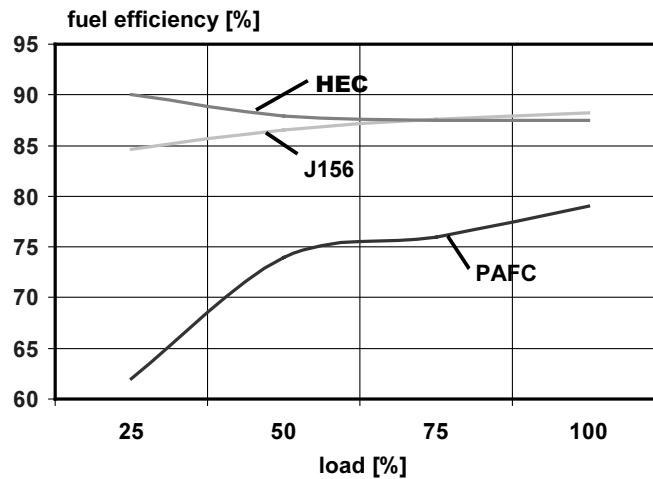


Bild 15: Vergleich Gesamtausbeute Strom und Wärme PAFC/Gasmotor

Das größte Wirkungsgradpotenzial haben die Hochtemperaturbrennstoffzellen (SOFC und MCFC) sowohl bei konventionellen als auch bei aus Biomasse gewonnenen Kraftstoffen. Für größere Anlagen im Bereich von 200 bis 300 kW konnten bereits Wirkungsgrade von knapp 60 % nachgewiesen werden. Für Kleinstanlagen sieht das Wirkungsgradpotenzial jedoch wegen der parasitären Verbraucher (Pumpen usw.) deutlich schlechter aus. So wird der el. Wirkungsgrad der Sulzer Hexis 1 kW_{el.} Anlage derzeit mit knapp 30 % angegeben. Dieser ist daher dem Gasmotor aus Sicht des Energieeinsparungspotenziales sowie der CO₂-Emissionen deutlich unterlegen. Das Bild 16 zeigt dazu die aus den Veröffentlichungen zusammengestellten Ergebnisse.

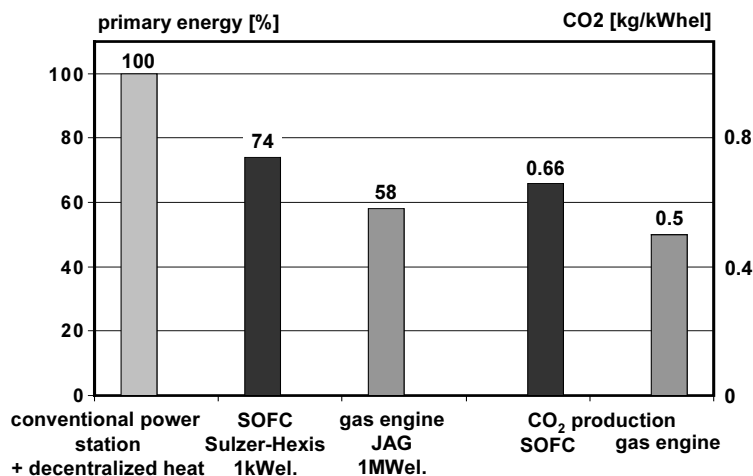


Bild 16: Vergleich der Primärenergieeinsparung SOFC Gasmotor im Vergleich zu konv. Kraftwerkstechnik

Wirkungsgradpotenziale bei Gasmotorensystemen/Brennstoffzellen

Sehr oft wird die sogenannte neue Technologie der Brennstoffzellen als am Beginn der Entwicklung dargestellt. Tatsächlich ist der physikalische Effekt der Brennstoffzelle rund 50 Jahre älter als der Ottomotor (1838/1839), konnte sich aber wegen der Verfügbarkeit des notwendigen Kraftstoffes (H_2) nicht in Szene setzen. D.h., es handelt sich um eine Technologie wie viele andere zur Konvertierung von chem. gebundener Energie in Strom. Die theoretischen Voraussetzungen speziell bei dem el. Wirkungsgrad sprechen an sich für die Brennstoffzellentechnologie, da es sich um eine direkte Wandlung ohne den Umweg über einen thermischen Prozess (Carnot) handelt. Ohne auf weitere Potenziale der BZ-Technik einzugehen, zeigt eine analytische Betrachtung auch weitere Möglichkeiten bei den Otto/Dieselmotoren auf. In der Leistungsklasse bis 1,5 MW konnte durch die Entwicklung des HEC-Verbrennungsverfahrens durch die Jenbacher AG ein Meilenstein eines Gasmotorwirkungsgrades mit 44 % erreicht werden. Bei Leistungsgrößen über 10 MW hat ein Motorhersteller bereits 48,5 % nachweisen können. Die Spezialisten der Motorenindustrie gehen heute davon aus, dass bei 50 % etwa der Plafond erreicht wird. Auch das US Department of Energy geht mit ihrem Technologieprogramm „ARES“ von diesen Wirkungsgradpotenzialen aus (NO_x Level 5 ppm), so dass das angegebene Potenzial bestimmt nicht als Schutzszenario der Motorenhersteller abgetan werden kann. In jedem Fall wird zur Zielerreichung noch einiges Geld investiert werden müssen und Know-How zu erarbeiten sein. Schneller könnten bestehende Technologien zur Wirkungsgradsteigerung (elektrisch) eingesetzt werden. So ist durch einen Kombiprozess mit Dampf ein el. Wirkungsgrad von bereits knapp 50 % darstellbar und das ohne dramatische Verluste auf der „Wärmenutzungsseite“ (typisches Temperaturniveau 70/90°C). Durch die Anwendung eines ORC-Prozesses lassen sich Wirkungsgrade bis 60 % zumindest theoretisch darstellen. Dieser Wert bedeutet dann jedoch mehr oder weniger ein Temperaturniveau wie bei einem Kondensationskraftwerk ohne Wärmeauskoppelung. Im Sinn der Erfüllung der Ziele von Kyoto kann dieser Weg nicht sein, da wir mit den Ressourcen haushalten sollten. Das Bild 17 zeigt dazu die Verhältnisse in graphischer Form.

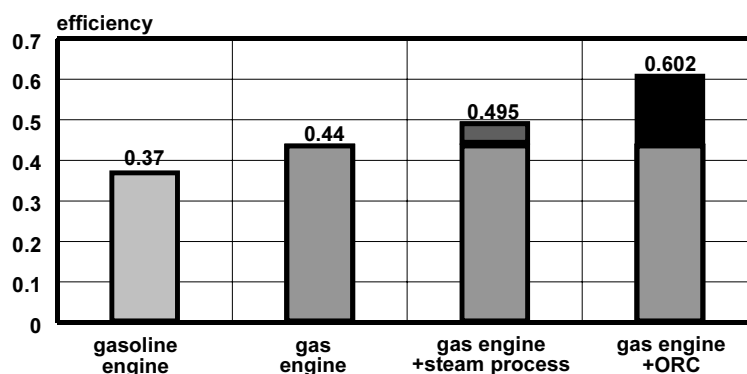


Bild 17: Wirkungsgradpotenziale bei Kombinationsprozessen mit Motoren

Die spezifischen Kosten durch einen „add on process“ erhöhen sich etwa um 40 % im Fall eines simplen Dampfprozesses (1 MW Anlage) bzw. um 100 % bei einem

ORC-Kombiprozess. Aus Sicht des Ingenieurs eine interessante Aufgabe, aus Sicht der wirtschaftlichen Darstellung bei den vorgegebenen Rahmenbedingungen eine Katastrophe. D.h., solche Konzepte konnten sich trotz der deutlich besseren Wirkungsgrade, wie sie bei den BZ Systemen offeriert werden, nicht durchsetzen.

Emissionsreduktion bei Gasmotoren durch die Verwendung von Syngas

Die Kraftstoffkomponente H_2 erlaubt durch die sehr gute Zündwilligkeit eine sehr magere Motoreinstellung. Die Verbrennungstemperaturen können damit so weit abgesenkt werden, dass keine NO_x -Emissionen feststellbar sind. D.h. der Gasmotor hat bei homogener Gemischbildung das gleiche Emissionspotenzial wie die Brennstoffzellen. Diese Fakten werden auch von der Fa. BMW in Form der H_2 -Ottomotorenfahrzeuge genützt.

Muss mit einem Gasmotor ein Zero-Emissionsniveau dargestellt werden, so ist derzeit ein Mix von H_2 , CO und Methan erforderlich. In diesem Fall muss ein Ausgangskraftstoff ebenso reformiert werden. Das aus solch einem Reaktor gewonnene Gasmemisch wird als Syngas bezeichnet. In diesem Bereich gibt es also Parallelen zur Brennstoffzelle. Da die motorische Verbrennung zur NO_x -freien Emissionsdarstellung keinen reinen Wasserstoff benötigt, sind die Wandlungsverluste aber wesentlich kleiner. Je nach verfügbarer Zündanlage bzw. Brennverfahren reichen H_2 -Anteile von 10 bis 15 % aus, um die NO_x -Werte auf unter 5 ppm zu bringen, die Wandlungsverluste liegen dann bei etwa 4 bis 5 %. Die Zusammenhänge sind dazu im Bild 18 zusammengestellt.

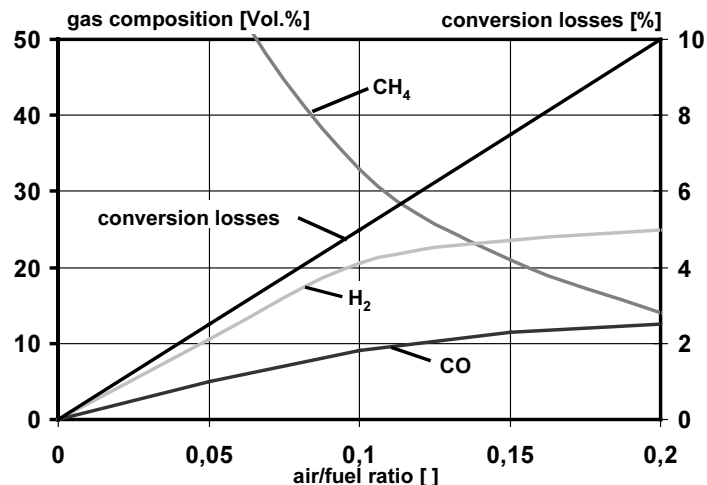


Bild 18: Energieverluste der Syngasherstellung zur Darstellung eines Zero NO_x -Gasmotors

Im Fall der Niedertemperaturbrennstoffzellen ist das CO ein Schadstoff für das Stack und muss „geschifft“ bzw. durch einen Katalysator zu CO_2 oxidiert werden. Die Energiebilanz der Wandlung von Methan zu reinem H_2 ist in Bild 19 gezeigt, die Wandlungsverluste betragen bei diesem Konzept knapp 26,5 %.

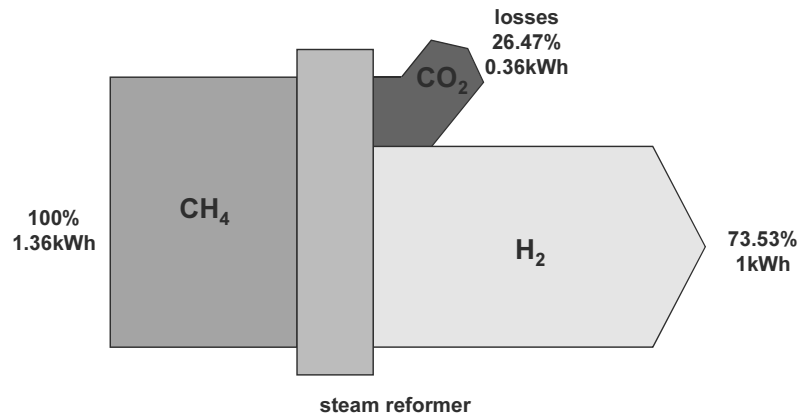


Bild 19: Reformerwirkungsgrad inkl. Schiften

Einfluss der Verbrennungsgestaltung auf den Wirkungsgrad

Der Vollständigkeit halber muss auch auf den Einfluss der Dauer des Verbrennungsprozesses eingegangen werden. Speziell bei der Verbrennungsentwicklung für Gasmotoren hat die Jenbacher AG Pionierarbeit geleistet, als Beispiele sind hier die Verbrennungsentwicklung des HEC-Konzeptes sowie das der großen Baureihe (BR 6) zu nennen. Die Beschleunigung der Verbrennung ist für alle Kraftstoffe ein auszunutzendes Potenzial. Aus diesem Grund wurde auch das Verbrennungskonzept des HEC-Motors (Baureihe 4) auf die kleineren BR 2-Motoren übertragen, der Wirkungsgradgewinn von 3 %-Punkten (bei Biogas) des kleinsten Jenbacher Motors (J 208) auf 39 % ist speziell für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Biomasseanlagen von Bedeutung. Die Potenziale der Thermodynamik sind aus Sicht des Motorentwicklers bei dem als Beispiel angeführten Motor J 208 nicht voll ausgeschöpft, derzeit werden an einer Kläranlage bereits die nächsten Maßnahmen im Feldversuch getestet. Im Bild 20 ist diese noch nicht für die Serie freigegebene Version gezeigt, zusätzlich ist auch die schrittweise Steigerung der Wirkungsgrade des betrachteten Motors eingezeichnet.

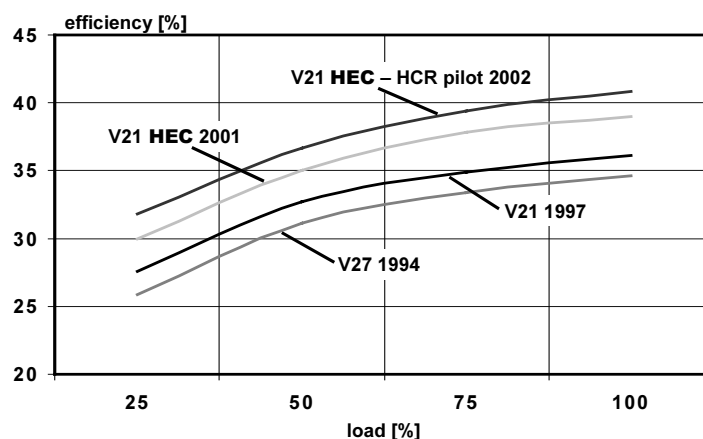


Bild 20: Zeitliche Entwicklung der Wirkungsgrade bei dem für Biogase optimierten Motor J 208

Es konnten somit innerhalb von 8 Jahren der Wirkungsgrad des Motors von 34,5 auf 41 % angehoben werden.

Mikroturbinen

Auch die Mikroturbinen drängen bereits auf den BHKW-Markt und wollen auch Eingang in den Biogas- bzw. Holzgasmarkt finden. Auf den ersten Blick scheint die Technologie auch ausgereift zu sein, da auf entwickelte Turbolader-Komponenten aus dem Nutzfahrzeugbereich aufgebaut wird. Speziell bei den kleinen Turbinen sind die Verlustanteile (Spaltverluste u.a) relativ hoch und daher die Wirkungsgrade im Vergleich zu den Motoren bescheiden. Um dieses Manko zu kompensieren, besteht die Möglichkeit, einen Rekuperator zur Anwärmung der Verbrennungsluft zu verwenden. Das Bild 21 zeigt als Beispiel den Wirkungsgradgewinn durch einen Recuperator bei der Mikroturbine von Capstone.

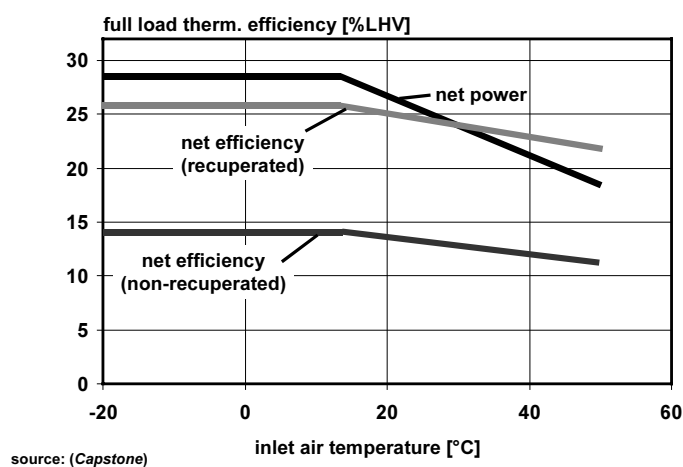


Bild 21: Wirkungsgradverläufe einer Mikro Turbine mit und ohne Rekuperator.

Das Bild 22 zeigt dazu das Fließschema von Luft und Abgasstrom. Der Wirkungsgradgewinn durch den Rekuperator ist mit ca. 12 %-Punkten beachtlich. Zusätzlich ist das typische Verhalten der Gasturbinen in Abhängigkeit der Ansaugtemperatur im Bild 21 gezeigt.

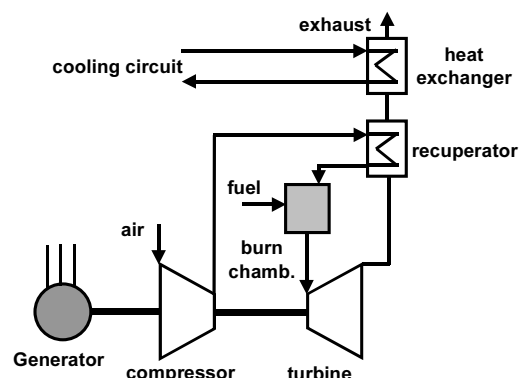


Bild 22: Fließschema einer Mikroturbine mit Rekuperator

Die Nennleistung wird bis zu 15°C gehalten, danach kommt es zu einer Abminderung, die bei durchaus üblichen 30°C bereits eine Minderung bei der Capstone MT von 4 kW beträgt (ca. 13 %). Dieses Verhalten zeigen prinzipiell alle Turbinen unabhängig von der Größe.

Aufgeladene moderne Gasmotoren haben das zusätzliche Potenzial der Auswahl spezieller Turbolader und anderer Möglichkeiten zum Erhalt der Nennleistung (JAG Boost Control; Waste Gate u.a.). Als Beispiel ist in Bild 23 das Potenzial eines anderen Turbolader-Types am Gasmotor J 320 gezeigt. So kann bei gleichem Mitteldruck eine Ansaugtemperatur bis zu 39°C ohne Minderung der Motorleistung akzeptiert werden. Der Effekt der Leistungsabminderung durch den Einfluss der Aufstellungshöhe ist ebenso bei den Mikroturbinen größer als bei den Gasmotoren. Die Auswirkungen sind bei den Motoren in Bild 24 gezeigt.

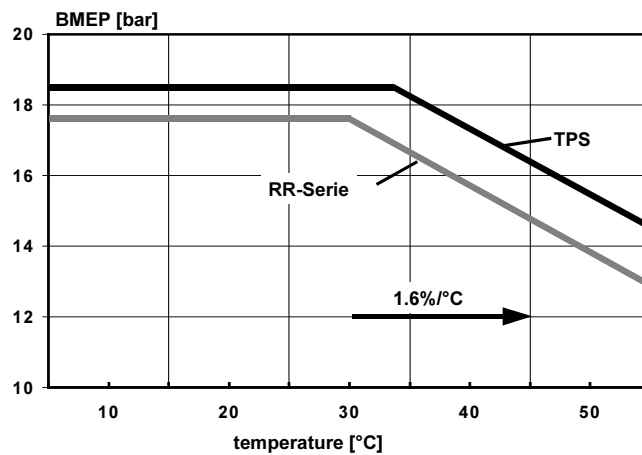


Bild 23: Leistungsabminderung bei verschiedenen Turboladerkonzepten bei Gasmotoren

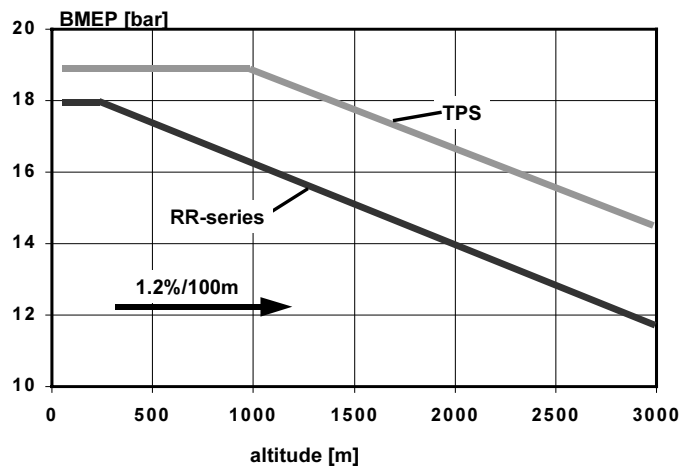


Bild 24: Höhenabminderung bei Turbinen

Ein tatsächlicher Vergleich von Wirkungsgraden lässt sich nur dann darstellen, wenn auf die vorhandenen Drücke im Gasnetz Rücksicht genommen wird. Das Bild 25 zeigt exemplarisch die Situation ebenfalls bei der Capstone Mikro-Turbine. Für die Einleitung des Kraftstoffes in die Brennkammer wird ein Druck von 3,5 bar benötigt, falls dieses Druckniveau nicht vorhanden ist, muss ein zusätzlicher Verdichter vorgeschaltet werden. Im Fall eines typischen Gasvordruckes eines Stadtwerkenetzes bedeutet das dann eine Wirkungsgradminderung von 26 auf 24,3 %. Für Biogase ist die Situation durch den CO₂-Anteil im Gas zusätzlich ungünstiger, hier werden abhängig vom Heizwert dann nur mehr 22 % erreicht. Für den modernen Gasmotor gibt es keine Einschränkung, die Wirkungsgrade bleiben innerhalb der Messgenauigkeit auf gleichem Niveau.

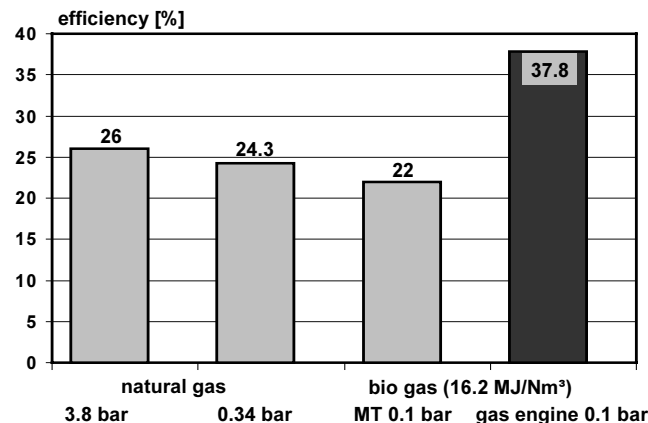


Bild 25: Vergleich der Wirkungsgrade einer Mikroturbine zu einem Gasmotor bei unterschiedlichen Gasvordrücken und Gasqualitäten

Für die BHKW-Anwendung ist speziell auch der Gesamtwirkungsgrad von Bedeutung. Bei Gasmotoren wird meist das Temperaturniveau 70/90°C als Bezugsmaßstab verwendet. Mit diesem Temperaturniveau lässt sich praktisch bei allen Anwendungen eine optimale Einbindung in ein Heizsystem verwirklichen. Durch die Verwendung eines Rekuperators wird bei der Mikrogasturbine das Abgastemperaturniveau soweit abgesenkt, dass die Wärmeausbeute im Vergleich zum Gasmotor dramatisch absinkt. Eine genaue Betrachtung von Datenblättern diverser Mikroturbinenhersteller (Packager) zeigt meist ein Bezugstemperaturniveau von 60/80°C, um den doch erheblichen Unterschied zu den Gasmotoren etwas kleiner aussehen zu lassen. Insbesondere im Teillastbereich ist dieser Effekt sehr von Nachteil für die Mikrogasturbine, da das Temperaturniveau für eine Nutzung zu klein wird (Bild 26).

Den vollständigen Vergleich Mikroturbine zu Gasmotoren verschiedener Leistungen zeigt das Bild 27. Der Gasmotor schneidet bei allen die Wirtschaftlichkeit beeinflussenden Größen deutlich besser ab.

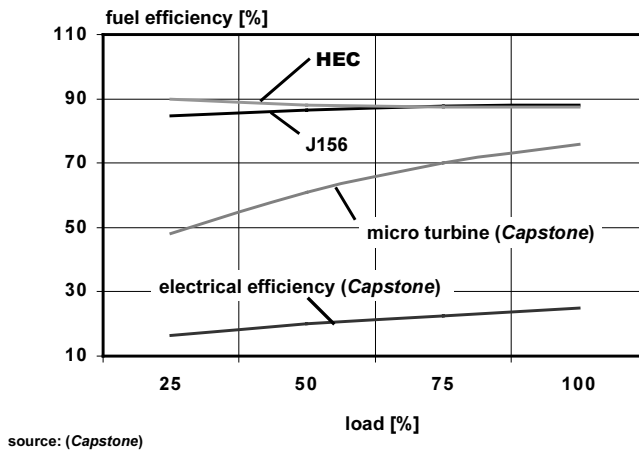


Bild 26: Gesamtwirkungsgrad einer Mikroturbine über der Last

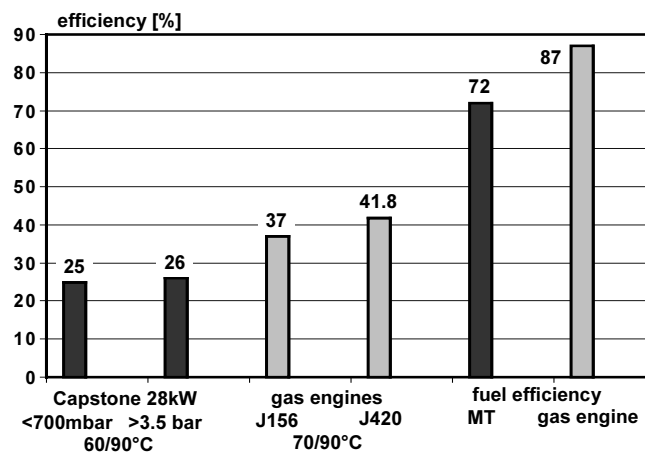


Bild 27: Vergleich der Wirkungsgrade (el. und Gesamtwirk.) von Mikroturbine und Gasmotor

Ein eindeutiger Vorteil der Mikrogastrurbinen gegenüber den Gasmotoren ist bei den Emissionen bei Vollast gegeben (Bild 28).

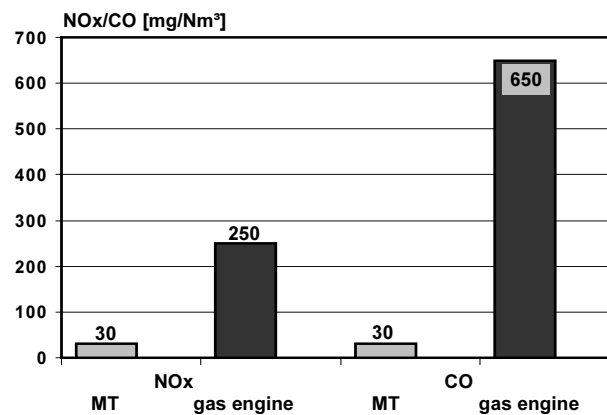


Bild 28: Emissionsvergleich Gasmotor zu Mikrogastrurbine

Bei ausreichender Gasreinigung von Biogasen lassen sich die CO-Emissionswerte (mit Mühe) auf ein ähnliches Niveau bringen. Andernfalls hilft nur eine thermische Abgasnachbehandlung (JAG CL.AIR-System). Bei den NO_x-Emissionen besteht bei Biogasen derzeit kein Verbesserungspotenzial (ausgenommen Gasreforming).

Anforderungen an die Gasqualität für Gasmotoren/Brennstoffzellen und Mikroturbinen

Bei Erdgas sind für Brennstoffzellen und Mikroturbinen die Anforderungen an die Gasqualität leicht zu erfüllen. Im Fall der Nutzung von Biomasse ist die Qualitätsanforderung der genannten Systeme wesentlich größer, so dass für die Reinigung auch erheblich größere Aufwände gemacht werden müssen. Die größten Erfahrungswerte liegen dabei bei den Gasmotoren mit mehr als 50 Jahren vor. Die Verdichtung der Ergebnisse bei den Biogasmotoren erfolgte in den letzten 15 Jahren, so dass die zulässigen Grenzwerte als sehr gut abgesichert zu betrachten sind. Neben dem Mindestheizwert ist speziell bei Biogas- und Pyrolysegasanlagen auf den Gradienten der Heizwertänderung sowie auf die Zusammensetzung zu achten. Eine besondere Bedeutung kommt bei H₂-haltigen Gasgemischen der laminaren Flammengeschwindigkeit zu. Ein moderner Gasmotor kann bei entsprechender Regelung und Gemischbildungseinheit Unterschiede bis zum 40-fachen der lam. Flammengeschwindigkeit ausgleichen (5 cm/sec untere Grenze bzw. 200 cm/sec bei reinem Wasserstoffbetrieb und kleinen Mitteldrücken). Für Mikroturbinen bzw. Industriegasturbinen müssen für diese Unterschiede speziell adaptierte Brenner (soweit darstellbar) verbaut werden. Bei Brennstoffzellen ist dieser Punkt für die Steuerung des Reformers (intern oder extern) von Bedeutung.

Bei Gasen aus Bioprozessen (CH₄/CO₂-Gemische) ist die zeitliche Qualitätsschwankungsbreite relativ klein, Probleme können bei den Gasmotoren meist nur bei einem Startvorgang und großen unterschiedlichem CH₄-Anteil auftreten. In diesem Fall haben die Turbinen tendenzielle Vorteile. Um einen Überblick der Qualitätsanforderungen zu haben, wurden die Spezifikationen von Gasmotoren und Industrieturbinen in der Tabelle 2 gegenübergestellt. Für Anwendungen von thermisch erzeugten Gasen (z.B. Holzgas) ist klar ersichtlich, dass die Gasturbinen im Vergleich zu den Gasmotoren wesentlich höhere Anforderungen haben. Dieser Effekt ist durch sich aufbauende Schichten an der Turbine mit daraus folgenden Unwuchten bzw. den Folgen von Heißgaskorrosion begründet. Solche Erscheinungen führen dann in kurzer Zeit zur Totalzerstörung der Turbine. In der Vergleichstabelle fehlt das Silizium als ein sehr wichtiges Element, im Fall der Capstone Mikroturbine wird vom Hersteller derzeit ein erlaubter Wert von 5 ppb angegeben. Nach den Erfahrungen der Gasmotorenhersteller ist derzeit speziell diesem Element (Siloxane, Silane u.a.) eine besondere Beachtung zu schenken.

Bei den Brennstoffzellen sind die zulässigen Grenzwerte von Schadstoffen um ca. zwei bis drei Zehnerpotenzen kleiner anzusetzen (Tabelle 3). D.h. die Gasreinigung muss bei diesem Anwendungsfall perfekt arbeiten, um die Funktion der Brennstoffzelle aufrecht zu erhalten.

Designation	Dimens.	Gas Turbine	Gas Engine
Temperature	°C	150 - 200	40
Alkali-Metals (Na, K) and salts	mg/Nm ³	depends on turbine (e.g. <3)	~50
Halogens (HCl)	mg/Nm ³	depends on turbine (e.g. <2)	100
Compounds of sulphur (H ₂ S, COS, CS ₂)	mg/Nm ³	150	500
Ammonia (NH ₃)	mg/Nm ³	10 - 30	50
HCN	mg/Nm ³	1 - 2	
Dust (d _{max} = 10 μm)	mg/Nm ³	10	50

Tabelle 2: Gasqualitätsanforderungen bei Gasmotoren/Turbinen

CO₂	
➤ Problems only AFC	
➤ limit < 50 ppm (in gas/air)	
CO	
➤ problems for PEMFC	CO < 10 ... 100 ppm
➤ problems for PAFC	CO < 1%
➤ for MCFC, SOFC	no problems
Sulphur	
➤ reduction < 1 ppm necessary	
Halogenes	
➤ reduction < 1 ppm necessary	
Siloxanes	
➤ reduction < 1 ppm necessary	
Oxygen	
➤ limitation O ₂ < 1%	
Nitrogen	
➤ limitation < 4%	
Ammonia (NH₃)	
➤ reduction < 1 ppm	

Tabelle 3: Grenzwerte von Schadstoffen für Brennstoffzellen

Da bislang noch einige Probleme bei der Gasreinigung für die „gutmütigen“ Gasmotoren bestehen, dürfte noch einige Entwicklungsarbeit für die Nutzung der Biomasse (anaerober oder thermischer Prozess) bei den Brennstoffzellen bevorstehen, um diesen den Zugang zur dezentralen BHKW-Technik zu ermöglichen. Die Zukunft wird zeigen, welche Wege (meist auch gemeinsam) zu beschreiten sind, um die Vorgaben von Kyoto einzuhalten.

Zusammenfassung

Der Gasmotor (Ottomotor) ist aus Sicht der Motorhersteller bereits derzeit hoch entwickelt und bestens geeignet, um für dezentrale BHKW's eingesetzt zu werden. Gleiches gilt auch für die aus der Biomasse gewonnenen Gase. Die bereits erreichbaren Wirkungsgrade betragen an die 40 % und weitere Potenziale zeichnen sich ab. Im Vergleich dazu haben die Turbinen (Mikroturbinen) nur ein sehr eingeschränktes Wirkungsgradpotenzial. Insbesondere bei den „wirkungsgrad-optimierten“ Mikroturbinen mit Rekuperator sieht der Gesamtwirkungsgrad (elektrisch und thermisch) dieser Systeme sehr begrenzt aus. Zusammenfassend zeigt dazu das Bild 29 die bestehende Situation. Aus Sicht der Motorhersteller braucht das Bild nicht weiter kommentiert werden, da praktisch in allen Punkten speziell für BHKW-Anwendungen der Motor den Mitbewerbersystemen überlegen ist.

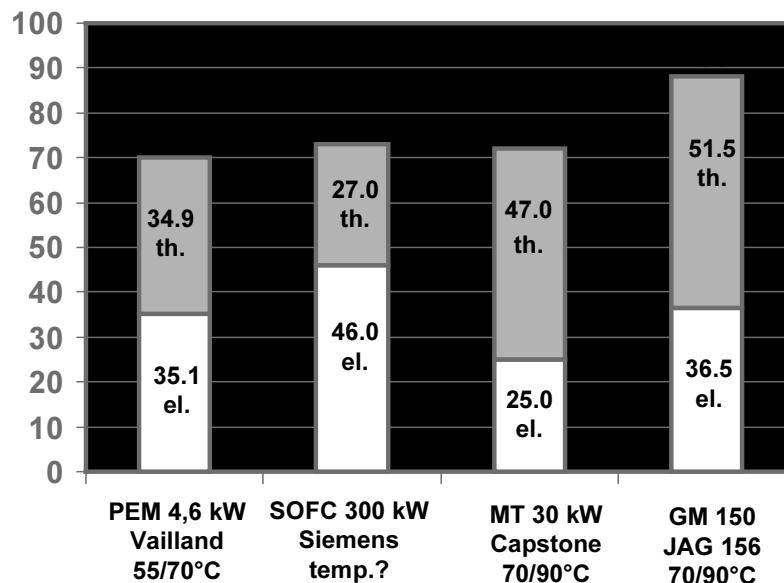


Bild 29: Vergleich Brennstoffausnutzung der verschiedenen Systeme

Speziell wenn auch Teillastanforderungen gestellt werden, sind die Mikroturbinen dem Gasmotor weit unterlegen. Das Image des Gasmotors wird derzeit auch durch technologische Exoten (Dieselzündstrahlkonzepte bei kleinen Biogasmotoren) belastet. Diese tragen seitens des Verbrennungskonzeptes nicht zur Minderung des „Treibhauseffektes“ bei, da wesentliche Emissionskomponenten (NO_x und unverbranntes Methan) in mehrfacher Größe im Vergleich zum Gasmotor an die Umwelt abgegeben werden. Auch die Partikelemission dieses Konzeptes hat auf die energetische Ausbeute der Wärmen nachhaltig negativen Einfluss. Bei den Brennstoffzellen haben die Hochtemperaturtypen das größte Potenzial, die Niedertemperaturtypen sind derzeit, die Gesamtwirkungsgrade betreffend, den Gasmotoren ebenfalls noch unterlegen. Schwere Hürden sind bei allen Brennstoffzellentypen speziell bei der Gasaufbereitung und Gasreinigung zu überwinden. Im Speziellen haben die Subsysteme außerhalb des Stack's noch einen beachtlichen Entwicklungsbedarf. Gesamt gesehen wird es in Zukunft einen Wettlauf zwischen allen betrachteten Systemen geben, wobei sich in jedem Fall diverse Nischen ergeben werden, die das eine oder andere Produkt als zweckmäßige Lösung erscheinen lassen.

Literatur

- Dr. Günther Herdin
D.I. Michael Wagner
D.I. Friedrich Gruber
D.I. Werner Henkel
- The New High Efficiency 1,5 MW Energy of Jenbacher
23rd CIMAC World Congress in Hamburg, Mai 2001
- Dr. Günther Herdin
- Gemischtaufbereitung im Gasmotor
Vortrag im Haus der Technik, 13.06.95
- Dr. Günther Herdin
D.I. Friedrich Gruber
- The Use of H₂ -Content Process Gas in Gas Engines
ASME Spring Conference, Ford Collins in Colorado, 1997
- Dr. Günther Herdin
D.I. Michael Wagner
- Engine Use of Producer Gas, Experiences and Requirements
Power Production from Biomass, Espoo Finland, 1998
- Dr. Günther Herdin
- Increasing Gas Engine Efficiency
AEEs annual conference 2000 in Atlanta
- Dr. Günther Herdin
D.I. Michael Wagner
- Brennstoffzelle (Irr?)-Weg
Vortrag anlässlich des 6. Wiener Expertenforums, 1996
- D.I. Michael Zoglauer
- Die Erwartungen in Projekte zur Entwicklung und Demonstration von Brennstoffzellen
VEO Journal 6/2001
- D.I. Heinrich Wilk
- Brennstoffzellen: Betriebsweisen und Systemeinbindung aus Sicht eines EVU
VEO Journal 6/2001
- D.I. Michael Scheefer
D.I. Zeljko Barisic
- Anwendungen mit PEM-Brennstoffzellensystemen und Erfahrungen mit den ersten 250-kW-PEM Brennstoffzellen
BHKW in Europa ,VEO Journal 6/2001
- Harald Raak, Sulzer Hexis AG
- Die Heizung, die auch Strom erzeugt
Sulzer Technical Review 3/2001
- Dr.-Ing. Thomas Dreier
- Wasserstoff und Methanol - Techniken und Systeme einer Wasserstoff-Energiewirtschaft
EVN Forum, Maria Enzersdorf, 6. November 2000
- Dr. Ing. Manfred Fortnagel
- Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle - Potenziale und Grenzen für den Automobilbau
AVL Motor und Umwelt 2001

Steven Chalk	Vorteile und Herausforderungen von fortschrittlichen Antriebssystemen, die vom U.S. Department of Energy gefördert werden AVL Motor und Umwelt 2001
D.I. Ulrich Langnickel D.I. Knut Stahl	Einsatz von Klärgas in einer Brennstoffzelle Gas/Wärme International 3/2001
Jürgen Neubart; Martin Kaltschmitt	Erneuerbare Energien in Österreich Springer Verlag 2000
N.V. Nederland Gasunie	Physical Properties of Natural Gases
Jenbacher AG	Datenblätter für Aggregat J 208 01/2001
Georg Wiltsee Paul Wintheiser	"Landfill Gas Fueled Microturbines are Here" 5 th Annual Lomp Conference 12/2001, Washington
Dr. Gerhard Filip MTU Friedrichshafen	"Brennstoffzelle, wovon sprechen wir überhaupt?" Ueberreuter Manager-Akademie "Brennstoffzellen", Wien 26./27.02.2002
Dr. Georg Patay	"Stand der Entwicklungen bei der Niedertemperatur-Brennstoffzelle" (PEM) Ueberreuter Manager-Akademie "Brennstoffzellen", Wien 26./27.02.2002
D.I. Thomas Theisen	"Erfahrungen der Thyssengas GmbH mit dem Sulzer Hexis Feldtestsystem" Ueberreuter Manager-Akademie "Brennstoffzellen", Wien 26./27.02.2002
Jesse Crosse	"Realistic Alternatives", Automotive Engineer The Magazine For The Industry, Februar 2002

Kontakte

Jenbacher AG D.I. Schneider Martin	Achenseestraße 1-3, A - 6200 Jenbach Tel.: 0043 (0)5244 6002507, Fax: 0043 (0)5244600 42507 E-Mail: m.schneider@jenbacher.com
---------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------