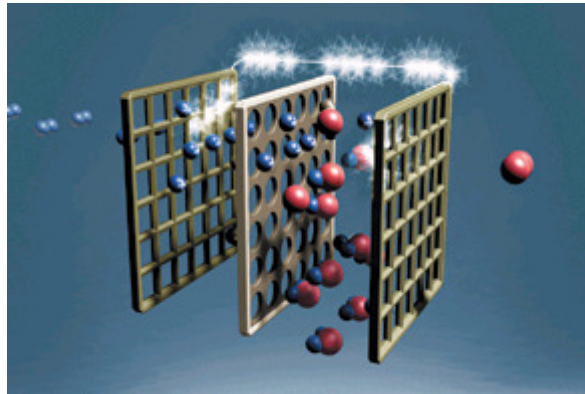


Marktanalyse für Brennstoffzellen in der stationären Anwendung



Auftraggeber: SGD Süd Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft
Rheinland-Pfalz, Abt. D
Hauptstraße 16
67705 Trippstadt

Auftragnehmer: Institut für Innovation, Transfer und Beratung GmbH (ITB)
Transferstelle Bingen
Berlinstraße 109
55411 Bingen am Rhein

Leiter TSB: Prof. Dr. Ralf Simon
Bearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Christian Pohl
Dipl.-Ing. (FH) Kerstin Kriebs
Telefon: 06721 / 409 218
Telefax: 06721 / 409 129
Homepage: <http://www.tsb-energie.de>

Datum: 07.04.2005

Inhalt

Einleitung.....	4
1 Brennstoffzellensysteme im Leistungsbereich bis zu 10 kW _{el} und zur Hausenergieversorgung	5
1.1 PEMFC zur Hausenergieversorgung	6
1.1.1 Joh. Vaillant GmbH	7
1.1.2 Hamburg Gas Consult GmbH	9
1.1.3 Viessmann Werke GmbH & Co. KG.....	10
1.1.4 UTC Fuel Cells / Toshiba / Buderus.....	11
1.1.5 Global Thermoelectric	13
1.1.6 Ballard.....	14
1.1.7 Ebara Ballard	16
1.1.8 IdaTech/North West Power Systems	18
1.1.9 General Motors	20
1.1.10 Nuvera Fuel Cells.....	21
1.1.11 Axane Fuel Cell Systems	23
1.1.12 ReliOn, Inc.	24
1.2 SOFC zur Hausenergieversorgung.....	26
1.2.1 Sulzer Hexis AG.....	27
1.2.2 Ceramic Fuel Cells Ltd.....	31
2 Brennstoffzellen für Industrie und Gewerbe	33
2.1 PEMFC zur Energieversorgung für Industrie und Gewerbe.....	34
2.1.1 Ballard.....	35
2.2 PAFC zur Energieversorgung für Industrie und Gewerbe.....	36
2.2.1 UTC Fuel Cells.....	36
2.2.2 Hamburg Gas Consult GmbH	38
2.3 MCFC zur Energieversorgung für Industrie und Gewerbe	39
2.3.1 MTU CFC Solutions	39
2.3.2 Ansaldo Fuel Cells	42
2.4 SOFC zur Energieversorgung für Industrie und Gewerbe	43
2.4.1 Siemens-Westinghouse Power Corporation	43

2.4.2	Rolls-Royce.....	47
2.4.3	Haldor Topsoe.....	47
2.4.4	ZTEK Corporation, Inc.	48
3	Betreiber.....	50
3.1	E.ON Ruhrgas AG	50
3.2	EnBW Energie Baden-Württemberg AG	50
3.3	europan fuel cell GmbH (efc)	50
3.4	RWE Fuel Cells	51
3.5	EWE AG	51
3.6	GEW RheinEnergie AG	51
4	Zusammenfassung.....	52
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	56
	Quellen	59

Einleitung

Die innovative Brennstoffzellentechnologie ermöglicht die gleichzeitige Erzeugung von Wärme und Strom aus Wasserstoff und Sauerstoff. Die Marktanalyse stellt die zur Zeit verfügbaren bzw. sich in der Entwicklung befindlichen Brennstoffzellen zur stationären Anwendung dar. Die Darstellung schließt die zum Einsatz kommenden Techniken, die daran arbeitenden Firmen, der jeweilige Stand der Entwicklung, soweit Informationen dazu vorliegen, sowie die jeweils geplanten, weiteren Schritte ein.

Vorteile der Brennstoffzellentechnik liegen im Wirkungsgrad des Systems, der höher als bei der getrennten Produktion von Strom und Wärme oder bei Blockheizkraftwerken ist. Weiterhin überzeugt die Brennstoffzelle durch geringere Emissionen und einen niedrigeren Wartungsaufwand.

Von der kommerziellen Marktreife ist die Technologie allerdings noch einige Jahre entfernt. Es wird geschätzt, dass die Brennstoffzelle erst ab 2010 einen nennenswerten Anteil auf dem Wärmemarkt haben wird.

Folgende Unternehmen, die nur eine Auswahl von vielen darstellen, haben sich bereits auf dem Gebiet der Brennstoffzellentechnologie in Deutschland hervor getan und bemühen sich, die Markteinführung voranzutreiben.

- EWE (Oldenburg)
- Ruhrgas (Essen)
- EnBW (Karlsruhe)
- RWE fuel cells (Essen)
- European Fuel Cell (Hamburg)
- Vaillant (Remscheid)
- Sulzer Hexis (Winterthur, CH)
- Viessmann (Allendorf)
- Buderus (Wetzlar) und
- HGC (Hamburg)

Zum Teil werden die Brennstoffzellensysteme selbst entwickelt und hergestellt, andere Unternehmen arbeiten neben deutschen auch mit internationalen Herstellern zusammen und erproben die Systeme in Feldtests. Ab 2006 ist die Serienproduktion einiger Geräte geplant.

1 Brennstoffzellensysteme im Leistungsbereich bis zu 10 kW_{el} und zur Hausenergieversorgung

SOFC und PEMFC konkurrieren derzeit um den Hausenergiemarkt. Es lässt sich derzeit nicht mit Sicherheit sagen, welches System letztlich den größeren Nutzen für den Endkunden hat bzw. welches System kostengünstiger produziert werden kann. Die Vor- und Nachteile sind in der jeweiligen Systemkonzeption und den Anforderungen für die Brennstoffaufbereitung zu sehen.

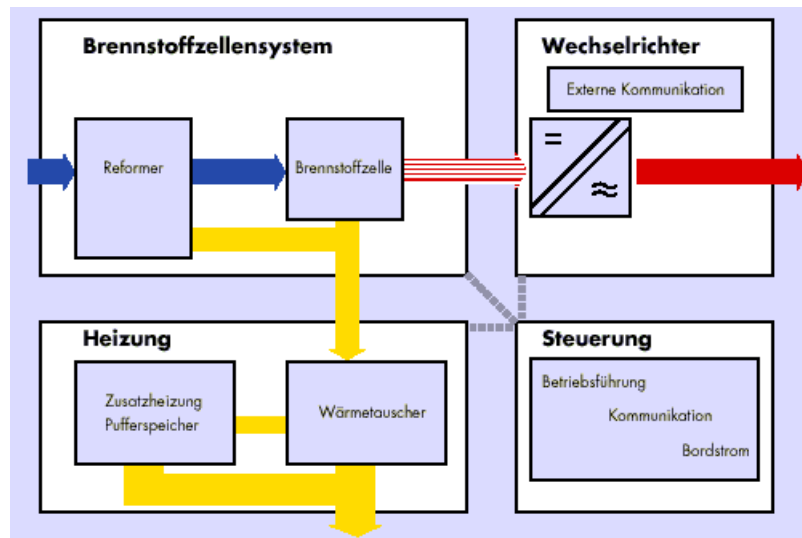


Abbildung 1-1 Schematische Darstellung Hausenergiesystem (Quelle: BINE Informationsdienst)

In der Mehrzahl konzentrieren sich die derzeitigen Entwickler stationärer Brennstoffzellen auf den 1 - 20 kW_{el} Markt im Bereich von Hausenergiesystemen. Zu diesen Unternehmen gehören einerseits führende Brennstoffzellen-Entwickler andererseits manchmal auch kleine Neugründungen, die ihren Ursprung in Forschungslabors haben. Z. T. verfügen diese Neugründungen jedoch über erhebliche Finanzquellen z. B. von führenden Stromanbietern.

Dieser Markt ist vor allem deshalb attraktiv, weil das Kostenziel von ca. 1.000 €/kW erheblich leichter zu erreichen ist als das von 50 €/kW im Automobilsektor. Nur zwei Typen von Brennstoffzellen werden im Moment für diese Anwendung in Betracht gezogen, nämlich die PEMFC, auf die die Mehrzahl der Entwickler setzt, und die planare SOFC.

Für die Hausversorgung stehen zur Zeit die Brennstoffzellensysteme von Sulzer Hexis und Vaillant, im Blickpunkt. Hier wurden bereits umfangreiche Pilotprojekte durchgeführt und die Vorserienproduktion gestartet. Die Systeme sind dazu ausgelegt, den Grundbedarf an Wärme und Strom zu decken. Für den Spitzenbedarf ist ein zusätzliches Heizgerät vorzusehen bzw. Netzstrom zu beziehen. Buderus und Viessmann hingegen stehen noch am Anfang der Entwicklung.

1.1 PEMFC zur Hausenergieversorgung

Die meisten Hersteller von Brennstoffzellen zur Hausenergieversorgung setzen die PEMFC-Technologie ein.

Durch folgende Kenndaten ist eine PEMFC charakterisiert.

	PEMFC
Elektrolyt	Protonenleitende Membran
Ionenleitung durch	H ⁺
Betriebstemperatur	60 - 80 °C
Brennstoff zur Zelle	Wasserstoff (H ₂)
elektrischer Systemnutzungsgrad (mit Erdgas)	Klein-BZHG: 28 - 32 % Großsystem: 40 %
Gesamtnutzungsgrad	bis ca. 80 %
Arbeitstemperatur des Zellstapels	bis ca. 90 °C
Temperatur der nutzbaren Wärme	bis ca. 80 °C
Anwendung	mobil, BHKW
typische Leistung	2 bis 200 kW _{el}

Tabelle 1-1 Kenndaten zu PEMFC

1.1.1 Joh. Vaillant GmbH

Zusammen mit dem amerikanischen Entwickler PlugPower wird seit 1997 an einem Brennstoffzellen-Heizgerät des Typs PEM für Mehrfamilienhäuser und kleinere Gewerbeunternehmen gearbeitet. 2001 erhielt das Unternehmen dafür die CE-Zertifizierung (Nachweis für Betriebssicherheit und effiziente Energienutzung) nach der EG-Gasgeräte-Richtlinie. Inzwischen wurden zwei weitere Geräte (EURO 1 und EURO 2) erfolgreich zertifiziert und auch in Pilotprojekten installiert. Die drei ersten Prototypen wurden in Mehrfamilienhäusern und einem Gewerbebetrieb getestet. Ende Juli 2004 haben mittlerweile fast 50 Testgeräte in etwa 135.000 Betriebsstunden schon über 400.000 kWh erreicht.

Daten EURO

Brennstoffzellentyp	PEMFC
Stackentwicklung	PlugPower
Systemintegration	Vaillant
Elektrische Leistung	1 - 4,6 kW _{el}
Thermische Leistung	1,5 - 7 kW _{th}
Leistungsmodulation	20 - 100 %
Leistung Zusatzbrenner	25 - 280 kW _{th}
Temperaturbereich der Reaktion	80 bis 90 °C
Elektrischer Wirkungsgrad	29 % (Ziel: ≥ 35 %)
Thermischer Wirkungsgrad	> 51 %
Gesamteffizienz	> 80 %
Brennstoff	Erdgas

Tabelle 1-2 Daten der Brennstoffzelle EURO (Quelle: Vaillant)

Das Brennstoffzellen-Heizgerät ist für die Abdeckung des Wärme-Grundbedarfs ausgelegt und wird wärmegeführt betrieben. Die Spitzenlast wird mit einem Zusatzbrenner gewährleistet. Die elektrische Leistung ist zur Deckung des Grundbedarfs eines Acht- bis Zehnfamilienhauses ausreichend.



Abbildung 1-2 Brennstoffzelle EURO (Quelle: Vaillant)

Zur Zeit läuft das europäisch geförderte Feldtestprojekt „Virtual Fuel Cell Power Plant“ (VF CPP), bei dem insgesamt 31 Brennstoffzellen-Heizgeräte in Deutschland, Spanien, den Niederlanden und Portugal vernetzt von der Zentrale in Essen aus betrieben werden (Testdauer bis März 2005). Die Brennstoffzellen-Heizgeräte sind in Mehrfamilienhäusern, kleinen Gewerbebetrieben und öffentlichen Einrichtungen installiert ($4,6 \text{ kW}_{\text{el}}$, $11 \text{ kW}_{\text{th}}$). Deutsche Partner des Pilotprojekts sind die E.ON Ruhrgas AG und EWE AG. Die Geräte sind ans öffentliche Netz angeschlossen. Im Mittelpunkt des Feldversuchs steht die Frage, ob und in welchem Umfang Brennstoffzellen-Heizgeräte sich künftig zur Stromerzeugung im öffentlichen Netz nutzen lassen. Da in den nächsten Jahren ein hoher Bedarf an neuen Kraftwerken besteht, soll untersucht werden, welcher Beitrag kleine dezentrale Anlagen zur Stromerzeugung beisteuern können. Beispielsweise zu Spitzenlastzeiten können die kleinen Anlagen nicht benötigte Leistung dem öffentlichen Netz zur Verfügung stellen.

Die ersten Brennstoffzellen-Heizgeräte des Typs EURO 1, die in Mehrfamilienhäusern installiert wurden, weisen ein gutes Betriebsverhalten im Vergleich zum Vorgängermodell auf. Es ergaben sich folgende Messergebnisse für EURO 1 nach etwa einjähriger Betriebsdauer:

- Die sechs Feldtest-Anlagen kommen auf eine Gesamtlaufzeit von 26.240 Betriebsstunden und haben in dieser Zeit insgesamt 63.600 kWh Strom bzw. 168.600 kWh Wärme produziert (Stand Dezember 2003).
- Über den Betriebszeitraum konnte etwa ein Drittel der in den Wohngebäuden nachgefragten Wärmemenge von den jeweiligen Anlagen bereitgestellt werden.
- Der Anteil des von den Anlagen produzierten Stroms am entsprechenden Bedarf in den Gebäuden bewegte sich zwischen 26 und 57 %. Diese relativ große Bandbreite ist bedingt durch den jeweiligen Strom- und Wärmebedarf in den Objekten und die unterschiedlichen Anlagenlaufzeiten.
- Der von den Anlagen produzierte Strom wird bis zu etwa 90 % im Objekt verbraucht, die restlichen 10 % werden ins öffentliche Versorgungsnetz eingespeist.

Bei der Interpretation der Betriebsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sich die Anlagen noch in einem recht frühen Entwicklungsstadium befinden und die folgenden Gerätegenerationen eine Verbesserung der bislang erzielten Werte erwarten lassen. Ebenso wird das Energiemanagement vor Ort d. h. das Zusammenwirken der einzelnen Systeme (Brennstoffzellenheizgerät/Speicher/Zusatzheizgerät) untereinander sukzessive verbessert.

Die Zielvorgabe von 50 Pilotanlagen, die bis 2005 im Feldtest untersucht werden sollen, ist erreicht. Allerdings befindet sich Vaillant in einer weiteren Forschungs- und Entwicklungsphase, in der eine PEMFC entwickelt wird, die durch einen Temperaturbereich von 160 bis 200 °C die Gasaufbereitung und Heizungseinbindung erleichtert. Ein weitere vorkommerzielle Phase ist deswegen ab 2005/2006 vorgesehen, sodass die Serienreife nicht vor 2010 angenommen wird.

1.1.2 Hamburg Gas Consult GmbH

Das Unternehmen beschäftigt sich mit einer Brennstoffzellen-Hausenergiezentrale auf Basis eines PEMFC-Prototyps der Firma American Power Corp. Mit einer Leistung von 3 kW_{el} und 8 kW_{th} sollte es auf die Bedürfnisse eines Einfamilienhauses mit einer kurzen Leistungssteigerung auf 5 kW_{el} zugeschnitten werden. Zum Beschäftigungsfeld der HGC gehört das stationäre Brennstoffzellensystem als Hausenergiezentrale weiterhin.

Aus der Hamburg Gas Consult GmbH ist european fuel cell GmbH hervorgegangen, die Ende 2002 von der Baxi Group übernommen wurde.

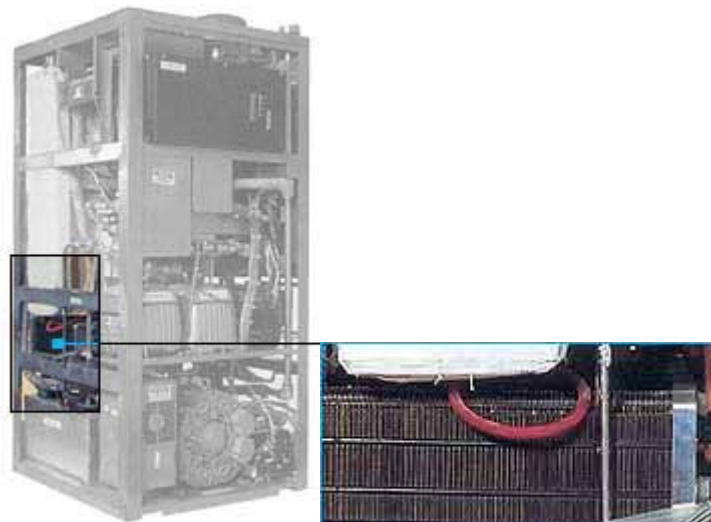


Abbildung 1-3 PEMFC-Brennstoffzelle (Quelle: HGC GmbH)

1.1.3 Viessmann Werke GmbH & Co. KG

Bei der Viessman Werke GmbH & Co KG arbeitet man seit dem Jahr 2000 an der Entwicklung eines eigenen Systems zur Versorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern. Die Entwicklung wird von der Gasaufbereitung bis zum Brennstoffzellenstack von Viessmann durchgeführt. Das Unternehmen entschied sich für ein drucklos zu betreibendes System, für das eine hohe Zuverlässigkeit erwartet wird.

Eine PEMFC-Brennstoffzelle mit 2 kW_{el} und $4,5 \text{ kW}_{\text{th}}$ wird zur Zeit als Beta-Version im Labor getestet. Im Herbst 2005 sollen erste Feldtests stattfinden und ab Sommer 2006 erste Geräte zu Demonstrationsvorhaben an interessierte Partner zur Verfügung gestellt werden. Für 2007 ist eine Kleinserie angedacht. Nach der Prognose von 2004 ist eine Marktreife ab 2010 vorgesehen.

Ein gleichmäßiger Betrieb der Brennstoffzelle ist das Ziel, das mit einer in weiten Grenzen modulierbaren Leistung der Haus-Energiezentrale erreicht werden soll. In einem Speicher-Wassererwärmer soll Überschusswärme zwischengespeichert werden. Zur Abdeckung von Bedarfsspitzen ist ein Brennwertkessel vorgesehen.

Daten Brennstoffzelle Viessmann

Brennstoffzellentyp	PEMFC
Stackentwicklung	Viessmann
Systemintegration	Viessmann
Elektrische Leistung	2 kW_{el}
Thermische Leistung	5 kW_{th}
Leistungsmodulation	20 - 100 %
Leistung Zusatzbrenner	15 - 25 kW_{th}
Temperaturbereich der Reaktion	80 bis 90 °C
Elektrischer Wirkungsgrad	28 % (Ziel: $\geq 32 \%$)
Brennstoff	Erdgas

Tabelle 1-3 Daten der Brennstoffzelle (Quelle: Viessmann)



Abbildung 1-4 Brennstoffzelle (Quelle: Viessmann)

1.1.4 UTC Fuel Cells / Toshiba / Buderus

UTC (South Windsor, CT), ist ein bekannter Entwickler alkalischer und phosphorsaurer Brennstoffzellensysteme. In letzter Zeit entwickelt UTC auch Brennstoffzellen in PEMFC Technologie für Hausenergiesysteme und automobiler Anwendungen. Mit einer erheblichen technischen Erfahrung bei PAFC-Systemen einschließlich des ersten Hausenergiesystems ist UTC als Entwickler recht gut positioniert. Hinzu kommen Erfahrungen mit jeder Art von Brenngasreformern.

Auf dem japanischen Markt arbeitet UTC mit Toshiba. Als Joint-Venture Toshiba International Fuel Cells (TIFC) entwickelten sie ein Brennstoffzellen-Heizgerät, das aus einer PEM-Brennstoffzelle mit integriertem Erdgasreformer und einem Warmwasserspeicher besteht.



Abbildung 1-5 Brennstoffzellen-Heizgerät von TIFC
(Quelle: ForschungsAllianz BrennstoffZellen Baden-Württemberg)

Toshiba hat außerdem eine eigene 30 kW- und 1 kW-Technologie vorgestellt.

Seit dem 09.11.2004 hat Toshiba die Anteile am gemeinsamen Joint-Venture Toshiba International Fuel Cells zurückgekauft und bildet wieder eine eigenständige Geschäftseinheit unter dem Namen Toshiba Fuel Cells Power Systems.

Toshiba nimmt an, dass 2008 der Start für Brennstoffzellen-Heizgeräte auf dem japanischen Markt ist. Deswegen plant Toshiba, bis zu diesem Zeitpunkt über eine jährliche Produktionskapazität von 1.000 Brennstoffzellen-Heizgeräten zu verfügen.

Innerhalb des japanischen Programms von METI (ministry of economy, trade and industry), das für drei Jahre und 3.000 Einheiten eine Förderung für die Installation und das Monitoring für Brennstoffzellen-Heizgeräte vorsieht, will sich Toshiba mit einigen hundert 1 kW-Brennstoffzellen-Heizgeräten jährlich beteiligen. Das Förderprogramm soll 2005 starten.

Seit 2001 arbeitet die Buderus Heiztechnik GmbH zusammen mit UTC Fuel Cells an der Entwicklung einer PEMFC-Zelle ($4,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $5,5 \text{ kW}_{\text{th}}$), die für die Versorgung von Mehrfamilienhäusern gedacht ist. Es soll sowohl Erdgas als auch Propan-Flüssiggas als Brennstoff eingesetzt werden können. Außerdem wird das System durch einen Spitzenboiler für den Winterbetrieb ergänzt. Ziel ist ein Gerät mit $4,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ elektrischer und $6,5 \text{ kW}_{\text{th}}$ thermischer Leistung. Es wird ein elektrischer Wirkungsgrad von mindestens 33 % und eine Gesamteffizienz von 80 % angestrebt. Weiterhin sollen mindestens 40.000 Stunden als Standzeit erreicht werden.

Erste Tests eines 5 kW-Gerätes fanden in 2002 und 2003 statt. In der Heizperiode 2004/2005 sollen die Zellen in der Praxis erprobt werden. Besonderes Augenmerk soll hier auf die hydraulische und technische Einbindung, die Kommunikation zwischen den Systemkomponenten und der Modulationsbreite des Heizgerätes gerichtet werden.

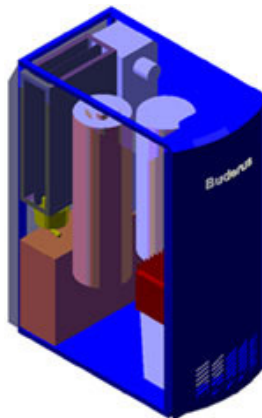


Abbildung 1-6 Schemazeichnung Brennstoffzelle (Quelle: Buderus)

1.1.5 Global Thermoelectric

Global Thermoelectric Inc. (Calgary, Alberta, Kanada), begann mit seinen Arbeiten 1997, als das Unternehmen planare SOFC Technologie vom Forschungszentrum Jülich erwarb. Im Juli 2000 bildete Global eine „strategische Allianz“ mit Enbridge Inc. (Toronto), Kanadas größtem Erdgasversorger. Erste Prototypen mit 2,3 kW wurden 2001 ausgeliefert. Global versucht auch, in den US amerikanischen Markt einzusteigen, indem es eine Partnerschaft mit Suburban Propane L.P. (Whippany, NJ) einging. Gemeinsam sollen Geräte für Kunden in abgelegenen Gebieten auf der Basis von Propan vermarktet werden. Seit 28. Mai 2004 ist Global Thermoelectric kein Tochterunternehmen der FuelCell Energy mehr.

1.1.6 Ballard

Das kanadische Unternehmen Ballard bietet derzeit einen tragbaren und in Großserie produzierten PEMFC-Brennstoffzellenstack „Nexa Power Module“ auf dem Markt an. Dieser Stack soll als OEM-Produkt anderen Herstellern zur Entwicklung von tragbaren Energieversorgungssystemen dienen. „Nexa RM Series“ ermöglicht mit 1 kW_{el} Netzeinspeiseleistung einen modularen Aufbau als Reserveleistung und zur unterbrechungsfreien Stromversorgung. Derzeit wird dieses System als Prototyp getestet.

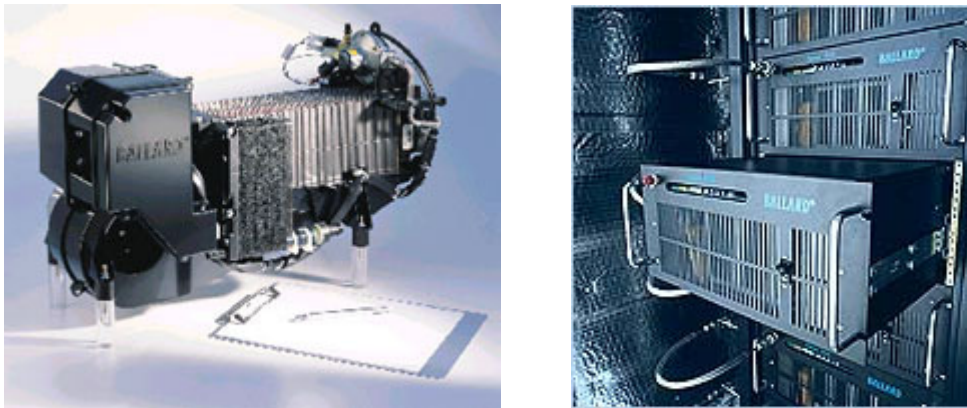


Abbildung 1-7 Nexa Power Module und Nexa RM Series (Quelle: Ballard)

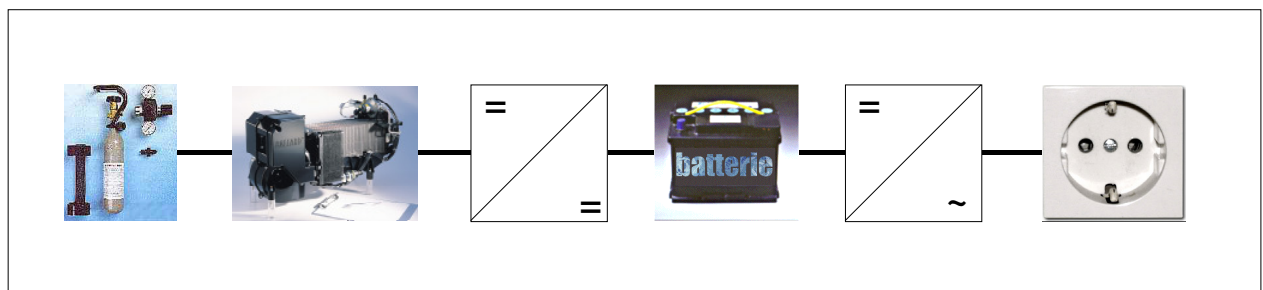


Abbildung 1-8 Einbindungsschema Nexa Power Module (Quelle: TSB)

Daten Nexa Power Module

Brennstoffzellentyp	PEMFC
Stackentwicklung	Ballard
Systemintegration	Ballard
Elektrische Leistung	1,2 kW _{el}
Temperaturbereich der Reaktion	80 bis 90 °C
Brennstoff	Wasserstoff

Tabelle 1-4 Daten Nexa Power Module (Quelle: Ballard)

Als erster Hersteller hat das US-Unternehmen Coleman Powermate ein mobiles Notstromaggregat „AirGen“ entwickelt. Es liefert 1 kW_{el} und läuft mit gasförmigen Wasserstoff, der entweder in Druck- oder in Metallhydridtanks bereitgestellt wird. Die Wasserstoffdrucktanks sind mit 138 bar befüllt und fassen bis zu 5.550 l Gas. Das Partnerunternehmen Praxair, das in den USA und Kanada über ein Netz von Niederlassungen verfügt, hat den Vertrieb der auswechselbaren Gasflaschen übernommen. Das mit Drucktanks ausgestattete Brennstoffzellensystem ist für industrielle Anwendungen gedacht und wird bereits auf dem Markt angeboten. Das für Innenräume geeignete System soll bei Stromausfällen z. B. den Betrieb wichtiger Rechen- oder Telefonanlagen sicherstellen.

Das System zur Notstromversorgung von Privathaushalten oder als mobile Stromquelle für Handwerker und Kleinbetriebe ist mit drei Metallhydridtanks ausgerüstet. Aufgrund des geringeren Befülldrucks sind Metallhydridtanks besser zu handhaben, haben allerdings ein geringeres Fassungsvermögen. Das System soll demnächst auf dem Markt verfügbar sein. Coleman plant auch hierfür ein Tauschsystem.



Abbildung 1-9 AirGen (Quelle: Coleman)

In einer anderen Leistungsklasse entwickelt Ballard Generation Systems 10 kW Erdgassysteme als Notstromaggregate und für leichte Industrieanwendungen. Leider ist wenig über Details dieser Projekte bekannt, aber Ballard muss auch in diesem Marktsegment zu den führenden Entwicklern gerechnet werden.

1.1.7 Ebara Ballard

Seit Januar 2001 arbeiten Ballard Generation Systems (BGS), Tokyo Gas, Ebara Ballard und Ebara Corporation gemeinschaftlich an der Entwicklung von 1 kW PEMFC-Brennstoffzelle für den Hausenergiesektor. Die Entwicklung der Anlage orientiert sich am Strom-, Wärme- und Warmwasserverbrauch eines typischen, japanischen Hauses. Seit 2003 findet ein Feldtest mit 17 Anlagen in Japan statt.



Abbildung 1-10 Vorserie (Quelle: Ebara)

Daten Vorserie EBC

Brennstoffzellentyp	PEMFC
Stackentwicklung	Ballard
Systemintegration	Ebara Ballard
Elektrische Leistung	1 kW _{el}
Thermische Leistung	1,4 kW _{th}
Leistungsmodulation	k. A.
Temperaturbereich der Reaktion	80 bis 90 °C
Elektrischer Wirkungsgrad	34 % (Ziel: ≥ 35 %)
Thermischer Wirkungsgrad	43 - 47 %
Gesamteffizienz	81 %
Brennstoff	Erdgas

Tabelle 1-5 Daten Vorserie EBC (Quelle: Ebara Ballard Corporation)

Nippon Oil Corporation, Ebara Ballard Corporation und Ebara Corporation entwickeln speziell für den japanischen Markt ein Brennstoffzellensystem, das Kerosin als Brennstoff nutzt. Der Prototyp wird derzeit getestet.



Abbildung 1-11 Prototyp Kerosin-Brennstoffzelle (Quelle: Ebara)

1.1.8 IdaTech/North West Power Systems

IdaTech Fuel Cells (Bend, Oregon) gehört zur Unternehmensgruppe IdaCorp. Die Firma spezialisiert sich auf Brennstoffzellenanwendungen bis 10 kW elektrische Leistung, insbesondere 3 kW Systeme auf der Basis von IdaTechs speziellem Methanolreformer. Zwar hat IdaTech auch andere Brennstoffe erfolgreich eingesetzt, aufgrund der besonderen Konstruktion des Reformers (Palladium-Membranreaktor) ist jedoch die Verwendung von Gasen weniger effizient.

1999 begann IdaTech mit einer ersten Serie von Feldversuchen mit Methanex, dem weltgrößten Methanolproduzenten, und Statoil, dem nationalen norwegischen Öl- und Gasproduzenten. Weitere Tests wurden mit 110 Einheiten in Portland und Frankreich durchgeführt. IdaTech besitzt keine eigene Stacktechnologie, sondern hat bislang Stacks von vier verschiedenen Firmen getestet. Bislang wurde der Reformer stets unter Volllast betrieben. Auch sind Angaben zur Lebensdauer bislang nicht gemacht worden. Für den Betrieb mit Flüssigkraftstoffen könnten diese Systeme jedoch einige Vorteile haben, wenn eine zuverlässige Stacktechnologie eingesetzt wird.

Die Brennstoffzellensysteme von IdaTech beruhen auf einem flexiblen, modularen Aufbau, sodass die Entwicklung von System mit einer Leistung von bis zu 50 kW möglich ist. Ein Vorteil von IdaTech ist die Mehrbrennstoff-Technologie.



Abbildung 1-12 EtaGEN5 (Erdgas), FCS 1200 (Methanol) und FPM (Wasserstoff) Brennstoffzelle
(Quelle: IdaTech)

Daten EtaGen5

Brennstoffzellentyp	PEMFC
Stackfertigung	IdaTech
Systemintegration	RWE/Buderus
Elektrische Leistung	4,6 kW _{el}
Thermische Leistung	7 kW _{th}
Leistung Zusatzbrenner	40 - 160 kW _{th}
Leistungsmodulation	Ziel: 20 - 100 %
Temperaturbereich der Reaktion	80 bis 90 °C
Elektrischer Wirkungsgrad	Ziel: ≥ 35 %
Gesamtwirkungsgrad	> 70 %
Brennstoff	Erdgas

Tabelle 1-6 Daten EtaGen5 für Brennstoffzellen-Heizgerät
(Quelle: BINE Informationsdienst, IdaTech/RWE Fuel Cells/Bosch Buderus Thermotechnik)

IdaTech bildet seit Juli 2004 zusammen mit RWE Fuel Cells und Buderus ein Partnerschaft zur Entwicklung eines Brennstoffzellen-Heizgeräts.

Dazu entwickelt und erzeugt IdaTech Brennstoffzellensysteme, während RWE Fuel Cells und Buderus die Brennstoffzellen in Heizsysteme integrieren und so eine vollständige Kraft-Wärme-Kopplung schaffen. RWE Fuel Cells und Buderus werden die Brennstoffzellensystem im Labor und im Feld testen.

Während IdaTech den Brennstoffzellen-Stapel (Typ EtaGen) und den Reformer liefert, ist das Aufgabengebiet der RWE Fuel Cells GmbH die Integration der Brennstoffzelle, die Verschaltung mit einem Heizkessel zu einem abgestimmten Blockheizkraftwerk, die Entwicklung eines Energiemanagers zur Steuerung und Stromeinspeisung ins Netz, während Bosch Buderus Thermotechnik GmbH die Erfahrungen als Serienhersteller von Heizgeräten und Kenntnisse über Systemtechnik, Regelelektronik, Verbrennungstechnik und Wärmeübertragung beiträgt. Für 2005 sind erste Feldversuche mit 5 solcher Systeme in Moers, Hagen, Lollar, Duisburg und Essen vorgesehen. Ende des Jahres soll der Feldtest um etwa 15 weitere Brennstoffzellen-Heizgeräte erweitert werden.

Derzeit testet RWE Fuel Cells bereits vier IdaTech EtaGen-Geräte. Diese sind zusammen mit einer Mikrogasturbine zur dezentralen Energieversorgung der NRW-Landesvertretung in Berlin installiert.

Folgende Daten weist diese Anlage auf.

		Brennstoffzelle	Mikrogasturbine
elektrische Leistung	kW_{el}	4 x 4,6	ca. 28
thermische Leistung	kW_{th}	4 x 6	ca. 65
elektrischer Wirkungsgrad	%	ca. 30	bis 25
Nutzungsgrad	%	> 70	> 70

Tabelle 1-7 Kenndaten KWK-Anlage aus Brennstoffzelle und Mikrogasturbine in NRW-Landesvertretung in Berlin (Quelle: RWE Fuel Cells GmbH)

Die ersten Betriebserprobungen für vollständig integrierte Brennstoffzellen-Heizgeräte sind zur Installation für 2005 geplant. Bei positiven Forschungsergebnissen bis 2006 ist eine Fortsetzung der Zusammenarbeit mit dem Ziel, das Brennstoffzellen-Heizgerät bis zur Marktreife zu führen, vorgesehen.

1.1.9 General Motors

Völlig überraschend präsentierte General Motors im September 2001 ein Hausenergiesystem mit 5,3 kW, das auf der automobilen Brennstoffzelle von GM beruhte. GM glaubt, das System bis 2005 auf den Markt bringen zu können.



Abbildung 1-13 stationäre PEMFC-Brennstoffzelle (Quelle: General Motors)

1.1.10 Nuvera Fuel Cells

Aus den Firmen Epyx (Tochterfirma von Arthur D. Little zur Entwicklung von Brenngasgeneratoren) und De Nora Fuel Cells (Teil von De Nora) wurde 2000 Nuvera (Cambridge, MA und Milano, Italien) gegründet. Die Nuvera-Technologie basiert vermutlich auf dem Reformer von Epyx und der Brennstoffzelle von De Nora.

Die Erfahrungen vom Brennstoffzelleneinsatz in der Transportanwendung möchte Nuvera für große, stationäre Anwendung übertragen. Die erste Demonstration einer PEMFC mit 1,2 MW_{el} wird für eine Lokomotive als Transportanwendung sein, was von der US Army Research, Development and Engineering Command's National Automotive Centre unterstützt wird.

Der PEMFC-Brennstoffzellenstack H2E wird mit einer elektrischen Leistung von 1 bis 6 kW_{el} als OEM-Produkt zum Einsatz für Brennstoffzellensysteme eingesetzt. Als Brennstoff wird Wasserstoff eingesetzt. Derzeit wird an einem scale-up entwickelt, das als Forza ab 2006 mit einem Leistungsbereich von 160 kW_{el} bis mehrer MW_{el} verfügbar sein soll. Dieses Modell wird in erster Linie für den industriellen Einsatz vorgesehen. Insbesondere Chloralkaliwerke und Raffinerien, in denen Wasserstoff als Nebenprodukt entsteht und als Brennstoff in der Brennstoffzelle eingesetzt werden kann, werden als Einsatzgebiet favorisiert.

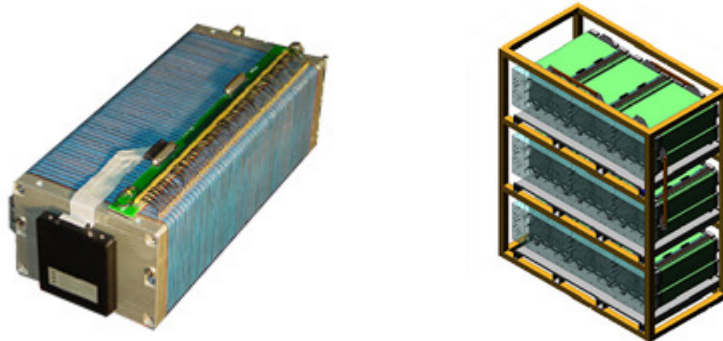


Abbildung 1-14 H2E und Forza (Quelle: Nuvera Fuel Cells)

Daneben entwickelte Nuvera ein vollständiges System zur Strom- und Wärmeversorgung mit $3,7 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $5,7 \text{ kW}_{\text{th}}$. Dieses System ist mit einer Reformiereinheit ausgestattet, sodass Erdgas als Brennstoff eingesetzt werden kann. In Entwicklung befindet sich ein Energieversorgungssystem mit 75 bis $300 \text{ kW}_{\text{el}}$ unter dem Namen DuAlto.



Abbildung 1-15 Avanti und DuAlto (Quelle: Nuvera Fuel Cells)

Daten Avanti

Brennstoffzellentyp	PEMFC
Stackentwicklung	Nuvera Fuel Cells
Systemintegration	Nuvera Fuel Cells
Elektrische Leistung	$3,7 \text{ kW}_{\text{el}}$
Thermische Leistung	$5,7 \text{ kW}_{\text{th}}$
Temperaturbereich der Reaktion	80 bis 90°C
Elektrischer Wirkungsgrad	31,5 %
Thermischer Wirkungsgrad	> 48,5 %
Gesamteffizienz	> 80 %
Brennstoff	Erdgas

Tabelle 1-8 Daten Avanti (Quelle: Nuvera Fuel Cells)

1.1.11 Axane Fuel Cell Systems

Axane Fuel Cell Systems ist ein Tochterunternehmen von Air Liquide und beschäftigt sich mit Brennstoffzellen.

Die entwickelten Systeme nutzen als OEM-Produkt die PEMFC-Brennstoffzellen des Unternehmens Nuvera Fuel Cells. Sie dienen der Strom- bzw. der Notstromversorgung mit einer elektrischen Leistung im Bereich von 0,5 bis 10 kW_{el}. Axane entwickelt mobile, tragbare und transportable Brennstoffzellen.

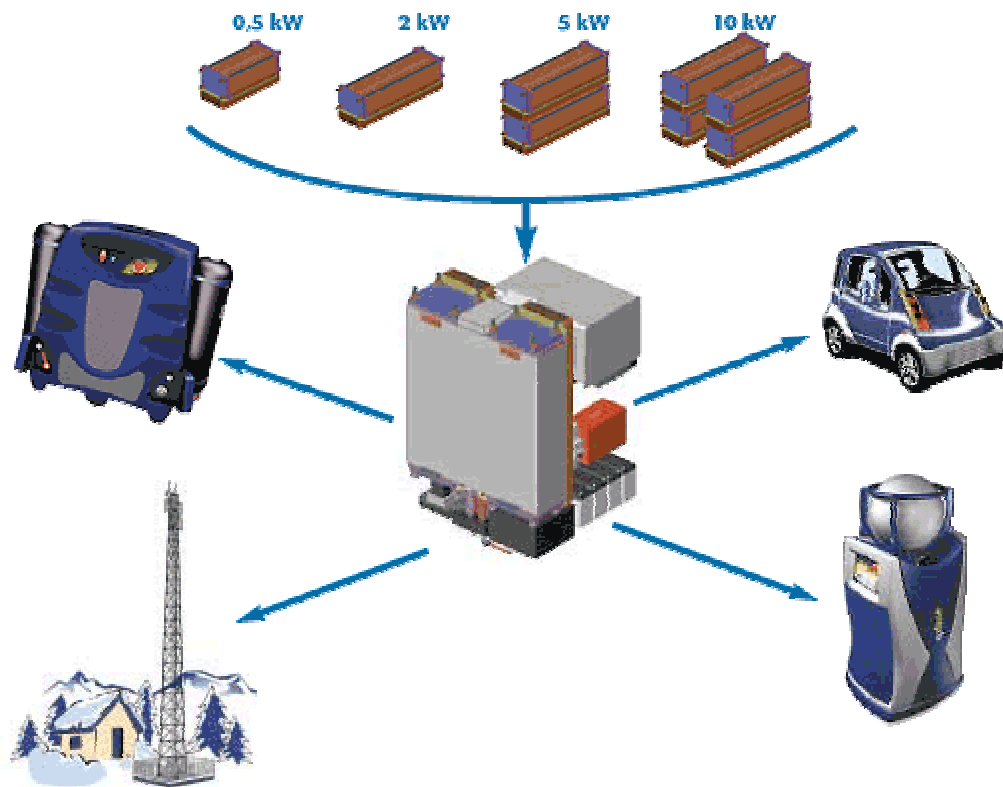


Abbildung 1-16 Einsatzgebiete und Ausführungsarten PEMFC-Brennstoffzelle
(Quelle: Axane Fuel Cell Systems)

Daten

Brennstoffzellentyp	PEMFC
Stackentwicklung	Nuvera Fuel Cells
Systemintegration	Axane Fuel Cell System
Elektrische Leistung	0,5 - 10 kW _{el}
Temperaturbereich der Reaktion	80 bis 90 °C
Brennstoff	Wasserstoff

Tabelle 1-9 Daten PEMFC (Quelle: Axane Fuel Cell System)

1.1.12 ReliOn, Inc.

ReliOn, ehemals Avista Labs, entwickelt PEMFC in einem elektrischen Leistungsbereich von 0,5 bis 5 kW_{el}. Als Einsatzgebiet der Brennstoffzellen liegt der Schwerpunkt auf bestimmte Industriezweige, die eine unterbrechungsfreie Stromversorgung, Reserveleistung und ein netzunabhängige Stromversorgung erfordern wie z. B. Telekommunikationsindustrie, Banken und Krankenhäuser.

Die beiden Darstellungen zeigen wie anstelle von herkömmlicher Technik die Brennstoffzelle zur unterbrechungsfreien Stromversorgung eingesetzt werden kann.

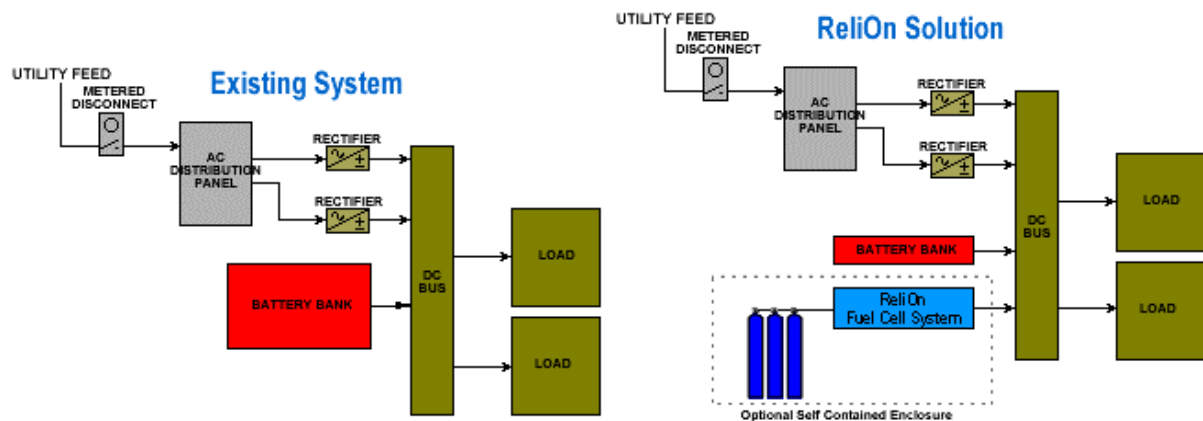


Abbildung 1-17 Schematische Darstellung unterbrechungsfreie Stromversorgung mit Batterien und mit Brennstoffzelle (Quelle: ReliOn, Inc.)

Für diesen Einsatz ist die PEMFC „Independence 1000 (I-1000)“ verfügbar und wird schon angewendet. Es ist sowohl für den amerikanischen und europäischen Standard zertifiziert. Das Model hat eine elektrische Leistung von 1 kW_{el}. ReliOn entwickelte „Modular cartridge Technology“. Die PEM-Membran befinden sich in einem luftgekühlten Kunststoffgehäuse. Bis auf einen hocheffizienten Ventilator sind keine bewegten Bauteile vorhanden. Auf der einen Seite tritt Wasserstoff und auf der anderen Seite Luft ein. Bei Ausfall eines Moduls wird automatisch das defekte Modul mit einem Bypass umgangen.

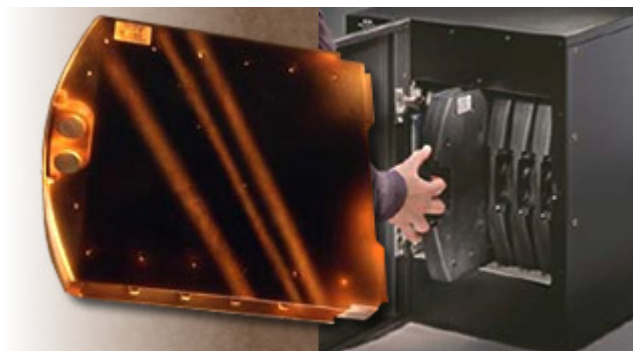


Abbildung 1-18 Independence 1000 (Quelle: ReliOn, Inc.)

Daten Independence 1000

Brennstoffzellentyp	PEMFC
Stackentwicklung	ReliOn
Systemintegration	ReliOn
Elektrische Leistung	1 kW _{el}
Brennstoff	Wasserstoff

Abbildung 1-19 Daten Independence 1000 (Quelle: ReliOn, Inc.)

Durch Parallelschaltung der Brennstoffzelle Independence 1000 kann eine elektrische Leistung von bis zu 5 kW_{el} erreicht werden. Zur Außenaufstellung ist das System für eine Umgebungstemperatur von -40 °C bis +46 °C einsetzbar. Abhängig von der Anzahl der integrierbaren Wasserstoffflaschen kann das System bis zu 48 kWh_{el} elektrische Arbeit zur Verfügung stellen.

Unten ist ein System mit 2 kW_{el} als „Outdoor Enclosure System“ abgebildet, das eine elektrische Arbeit von 24 kWh_{el} leisten kann.



Abbildung 1-20 Outdoor Enclosure System (Quelle: ReliOn, Inc.)

Derzeit sind solche Systeme u. a. für die Notstromversorgung von Radiosendern in Ohio, als Reserveleistung für Maryland Institute for Emergency Medical Service Systems und in einigen amerikanischen Armeestandorten z. B. Gabreski Air national Guard Base in New York, Fort Rucker Army Base in Alabama und Fort Lewis Army Base in Washington State.

1.2 SOFC zur Hausenergieversorgung

Die SOFC gehören zu den Hochtemperaturbrennstoffzellen. Zur Hausenergieversorgung entwickeln nur wenige Hersteller SOFCs.

Folgende Kenndaten weist eine SOFC auf.

	SOFC
Elektrolyt	Keramischer Festkörper
Ionenleitung durch	O^{2-}
Betriebstemperatur	800 - 1.000 °C
Brennstoff zur Zelle	Wasserstoff (H_2), Erdgas, Biogas oder Kohlegas, interne Reformierung möglich
elektrischer Systemnutzungsgrad (mit Erdgas)	Klein-BZHG: 28 % Großsystem: 47 % bis 60 % (hybrid)
Gesamtnutzungsgrad	80 - 90 %
Arbeitstemperatur des Zellstapels	ca. 950 °C
Temperatur der nutzbaren Wärme	450 - 500 °C
Anwendung	KW, KWK
typische Leistung	1 kW _{el} - 10 MW _{el}

Tabelle 1-10 Kenndaten SOFC

1.2.1 Sulzer Hexis AG

Das schweizer Unternehmen Sulzer Hexis produziert und vertreibt das Vorserienmodell einer SOFC-Brennstoffzelle für den Einsatz in Einfamilienhäusern. 2001 wurde ein dreijähriger international angelegter Feldtest beendet. Ca. 400 Vorseriengeräte wurden seit Ende 2001 produziert und in Deutschland und der Schweiz in Betrieb genommen.

Die SOFC wird mit Erdgas betrieben und verfügt über eine elektrische Leistung von 1 kW_{el} und einer thermischen Leistung von $2,5 \text{ kW}_{\text{th}}$. Ein integriertes Zusatzheizgerät ermöglicht es, den gesamten Wärmebedarf eines Wohngebäudes abzudecken.

Daten HXS 1000 Premiere

Brennstoffzellentyp	SOFC
Stackentwicklung	Sulzer Hexis
Systemintegration	Sulzer Hexis
Elektrische Leistung	1 kW_{el}
Thermische Leistung	$2,5 \text{ kW}_{\text{th}}$
Thermische Leistung Brennwertkessel	$12 - 22 \text{ kW}_{\text{th}}$
Volumen des integrierten Pufferspeichers	200 Liter
Temperaturbereich der Reaktion	800 bis $1.000 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Elektrischer Wirkungsgrad	25 % (Ziel: $\geq 30 \text{ } \%$)
Thermischer Wirkungsgrad	60 %
Gesamteffizienz	85 %
Brennstoff	Erdgas

Tabelle 1-11 Daten der Brennstoffzelle HXS 1000 Premiere (Quelle: Sulzer Hexis)



Abbildung 1-21 Vorserienmodell HXS 1000 Premiere (Quelle: Sulzer Hexis)

Während der Feldtests wurden Optimierungsarbeiten am Vorserienmodell durchgeführt. So zeigt die Abbildung die Verringerung der Stackdegeneration mit jeder neuen Generation.

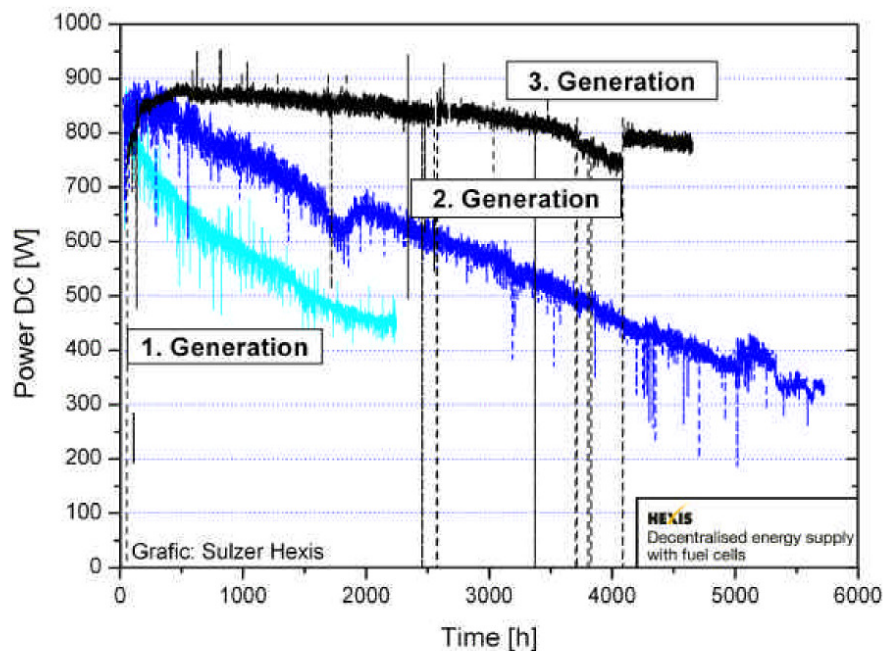


Abbildung 1-22 Degeneration verschiedener Stackgenerationen (Quelle: Sulzer Hexis)

Derzeit wird ein kleineres und leichteres Gerät unter der Bezeichnung Galileo Mk I und Mk II als seriennahes Produkt entwickelt, dessen Auslieferung als Kleinserie für Ende 2005 vorgesehen ist. Zur Kostenreduzierung wird u.a. das Verfahren der Brennstoffaufbereitung (steam reforming) durch einen kostengünstigeren Prozess (catalytic partial oxidation) ersetzt. Während Galileo Mk I gegenüber der Vorserie eine Gewichtsreduzierung um etwa 64 % und eine Volumenverringerung um ca. 30 % erzielte, führte Galileo Mk II zu einer Reduzierung für das Gewicht um rund 49 % und für das Volumen um etwa 60 %.

Für das seriennahe System ist ein kompaktes Gerät mit integriertem Wärmespeicher und ein neuer, angepasster Zusatzbrenner vorgesehen. Außerdem ist eine hohe Systemintegration, der Einsatz kostengünstiger Materialien geplant. Zusätzlich soll das System kleiner und leichter als das Modell HXS 1000 werden. In der folgenden Darstellung ist das seriennahe Gerät Galileo schematisch abgebildet.



Abbildung 1-23 Seriennahes Brennstoffzellengerät Galileo Mk II (Quelle: Sulzer Hexis)

Daten Galileo

Brennstoffzellentyp	SOFC
Stackentwicklung	Sulzer Hexis
Systemintegration	Sulzer Hexis
Elektrische Leistung (AC)	0 - 1 kW _{el}
Thermische Leistung	0,5 - 3,5 kW _{th}
modulierender Bereich Brennstoffleistung	0,75 - 4 kW _{BS}
Thermische Leistung Brenner	0 – 20 kW _{th}
Temperaturbereich der Reaktion	800 bis 1.000 °C
Elektrischer Wirkungsgrad	25 - 30 %
Gesamteffizienz	> 80 %
Brennstoff	Erdgas

Tabelle 1-12 Daten des seriennahen Brennstoffzellengeräts (Quelle: Sulzer Hexis)

Es wurden 8 Prototypen im Labor getestet. Derzeit werden 10 Pilotanlagen im Labor betrieben.

Weiterhin sind 18 Kleinseriengeräte als Pilotanlagen vorgesehen, von denen u. a. 7 Galileo Mk I von Sulzer Hexis und 7 von Partnern betrieben werden sollen.

Für 2006 ist angedacht, dass die ersten Geräte kommerziell verfügbar sind. Als Ziel für 2007 sind mehr als 1.000 Geräte und für 2008 mehr als 2.500 Geräte vorgesehen. Damit soll ab 2010 mit einer Geräteanzahl von über 10.000 Anlagen pro Jahr der Markt bedient werden.

Außerdem laufen Tests für den Einsatz von Heizöl, Flüssiggas und Biogas.

1.2.2 Ceramic Fuel Cells Ltd.

Seit 1992 entwickelt das australische Unternehmen Ceramic Fuel Cells planare SOFCs. Die Systeme werden aus Stacks mit jeweils 150 W_{el} aufgebaut. Ziel sind Produkte in einem elektrischen Leistungsbereich von 0,5 bis 10 kW_{el}.

Für ein Hausenergiesystem „CHP (Combined Heat & Power)“ ist 1 kW_{el} elektrische Leistung und 1 kW_{th} Wärmeleistung vorgesehen.



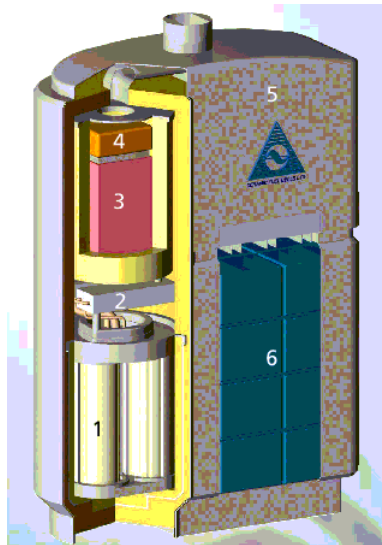
Abbildung 1-24 Prototyp des CHP und schematische Darstellung (Quelle: Ceramic Fuel Cells, Ltd.)

Daten CHP

Brennstoffzellentyp	SOFC
Stackentwicklung	Ceramic Fuel Cells
Systemintegration	Ceramic Fuel Cells
Elektrische Leistung	1 kW _{el}
Thermische Leistung	1 kW _{th}
Temperaturbereich der Reaktion	850 °C
Elektrischer Wirkungsgrad	40 %
Thermischer Wirkungsgrad	40 %
Gesamteffizienz	80 %
Brennstoff	Erdgas

Tabelle 1-13 Daten CHP (Quelle: Ceramic Fuel Cells, Ltd.)

Zur Hausenergieversorgung und für den Einsatz in kleineren Betrieben wird an der „Distributed Generation (DG)“ gearbeitet mit 5 bis 6 kW_{el} elektrischer Leistung, die kurzzeitig bis zu 10 kW_{el} betragen kann. Dazu werden in einem System drei Module mit jeweils 2 kW_{el}, einer Batterie und Inverter integriert. Optional kann die Abwärme mit einem Wärmetauscher zu Heizzwecken genutzt werden.



- 1: Brennstoffzellenstack
- 2: Brennstoff- und Luftvorbehandlung
- 3: Wärmetauscher und Brenner
- 4: Vorwärmer
- 5: Hauptstromrichter und Steuerung
- 6: Batterie

Abbildung 1-25 Schematische Darstellung DG (Quelle: Ceramic Fuel Cells, Ltd.)

Daten DG

Brennstoffzellentyp	SOFC
Stackentwicklung	Ceramic Fuel Cells
Systemintegration	Ceramic Fuel Cells
Elektrische Leistung	5 - 6 kW _{el}
Elektrische Spitzenleistung	10 kW _{el}
Temperaturbereich der Reaktion	850 °C
Elektrischer Wirkungsgrad	40 %
Brennstoff	Erdgas

Tabelle 1-14 Daten DG (Quelle: Ceramic Fuel Cells, Ltd.)

2 Brennstoffzellen für Industrie und Gewerbe

Gegenüber den Brennstoffzellen zur Hausenergieversorgung wird für die Anwendung in Industrie und Gewerbe Brennstoffzellen in einem höheren Leistungsbereich benötigt.

Folgendes Diagramm zeigt für verschieden Brennstoffzellentypen im Vergleich zu unterschiedlichen Kraftwerksanlagen die Wirkungsgrade abhängig vom Leistungsbereich.

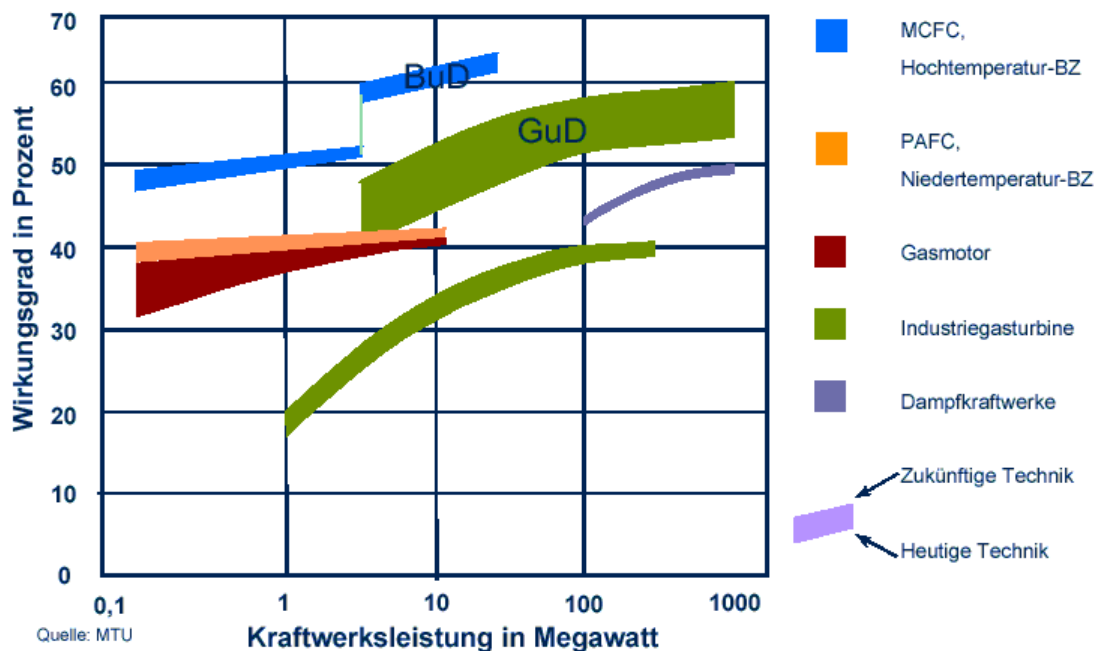


Abbildung 2-1 Wirkungsgrad abhängig von Leistung für Stromerzeuger (Quelle: Hydrogeit, MTU)

Für den Brennstoffzelleneinsatz in Industrie und Gewerbe mit einem höheren Leistungsbereich werden sowohl Hoch- als auch Mittel- und Niedertemperaturbrennstoffzellen eingesetzt. Die Hersteller werden getrennt nach den Brennstoffzellentypen PAFC, PEMFC, SOFC und MCFC vorgestellt.

2.1 PEMFC zur Energieversorgung für Industrie und Gewerbe

Durch folgende Kenndaten ist eine PEMFC charakterisiert.

	PEMFC
Elektrolyt	Protonenleitende Membran
Ionenleitung durch	H ⁺
Betriebstemperatur	60 - 80 °C
Brennstoff zur Zelle	Wasserstoff (H ₂)
elektrischer Systemnutzungsgrad (mit Erdgas)	Klein-BZHG: 28 - 32 % Großsystem: 40 %
Gesamtnutzungsgrad	bis ca. 80 %
Arbeitstemperatur des Zellstapels	bis ca. 90 °C
Temperatur der nutzbaren Wärme	bis ca. 80 °C
Anwendung	mobil, BHKW
typische Leistung	2 bis 200 kW _{el}

Tabelle 2-1 Kenndaten PEMFC

2.1.1 Ballard

Ballard Generation Systems (BGS), ein Zusammenschluss von Ballard Power Systems, GPU International, ALSTOM und EBARA Corporation, ist derzeit der einzige Entwickler von Anlagen der 250 kW Klasse auf Basis der Membran-Brennstoffzelle (PEMFC).

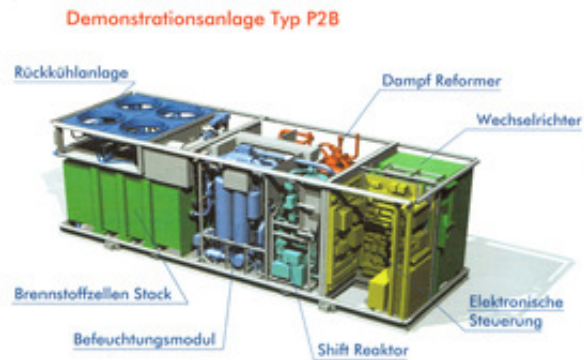


Abbildung 2-2 Ansicht und Schemazeichnung 250 kW-PEMFC-Brennstoffzelle
(Quelle: Ballard Generation Systems)

Die erste Anlage in Europa wurde 2000 an die BEWAG durch Alstom Ballard ausgeliefert und in Berlin als Demonstrationsanlage betrieben. Die Anlagenkosten betrugen ca. 3,5 Millionen €. Die elektrischen Wirkungsgrade im Dauertest bei 212 kW_{el} netto betrugen 33 bis 35 % und liegen somit niedriger als konventionelle Motor-BHKWs in dieser Leistungsgröße. Die Brennstoffausnutzung betrug ca. 75 %.

In Europa sind insgesamt 5 Anlagen installiert. Weitere Anlagen sind für Europa nicht geplant. Alstom hat 2003 die Vermarktung dieser Anlagen aufgegeben.

Während für diese Anlagen ein eigener Stack entwickelt wurde, werden inzwischen bei Ballard auch 60 kW Anlagen erprobt, die den automobilen Markt 900 Stack verwenden. Hierdurch werden erstmalig stärkere Synergieeffekte zwischen stationärer und mobiler Technik möglich.

Ballard konzentriert sich inzwischen auch auf die Entwicklung kleiner Systeme mit ca. 1 kW_{el}.

2.2 PAFC zur Energieversorgung für Industrie und Gewerbe

Die PAFC ist eine Mitteltemperaturbrennstoffzelle, die als einzige auf dem Markt derzeit kommerziell verfügbar ist.

Folgende Kenndaten weist eine PAFC auf.

	PAFC
Elektrolyt	Phosphorsäure in poröser Matrix
Ionenleitung durch	H ⁺
Betriebstemperatur	200 °C
Brennstoff zur Zelle	Wasserstoff (H ₂), mit Reformer auch Erd-, Bio- und Grubengas
elektrischer Systemnutzungsgrad (mit Erdgas)	37 %
Gesamtnutzungsgrad	80 - 90 %
Arbeitstemperatur des Zellstapels	200 °C
Temperatur der nutzbaren Wärme	bis max. 120 °C
Anwendung	KWK
typische Leistung	200 kW _{el}

Tabelle 2-2 Kenndaten PAFC

2.2.1 UTC Fuel Cells

International Fuel Cells Inc. (IFC) entwickelte und die Produktionstochter ONSI Corp. stellte eine PAFC-Brennstoffzelle her, beide sind Tochterunternehmen von UTC. Neuerdings firmieren die Brennstoffzellenaktivitäten unter dem Namen UTC Fuel Cells.

Die erste Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC) wurde 1992 bis 1997 erstmals von der Ruhrgas AG getestet. Das 200 kW-Aggregat lieferte fast 33.000 Stunden lang Strom und Wärme. Die Entwicklung der Anlage übernahm UTC Fuel Cell. Seit den 90er Jahren ist diese Brennstoffzelle kommerziell verfügbar.



Abbildung 2-3 PC 25 C, PAFC-Brennstoffzelle (Quelle: UTC Fuel Cells)

Bisher wurden über 250 Anlagen verkauft. Als Blockheizkraftwerk erreicht PC 25TM C einen elektrischen Wirkungsgrad von 40 % und wird mit einer elektrischen und thermischen Leistung von jeweils ca. 200 kW serienmäßig angeboten. Der elektrische Wirkungsgrad des Systems fällt im Laufe des Betriebs auf Werte oberhalb 30 % ab. Die Anlage kann sowohl parallel zum bestehenden Stromnetz als auch autark als alleinige Strom- und Wärmequelle betrieben werden.

In den USA werden die Anlagen häufig als Notstromaggregat eingesetzt. In Deutschland wurde die Anlage von der Ruhrgas AG getestet. Aufgrund der hohen Investition ist eine Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu konventionellen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen noch nicht erreichbar. Die Kosten für eine 200 kW-Anlage werden von UTC mit ca. 850.000 \$ beziffert, wobei Aufstellungs- und Wartungskosten noch zusätzlich anfallen.

Daten PC 25 C

Brennstoffzellentyp	PAFC
Stackentwicklung	UTC Fuel Cells
Systemintegration	UTC Fuel Cells
Elektrische Leistung	200 kW _{el}
Thermische Leistung	270 kW _{th}
Temperaturbereich der Reaktion	190 - 210 °C
Elektrischer Wirkungsgrad	37 %
Thermischer Wirkungsgrad	50 %
Gesamteffizienz	87 %
Brennstoff	Erdgas

Tabelle 2-3 Daten PC 25 C (Quelle: UTC Fuel Cells)

UTC Fuel Cells ist ein führender Brennstoffzellenentwickler für stationäre, mobile Hausenergiesysteme. Die Firma ist alleiniger Lieferant der U.S. amerikanischen Raumfahrtssysteme. UTC hat in den vergangenen Jahren mit seinem Partner Toshiba PC 25 Blockheizkraftwerke insgesamt über 250 mal verkauft.

Fünf UTC PC 25 Blockheizkraftwerke mit insgesamt 1 MW_{el} versorgen als eine der größten Anlagen weltweit eine Postsortierstelle in Anchorage, Alaska. Seit Anfang 2000 hat die Anlage dafür gesorgt, dass keine Stromausfälle auftraten.

In Deutschland wurden 20 Anlagen installiert; so betreiben u. a. die Stadtwerke Saarbrücken seit 1997 eine PC 25 C Brennstoffzelle.

Neben 200 kW elektrischer Leistung erzeugt PC 25 264 kW Wärme mit 60 °C. Zur Nutzung von Hochtemperaturwärme z. B. in der Absorptionskältetechnik besteht die Option, die Hälfte der Wärme bei 120 °C auszukoppeln. 2001 erreichte eine PC 25 C Anlage auf Staten Island 40.000 Betriebsstunden.

Anstelle von Erdgas als Brennstoff können auch alternative Brennstoffe eingesetzt werden. So arbeiten einige Anlagen mit Fermentergas aus einer Brauerei, Faulgas aus einer Kläranlage oder Methanol aus der Platinreinigung.

Der Kaufpreis der PC25 C betrug im Januar 2002 850.000 \$, sodass anstelle der erwartenden, spezifischen Investitionskosten von 1.400 €/kW_{el} diese 2003 bei 4.500 €/kW_{el} stagnierten.

UTC Fuel Cells hält die notwendige, weitere Kostenreduzierung bis zur Konkurrenzfähigkeit gegenüber konventionellen BHKWs für nicht realisierbar, da der PAFC derzeit kein erhebliches Entwicklungspotential zugeschrieben wird. Deswegen hat UTC Fuel Cells seit 2003 die Entwicklung der PAFC zu Gunsten der PEMFC aufgegeben. Mit einem geringfügig höheren, elektrischen Wirkungsgrad von ca. 40 % im Vergleich zu den marktgängigen Motor-BHKWs können die deutlich höheren Investitionskosten nicht aufgefangen werden.

2.2.2 Hamburg Gas Consult GmbH

Im Leistungsspektrum der HGC befindet sich die PAFC-Brennstoffzelle PC 25 C von UTC Fuel Cells. Es sind mehrere Anlagen als Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk zur Energieversorgung, Nahwärmeversorgung oder Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung in einem Wohngebiet, Hallen- und Freibad, Verwaltungsgebäude, Krankenhaus, Industriebetrieb und in Stadtwerken zum Einsatz gekommen.

Die Kenndaten der Brennstoffzelle entsprechen den Angaben von UTC Fuel Cells.

2.3 MCFC zur Energieversorgung für Industrie und Gewerbe

Durch folgende Kenndaten ist eine MCFC charakterisiert.

	MCFC
Elektrolyt	Karbonatschmelze in einer Matrix
Ionenleitung durch	CO_3^{2-}
Betriebstemperatur	650 °C
Brennstoff zur Zelle	H ₂ , Erdgas, Biogas und Kohlegas
elektrischer Systemnutzungsgrad (mit Erdgas)	50 % (ohne DT) 55 % (mit DT)
Gesamtnutzungsgrad	80 - 90 %
Arbeitstemperatur des Zellstapels	650 °C
Temperatur der nutzbaren Wärme	ca. 400 °C
Anwendung	KW, KWK
typische Leistung	250 kW _{el}

Tabelle 2-4 Kenndaten MCFC

2.3.1 MTU CFC Solutions

MTU CFC Solutions als Tochterfirma von MTU Friedrichshafen (Tochterunternehmen von DaimlerChrysler) wurde 2003 gegründet, die sich seit den 90er Jahren mit der Entwicklung von Brennstoffzellen beschäftigt. Die Gesellschaft ist der weltweit führende Brennstoffzellen-Entwickler für dezentrale KWK-Systeme. MTU setzt dabei auf Hochtemperaturzellen im Leistungsbereich von 200 kW bis 3 MW.

FuelCell Energy in Danbury, Connecticut, und MTU sind die führenden Anbieter von Schmelzkarbonatbrennstoffzellen in dieser Leistungsklasse. FuelCell Energy ist hervorgegangen aus der Energy Research Corporation, einem der MCFC Pioniere mit seiner Anlage in Santa Clara (Leistung: 2,5 MW). Die Anlage basierte auf der 300 kW-MCFC-Stack-Technology, dem sog. Model 9000. FuelCell Energy nennt seine Anlagen „direct fuel cell“, da die Reformierung intern stattfindet und somit mit einer Reihe von Brennstoffen betrieben werden können, z. B. Erdgas, Methanol, Ethanol und Biogas.

Vom FuelCell Energys als europäischer Partner bezieht MTU CFC Solutions Brennstoffzellenkomponenten. MTU hat aktiv zur derzeitigen Technologieentwicklung beigetragen. Die Stacks werden von FuelCell Energy gefertigt; MTU hat jedoch das „HotModule“ entwickelt. Das HotModule vereint alle heißen Komponenten des Brennstoffzellen-Systems in einem

beheizten Behälter. Dies reduziert den Aufwand für die Wärmeisolation und verringert Dichtungsprobleme. Die horizontale Lagerung des Stacks im HotModule ist ungewöhnlich, erleichtert aber den Stackwechsel. Folgende Abbildung zeigt auch die Gasströme im HotModule.

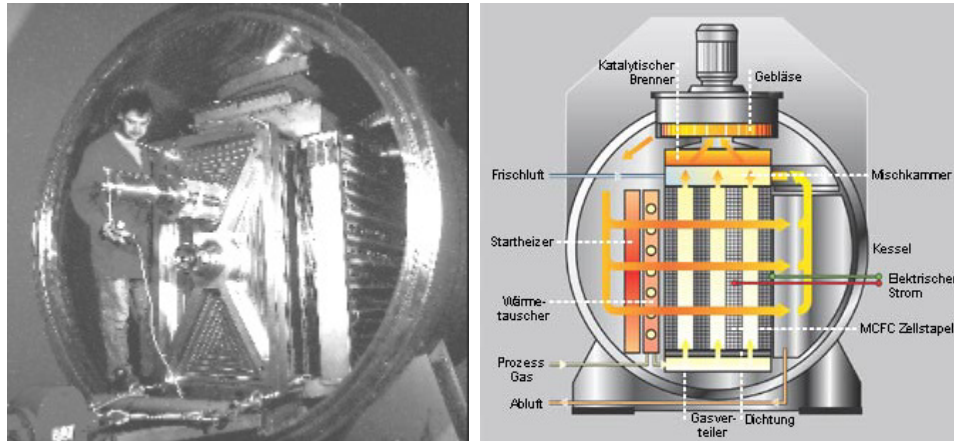


Abbildung 2-4 Ansicht offenes Hot Module und Schema Querschnitt Hot Module
(Quelle: MTU CFC Solutions)

Die Hochtemperatur-Brennstoffzelle in Hot-Module-Bauweise (MCFC) von MTU wurde bereits 1997 unter Mitarbeit der Ruhrgas AG entwickelt und getestet und ist für den Betrieb in energieintensiven Unternehmen gedacht. Ab 2006 soll die Serienproduktion folgen. Aufgrund der hohen Arbeitstemperatur von 650 °C kann neben Erdgas auch Biogas, Synthesegas oder Klärgas ohne externe Reformierung zum Einsatz kommen.

Daten HotModule HM 300

Brennstoffzellentyp	MCFC
Stackentwicklung	Fuel Cell Energy
Systemintegration	MTU CFC Solutions
Elektrische Leistung	245 kW _{el}
Thermische Leistung	180 kW _{th}
Temperaturbereich der Reaktion	600 - 700 °C
Elektrischer Wirkungsgrad	47 %
Thermischer Wirkungsgrad	43 %
Gesamteffizienz	90 %
Brennstoff	Erdgas

Tabelle 2-5 Daten Hot Module HM 300 (Quelle: MTU CFC Solutions)

Wird mit der Abwärme eine Dampfturbine betrieben, lässt sich der elektrische Wirkungsgrad auf 65 % steigern.

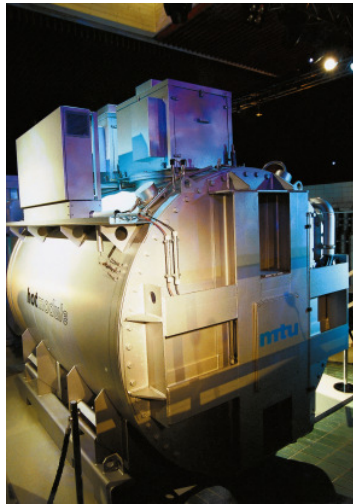


Abbildung 2-5 Hot Module HM 300 (Quelle: MTU CFC Solutions)

Bis Mitte 2004 wurden 8 HotModule installiert und erprobt. Der erreichte elektrische Wirkungsgrad beträgt 47 %; als Zielwert werden 50 % angegeben.

Seit 2001 versorgt ein HotModule mit rund 250 kW_{el} und 180 kW_{th} das Rhön-Klinikum in dem fränkischen Bad Neustadt/Saale. Die Anlage ist mittlerweile seit mehr als 20.000 Stunden im Einsatz, womit ein Rekord unter den Hochtemperatur-Brennstoffzellen aufgestellt worden ist. Das System arbeitet bei einer Temperatur von 650 °C und liefert Hochdruck-Wasserdampf für das Klinikum. Zudem kann die Anlage als Notstromaggregat fungieren.

Die dreijährige Testphase der Anlage wurde mittlerweile erfolgreich abgeschlossen. Mit einer durchschnittlichen Verfügbarkeit von 96 % wurden insgesamt 2.500 MWh_{el} Strom erzeugt. Da das Klinikum mit der MCFC sehr zufrieden ist, wurde 2003 in einer weiteren Klinik in Bad Berka (Thüringen) die gleiche Brennstoffzelle in Betrieb genommen. Mit einer Verfügbarkeit von 99 % in 6.500 Betriebsstunden wurden 1.280 MWh_{el} an Strom produziert.

Auch andere HotModule-Systeme von MTU CFC erzielen Spitzenleistungen: An Standorten bei RWE, Essen, DeTe Immobilien, München, EnBW, Karlsruhe und IPF, Magdeburg haben sie die 10.000-Stunden-Marke jeweils deutlich überschritten. So ist z. B. bei Michelin in Karlsruhe eine weitere Brennstoffzelle in Betrieb. Hier soll die technologische Reife der Zelle bei der Erzeugung von Prozessdampf getestet werden. Seit Juli 2003 ist auch im Akutkrankenhaus Grünstadt eine MCFC-Brennstoffzelle installiert, deren Betrieb innerhalb eines Forschungsauftrags untersucht wird.

Im Anschaffungspreis wird das HotModule mit herkömmlichen Gasmotoren nicht standhalten können. Durch den hohen Wirkungsgrad kann langfristig jedoch eine Amortisation erreicht werden. Der derzeitige spezifische Stückpreis beträgt ca. 7.000 bis 8.000 €/kW_{el}. Die Serienfertigung mit 2.500 €/kW_{el} als Stückpreis soll 2006/2007 beginnen, während der Zielpreis mit 1.500 €/kW_{el} angegeben wird.

2.3.2 Ansaldo Fuel Cells

Das italienische Unternehmen begann zwischen 1980 und 1990 mit ersten Studien zu Brennstoffzellen. Von 1990 bis 1996 entwickelte und betrieb Ansaldo verschiedene MCFC-Stacks im Leistungsbereich zwischen 0,15 und 13 kW_{el}. Für das geplante Serienmodell „2TW“ mit einer elektrischen Leistung von 500 kW_{el} wurden 2000/2001 die Rahmenbedingungen festgelegt. Drei Projekte zeigten zu Demonstrationszwecken eine Leistung von 100 kW_{el} und 500 kW_{el}.

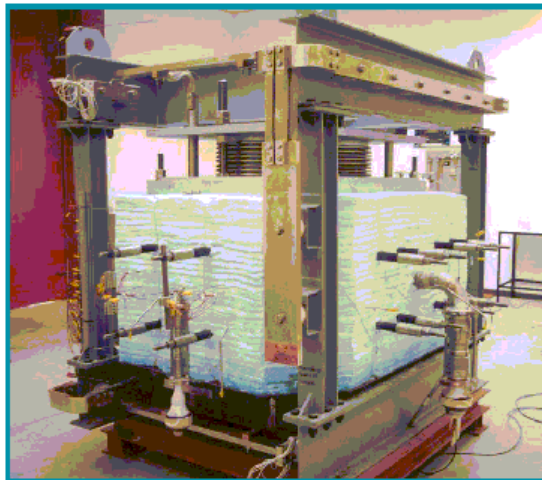


Abbildung 2-6 Demonstrationsanlage 100 kW_{el} (Quelle: Ansaldo Fuel Cells)

Zwar möchte das Unternehmen MCFC in einem Leistungsbereich von 500 kW_{el} bis 5 MW_{el} entwickeln, allerdings ist als Hauptprodukt das Serienmodell „2TW“ mit einer elektrischen Leistung von 500 kW_{el} vorgesehen. Die Entwicklung beruht auf dem Brennstoff Erdgas. Im weiteren Vorgehen werden auch für andere Brennstoffe wie Diesel, Biomasse, Wasserstoff, Deponiegas, Syngas, Kohlegas, Biogas das Serienmodell entsprechend angepasst.

2.4 SOFC zur Energieversorgung für Industrie und Gewerbe

Folgende Kenndaten weist eine SOFC auf.

	SOFC
Elektrolyt	Keramischer Festkörper
Ionenleitung durch	O^{2-}
Betriebstemperatur	800 - 1.000°C
Brennstoff zur Zelle	Wasserstoff (H_2), Erdgas, Biogas oder Kohlegas, interne Reformierung möglich
elektrischer Systemnutzungsgrad (mit Erdgas)	Klein-BZHG: 28 % Großsystem: 47 % bis 60 % (hybrid)
Gesamtnutzungsgrad	80 - 90 %
Arbeitstemperatur des Zellstapels	ca. 950°C
Temperatur der nutzbaren Wärme	450 - 500°C
Anwendung	KW, KWK
typische Leistung	1 kW _{el} - 10 MW _{el}

Tabelle 2-6 Kenndaten SOFC

2.4.1 Siemens-Westinghouse Power Corporation

Für SOFC-Brennstoffzellen ist Siemens Westinghouse Power Corporation (SWPC) als Deutsch/Amerikanisches Gemeinschaftsunternehmen derzeit der am weitesten fortgeschrittene Entwickler.

Die Zahl der Pilotanlagen von SWPC ist beeindruckend. Die 1995 eingeführte AES-Technologie, d. h. die Kathode dient als Grundträger der Röhre, führte zu deutlich verbesserten Leistungsdichten. Außerdem wurden die Anlagen im Laufe der Zeit mit einer Vielzahl von Brennstoffen betrieben, wie z. B. Synthesegas und logistische - also militärische - Kraftstoffe. Zusätzlich testet SWPC druckaufgeladene Brennstoffzellen.

EDB/Elsam (Konsortium aus niederländischen und dänischen Energieversorgern) hatten eine 100 kW SOFC-Brennstoffzelle in Westervoort/NL betrieben, die nach über 13.000 Betriebsstunden in den Meteoritpark (Essen) verlegt wurde. Die Anlage hat 46 % elektrischen Wirkungsgrad und 73 % Gesamteffizienz erreicht.

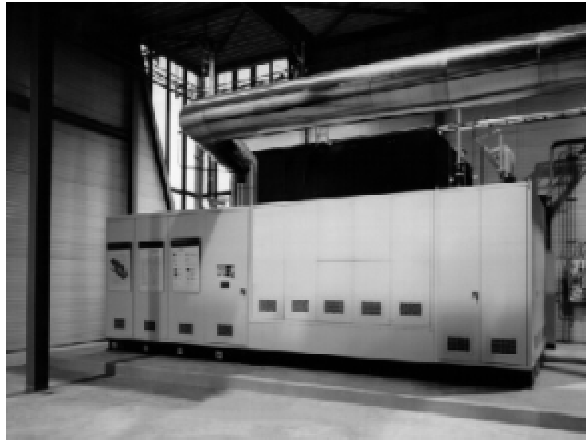


Abbildung 2-7 EDB/ELSAM 100 kW SOFC Anlage in Westervoort (NL)
(Quelle: Siemens Westinghouse)

Weitere Anlagen mit höherer Leistung wurden u. a. in den USA installiert. Es sollen 47 % elektrischer Wirkungsgrad bei 80 % Gesamteffizienz erreicht werden.

Ein 220 kW druckaufgeladenes Hybridsystem aus SOFC-Brennstoffzelle und Mikrogasturbine wird von Southern California Edison in der University of California, Irvine, betrieben.

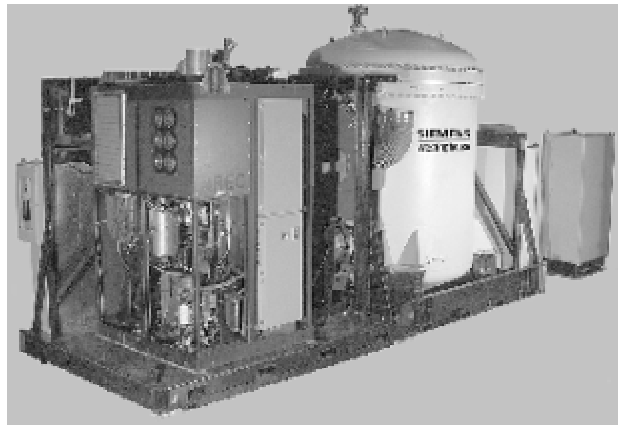


Abbildung 2-8 220 kW Hybridanlage mit Mikro-Gasturbine, Southern California Edison
(Quelle: Siemens Westinghouse)

In der folgenden Abbildung ist das (stark vereinfachte) Prozessdiagramm dargestellt.

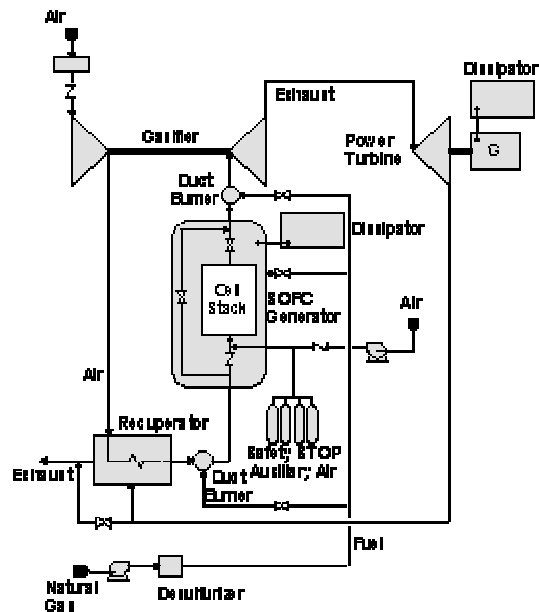


Abbildung 2-9 Vereinfachtes Prozessdiagramm der druckaufgeladenen SOFC
(Quelle: Siemens-Westinghouse)

Ein Hybrid-Pilotprojekt mit erhöhtem Gasdruck und nachgeschalteter Gasturbine wurde 2002 in den USA installiert. Diese Anlage erreichte 53 % elektrischer Wirkungsgrad und wurde nach 3.000 Betriebsstunden stillgelegt.

EnBW und SWPC planten für 2003 eine 1 MW_{el} Hybrid-Anlage mit 55 bis 60 % elektrischem Wirkungsgrad in Marbach zu installieren. Die auf 3 bar druckaufgeladene 1 MW Anlage sollte aus einer größeren SOFC in Kombination mit einer Mikroturbine bestehen, die mit 20 % zur elektrischen Leistung beitragen sollte. Die Gesamtkosten sollen sich auf 25 Millionen € belaufen. Die Anlage sollte ins EnBW Netz eingegliedert werden. Dieses Projekt wurde 2002 mit der Aussage aufgegeben, dass keine geeignete Mikrogasturbine auf dem Markt gefunden wurde.

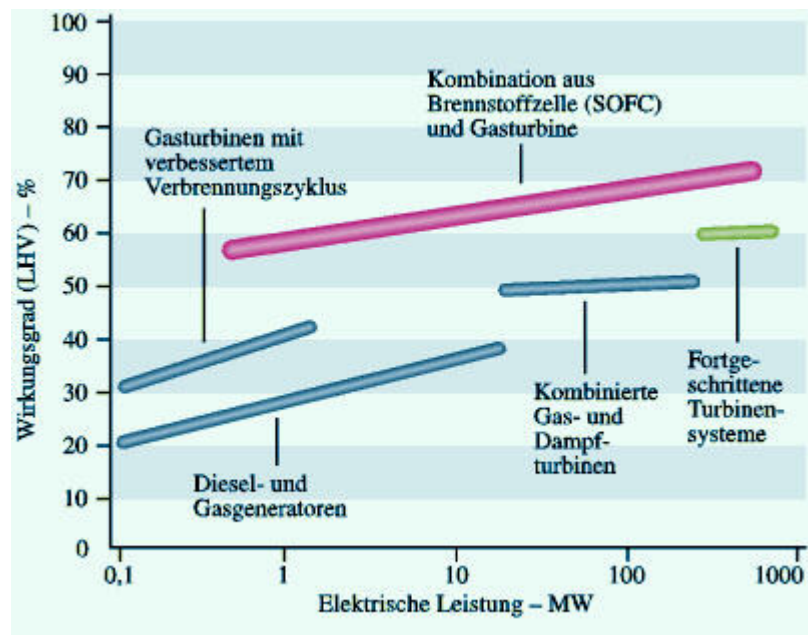


Abbildung 2-10 Vergleich Hybrid-Anlage mit konventionellen KWK-Anlagen anhand Wirkungsgrad abhängig von elektrischer Leistung (Quelle: Siemens)

SWPC plante, im Jahr 2004 erste 250 kW bis 1.000 kW Systeme kommerziell anzubieten. Hierunter sollen einfache Blockheizkraftwerke mit 250 kW elektrischer Leistung ebenso gehören wie Hybridsysteme mit 300 kW und 1.000 kW. Derzeit möchte SWPC vor weiteren Feldtests zunächst weitere Entwicklungsarbeiten durchführen.

2.4.2 Rolls-Royce

Die Entwicklung von stationären Brennstoffzellen von Rolls-Royce sieht vor, dass 2004 eine SOFC mit 10 kW_{el} und 2005 eine SOFC mit 60 kW_{el} entwickelt wird. Darauf aufbauend plant Rolls-Royce für 2007 eine Hybridanlage in einem Leistungsbereich von 1 MW_{el}.

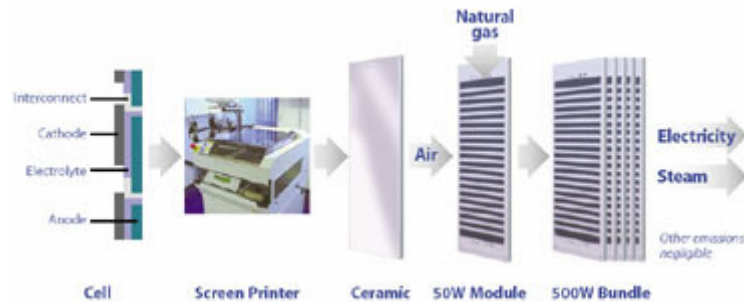


Abbildung 2-11 Schematische Darstellung SOFC (Quelle: Rolls-Royce)

2.4.3 Haldor Topsoe

Der dänische Brennstoffzellenentwickler Haldor Topsoe arbeitet zusammen mit dem finnischen Unternehmen Wärtsilä an SOFC.

Für 2004 waren Tests von Brennstoffzellen mit 1 bis 5 kW_{el} geplant und 2005 die Vorstellung eines Prototyps mit einem elektrischen Leistungsbereich von 20 bis 50 kW_{el} vorgesehen. Im Anschluss daran sind 2007 kommerzielle Demonstrationsanlagen angekündigt.



Abbildung 2-12 SOFC (Quelle: Haldor Topsoe)

2.4.4 ZTEK Corporation, Inc.

Seit 1994 ist ZTEK mit der Entwicklung von planarer SOFC beschäftigt. Zuerst wurde eine SOFC mit 1 kW_{el} entwickelt.

Einige Brennstoffzellen mit 25 kW_{el}, in dem Erdgas als Brennstoff durch die interne Reformierung eingesetzt wird, sind in Betrieb. Zur Demonstration wird eines der Systeme im Dinosaur State Park in Connecticut betrieben.

Derzeit entwickelt ZTEK an einer Kombinationsanlage aus SOFC und Gasturbine im Leistungsbereich von 200 kW_{el}. Außerdem wird an einer Kombination mit Absorptionskältemaschine gearbeitet.

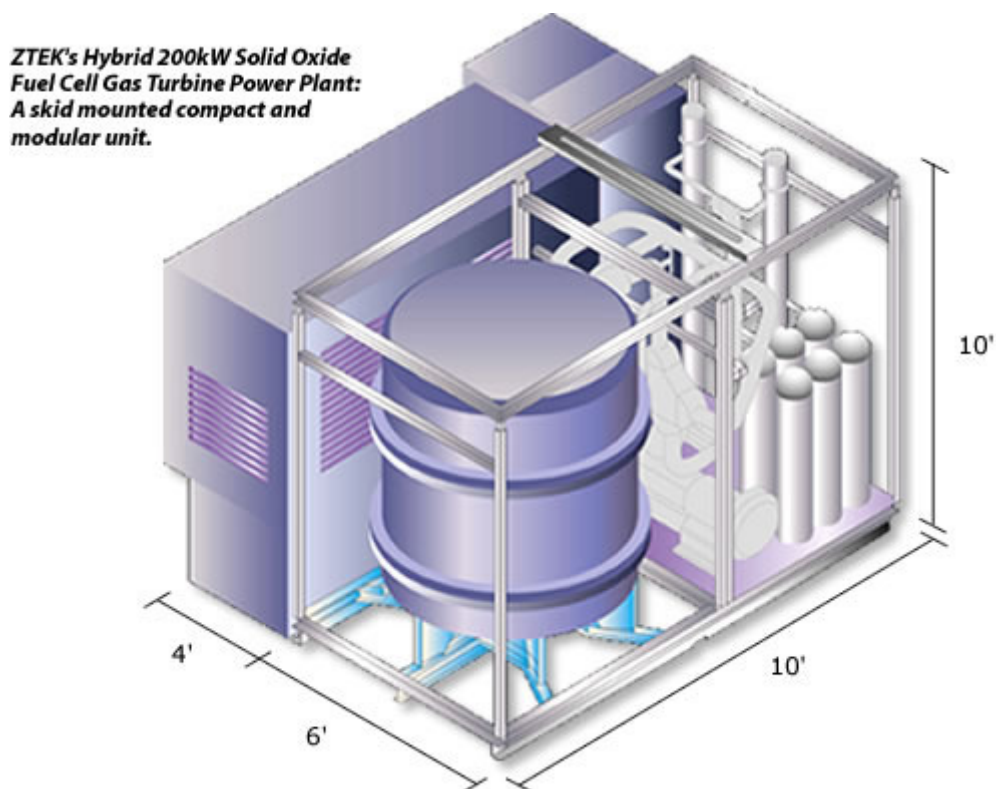


Abbildung 2-13 Schematischer Anlagenkonfiguration SOFC mit Gasturbine
(Quelle: ZTEK Corporation, Inc.)

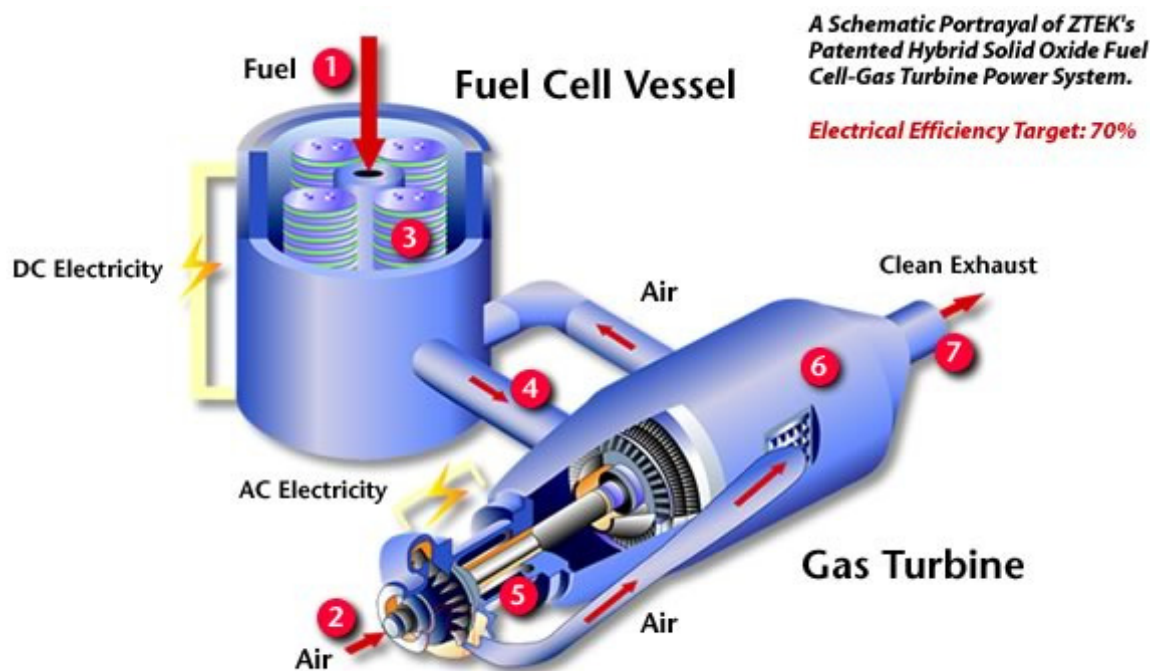


Abbildung 2-14 Schematische Darstellung SOFC mit Gasturbine
(Quelle: ZTEK Corporation, Inc.)

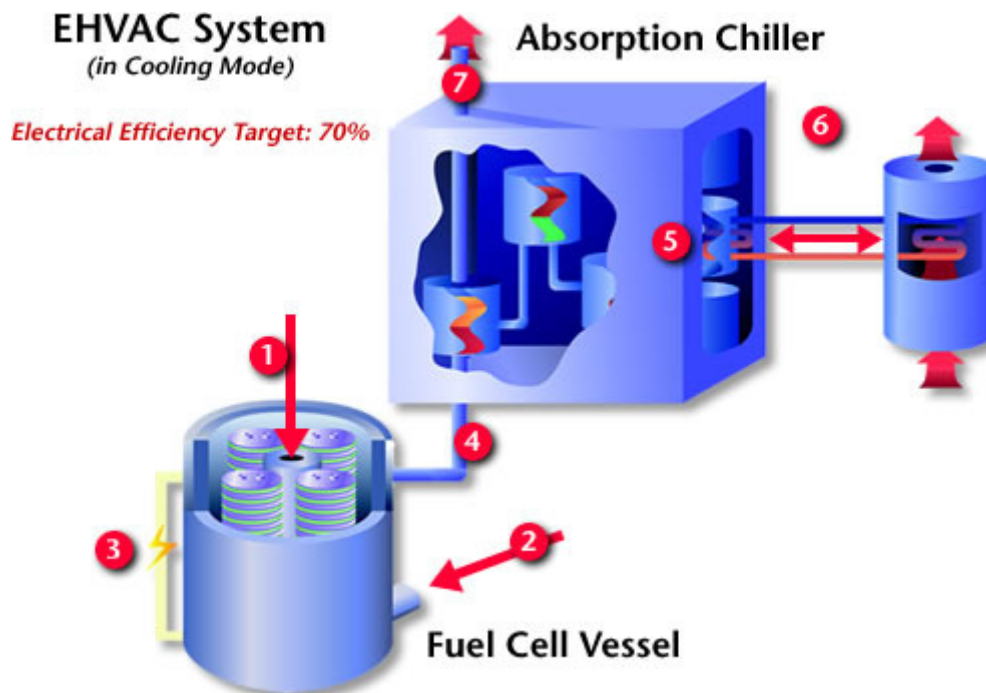


Abbildung 2-15 Schematische Darstellung SOFC mit Absorptionskältemaschine
(Quelle: ZTEK Corporation, Inc.)

3 Betreiber

Viele Energieversorger betreiben verschiedene Brennstoffzellen in Feldtests, um Betriebserfahrungen auch für die weiteren Entwicklungen zu sammeln.

3.1 E.ON Ruhrgas AG

Ruhrgas arbeitet an der Entwicklung verschiedener Brennstoffzellentypen mit, so z. B. an der MCFC von MTU oder der PAFC von ONSI. In ihrem Entwicklungszentrum wird u. a. die Entschwefelung des Erdgases optimiert. Daneben laufen Arbeiten im Bereich der Reformer-Technologie.

3.2 EnBW Energie Baden-Württemberg AG

Seit 2001 hat EnBW das Vorserienmodell der Sulzer Hexis Brennstoffzelle eingesetzt. Mittels eines Contractings wird es Haushalten ermöglicht, durch die Zelle eigenen Strom und Wärme zu produzieren. Auch in Verwaltungseinrichtungen und Gewerbebetriebe wird der Einsatz erprobt.

Im Dezember 2002 nahm EnBW eine MCFC (HotModule von MTU) bei den Michelin-Reifenwerken in Karlsruhe in Betrieb. Das Demonstrationsprojekt wird über fünf Jahre durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) gefördert. Die Brennstoffzelle ist die erste, die Prozesswärme für die Dampferzeugung erzeugt.

Weiterhin wurde bis Ende 2003 eine PEMFC zusammen mit zwei Blockheizkraftwerken im Rahmen des Programms EDISON des BMWA getestet. Die von Alstom Ballard entwickelte Brennstoffzelle versorgte das Thermalbad in Mingolsheim mit knapp 1.000 MWh Strom und 900 kWh Wärme. Im Frühjahr 2005 testet EnBW eine Vaillant-Brennstoffzelle in einem Pflegeheim bei Karlsruhe.

3.3 europen fuel cell GmbH (efc)

efc, die aus der Hamburg Gas Consult GmbH hervorging, gehört zusammen mit dem Mini-BHKW-Hersteller SenerTec zur britischen Baxi Group Ltd. Ziel der efc ist die Produktentwicklung und der Einsatz von Brennstoffzellen-Heizgeräten in Einfamilienhäusern. Im Entwicklungslabor und bei Feldtests beschäftigt sich efc mit der Entwicklung der zweiten Generation der Brennstoffzellen-Heizgeräte. In der Beta-Einheit ist ein Reformer im Gerät integriert. Die PEM-Brennstoffzelle verfügt über Leistungen von 1,5 kW_{el} und 3 kW_{th} und erzielt Wirkungsgrade über 80 %. Das integrierte Zusatzheizgerät weist eine Leistung von 15 kW_{th} auf. 2003 fanden Feldversuche mit ca. 100 Anlagen statt.

3.4 RWE Fuel Cells

RWE Fuel Cells erprobt und entwickelt Brennstoffzellen seit 2002 zusammen mit verschiedenen Partnern. Im Essener Brennstoffzellen-Pavillon sowie in privaten Haushalten werden mehrere Brennstoffzellentypen getestet (u. a. HotModule von MTU). Feldtests laufen mit der SOFC „HXS 1000 Premiere“ von Sulzer Hexis.

Seit 2003 besteht ein Joint Venture mit MTU Friedrichshafen. Ab 2006 soll mit der Serienproduktion von 250 kW HotModule-Anlagen gestartet werden. Diese MCFC soll Leistungen bis zu 3 MW erbringen und ist somit für Industrie- und Gewerbeunternehmen ausgelegt.

In Kooperation mit dem amerikanischen Hersteller IdaTech Fuel Cells und dem deutschen Unternehmen Bosch Buderus Thermotechnik GmbH werden seit 2004 Brennstoffzellen für Haushalte und Kleingewerbe entwickelt und erprobt. In der Landesvertretung NRW in Berlin wurden vier 4,6 kW-PEMFC von IdaTech installiert. In Kombination mit einer Mikrogasturbine und einer Kältemaschine wird das Gebäude mit Strom, Wärme und Kälte versorgt.

Gemeinsam mit den Stadtwerken Dinslaken/Fernwärmeversorgung Niederrhein wird eine PAFC mit 200 kW betrieben. Ferner wird ein Hot Module vom Typ MCFC zusammen mit der Fernwärmeversorgung Niederrhein für ein Wohngebiet in Krefeld erprobt (Nahwärmeversorgung).

Für 2005 ist die Inbetriebnahme einer MCFC im kommunalen Klärwerk in Ahlen vorgesehen, die Klärgas als Brennstoff verwertet.

3.5 EWE AG

Das Oldenburger Unternehmen gehört zu den größten deutschen Energieversorgern und betreibt insgesamt 40 Brennstoffzellen von Sulzer Hexis und Vaillant in Feldversuchen, u. a. im Rahmen des Projektes „Virtual Fuel Cell Power Plant“.

3.6 GEW RheinEnergie AG

Seit 2000 betreibt die GEW RheinEnergie AG zusammen mit der Stadtentwässerung Köln ein Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk auf dem Gelände des Klärwerks Köln-Rodenkirchen. Es ist die erste Anlage, die mit Klärgas betrieben wird. Anfang 2004 war die Anlage über 4.300 Stunden im Dauerbetrieb im Einsatz.

4 Zusammenfassung

Die innovative Brennstoffzellentechnologie ermöglicht die gleichzeitige Erzeugung von Wärme und Strom aus Wasserstoff und Sauerstoff. Die Marktanalyse stellt die zur Zeit verfügbaren bzw. sich in der Entwicklung befindlichen Brennstoffzellen zur stationären Anwendung dar.

Es wurden die zum Einsatz kommenden Techniken, die daran arbeitenden Firmen, der jeweilige Stand der Entwicklung, soweit Informationen dazu vorlagen, sowie die jeweils geplanten, weiteren Schritte vorgestellt.

Die Auswahl der Unternehmen, die sich mit der Entwicklung von stationären Brennstoffzellen beschäftigen, kann keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Die innovative Brennstoffzellentechnologie ist durch hohe Wirkungsgrade gekennzeichnet, die höher sind als bei der getrennten Produktion von Strom und Wärme oder bei Blockheizkraftwerken. Ein weiterer Vorteil sind die geringen Emissionen und ein niedriger Wartungsaufwand.

Die Marktanalyse ergab, dass diese Technologie allerdings noch einige Jahre von der kommerziellen Marktreife entfernt ist. Schätzungen nehmen einen nennenswerten Anteil der Brennstoffzellen auf dem Wärmemarkt erst ab 2010 an. Derzeit ist auf dem Markt nur die PAFC verfügbar.

Es sind noch einige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchzuführen, um die Investitionskosten auf ein zu den herkömmlichen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen konkurrenzfähiges Niveau von maximal 1.500 €/kW_{el} für den Hausenergiesektor zu erreichen.

Eine Kostenreduzierung ist nur durch Forschung und Entwicklung sowie durch ausreichend große Produktionsmengen möglich. Voraussetzung dafür ist, dass trotz verhältnismäßig hoher Einstiegspreise für auf dem Markt eingeführte und abgesetzte, erste Brennstoffzellengeräte der Lernprozess fortgeführt wird.

Entwicklungspotential liegt in den verschiedenen Bestandteilen einer Brennstoffzelle.

So führt der energetische Aufwand zur Gasaufbereitung zu einen um etwa 20 bis 40 % niedrigeren, elektrischen Systemwirkungsgrad. Für Hausenergiezentralen beträgt der derzeit erreichte, elektrische Wirkungsgrad höchstens 30 %, während 40 % möglich wären.

Auch die Brennstoffzellenstacks bieten Optimierungspotential in Hinblick auf Leistungssteigerung, Kostensenkung, Wartungsarmut und Lebensdauer.

Im Bereich der Hausenergieversorgung besteht die Gefahr, dass die Reduzierung des Jahresheizwärmebedarfs (z. B. durch die Energieeinsparverordnung) zu eingeschränkten Einsatzmöglichkeiten von KWK-Anlagen in diesem Bereich führt. Andererseits könnten Brennstoffzellen im Mikro-KWK-Bereich von etwa 1 bis 5 kW_{el} für die Hausenergieversorgung auch anderen Mikro-KWK-Anlagen wie z. B. Stirling oder Motor-BHKWs, die sich eben-

falls noch z. T. in der Entwicklung befinden, den Markt eröffnen und so zu einer stärkeren Konkurrenz führen. Einen Vorteil weist die Brennstoffzelle gegenüber von Motor-BHKW auf, da diese in der Leistungsklasse zur Hausenergieversorgung bis jetzt nicht wirtschaftlich realisiert werden können.

Durch den niedrigeren Jahresheizwärmebedarf ändert sich das Verhältnis zwischen Wärme- und Strombedarf, sodass die Brennstoffzelle mit der potenziell höheren Stromkennzahl begünstigt ist. Auch der modulare Aufbau der Brennstoffzelle stellt einen Vorteil gegenüber den konventionellen KWK-Anlagen dar.

Für verschieden Brennstoffzellensystem wurden Ökobilanzen¹ in Hinblick auf Emissionen durchgeführt. Im Vergleich zur ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung können die Emissionen um 20 bis 50 % reduziert werden.

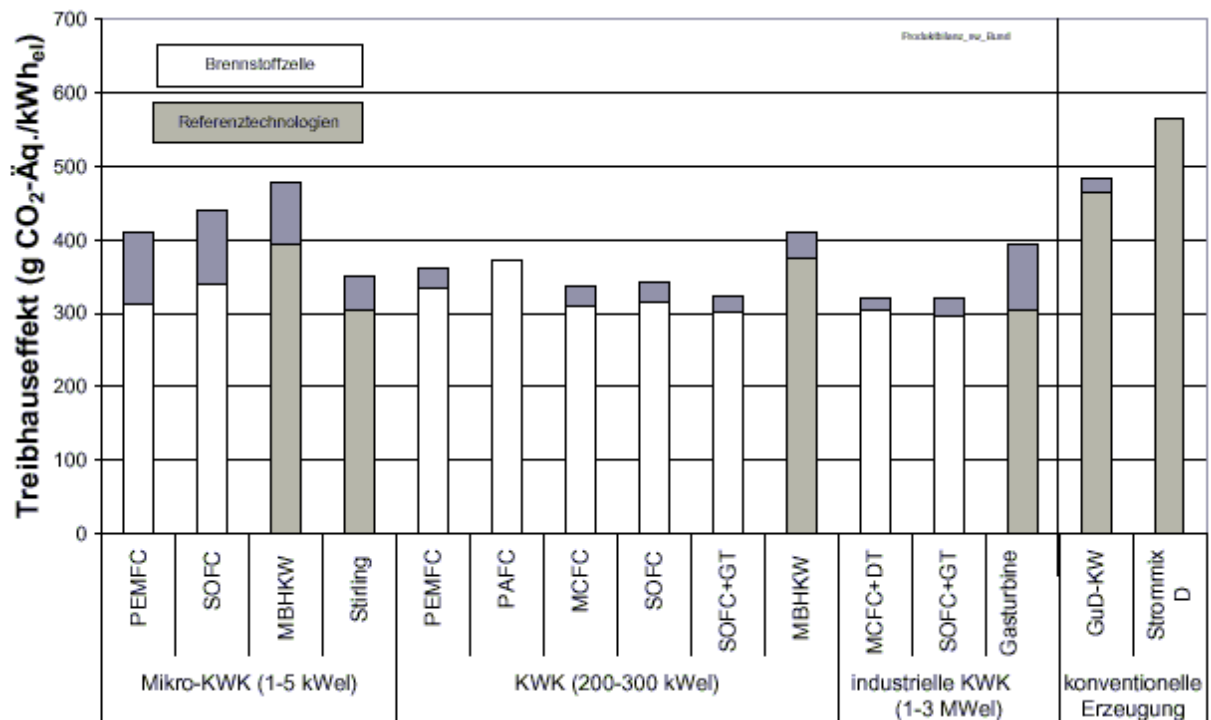


Abbildung 4-1 Klimabilanz verschiedener KWK-Optionen (Brennstoff: Erdgas) und ungekoppelter Stromerzeugung. Technologiestatus 2010. Für KWK-Technologien ist jeweils die optimistische „obere“-Abschätzung (weißer bzw. hellgrauer Balkenanteil) und die mittlere Abschätzung (gesamter Balken) dargestellt (angelehnt an Studie vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)
(Quelle: Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e. V. und BUND)

¹ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung - Ökobilanzen, Szenarien, Marktpotenziale

Für den Einsatz in Industrie und Gewerbe liegen die Investitionskosten um einen Faktor von 2,5 bis 20 teurer als die Konkurrenzsysteme. Da die Brennstoffzellenstapel etwa nur ein Drittel der Investitionskosten einnehmen, liegt der Entwicklungsbedarf besonders in der Systemintegration und den konventionellen Komponenten.

Von entscheidender Bedeutung sind die zukünftigen, elektrischen und thermischen Nutzungsgrade der verschiedenen Anlagen in Hinblick auf die ökologische Bewertung. Die zunehmende Konkurrenz trifft auch auf den Einsatz von regenerativen Energien als Brennstoff für alle KWK-Anlagen zu. Langfristig wird dies sowohl für Brennstoffzellen als auch für die konventionellen KWK-Anlagen als ein Ziel verfolgt.

In der Tabelle sind die technischen Daten der verschiedenen Brennstoffzellentypen aufgeführt.

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	Protonenleitende Membran	Phosphorsäure in poröser Matrix	Karbonatschmelze in einer Matrix	Keramischer Festkörper
Ionenleitung durch	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Betriebstemperatur	60 - 80 °C	200 °C	650 °C	800 - 1000 °C
Brennstoff zur Zelle	Wasserstoff (H ₂) ¹	Wasserstoff (H ₂) ¹	H ₂ , Erdgas, Biogas, Kohlegas ²	H ₂ , Erdgas, Biogas, Kohlegas
el. Systemnutzungsgrad (mit Erdgas)	Klein-BZHG: 28% bis 32% Großsystem: 40%	37%	50% (ohne DT) 55% (mit DT)	Klein-BZHG: 28% Großsystem: 47% bis 60% (hybrid)
Gesamtnutzungsgrad	80% bis 90%	80% bis 90%	80% bis 90%	80% bis 90%
Arbeitstemperatur des Zellstapels	bis ca. 90 °C	200 °C	650 °C	ca. 950 °C
Temperatur der nutzbaren Wärme	bis ca. 80 °C	bis max. 120 °C	ca. 400 °C	ca. 450 °C bis 500 °C
Anwendung typische Leistung	mobil, BHKW 2 bis 200 kW _{el}	KWK 200 kW _{el}	KW, KWK 250 kW _{el}	KW, KWK 1 kW _{el} - 10 MW _{el}
Entwicklungsstand (2004)	Prototyp 3 kW _{el} , 200 kW _{el}	Kleinserie 200 kW _{el}	Demonstration 250 kW _{el}	Demonstration 250 kW _{el} (druckaufgeladen, ohne GT)

Tabelle 4-1 Kenndaten verschiedener Brennstoffzellentypen (Quelle: B.KWK e. V. und BUND)

¹ Bei Einsatz eines Reformers auch weitere Gase wie Erd-, Bio- oder Grubengas

² Interne Reformierung möglich

Ausblick:

In Verbindung mit einer nachhaltigen Energiewirtschaft und einer Verringerung der Umweltbelastungen wird das Anwendungspotential von Brennstoffzellen liegen. Trotz der Reduzierung des Wärmebedarfs und des steigenden Anteils an regenerativen Energieanwendungen bietet eine Nachhaltigkeitsstrategie ausreichendes Entwicklungspotential für innovative KWK-Technologien wie z. B. die Brennstoffzelle.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Schematische Darstellung Hausenergiesystem (Quelle: BINE Informationsdienst)	5
Abbildung 1-2 Brennstoffzelle EURO (Quelle: Vaillant)	8
Abbildung 1-3 PEMFC-Brennstoffzelle (Quelle: HGC GmbH)	9
Abbildung 1-4 Brennstoffzelle (Quelle: Viessmann)	11
Abbildung 1-5 Brennstoffzellen-Heizgerät von TIFC (Quelle: ForschungsAllianz BrennstoffZellen Baden-Württemberg)	11
Abbildung 1-6 Schemazeichnung Brennstoffzelle (Quelle: Buderus)	12
Abbildung 1-7 Nexa Power Module und Nexa RM Series (Quelle: Ballard)	14
Abbildung 1-8 Einbindungsschema Nexa Power Module (Quelle: TSB)	14
Abbildung 1-9 AirGen (Quelle: Coleman)	15
Abbildung 1-10 Vorserie (Quelle: Ebara)	16
Abbildung 1-11 Prototyp Kerosin-Brennstoffzelle (Quelle: Ebara)	17
Abbildung 1-12 EtaGEN5 (Erdgas), FCS 1200 (Methanol) und FPM (Wasserstoff) Brennstoffzelle (Quelle: IdaTech)	18
Abbildung 1-13 stationäre PEMFC-Brennstoffzelle (Quelle: General Motors)	20
Abbildung 1-14 H2E und Forza (Quelle: Nuvera Fuel Cells)	21
Abbildung 1-15 Avanti und DuAlto (Quelle: Nuvera Fuel Cells)	22
Abbildung 1-16 Einsatzgebiete und Ausführungsarten PEMFC-Brennstoffzelle (Quelle: Axane Fuel Cell Systems)	23
Abbildung 1-17 Schematische Darstellung unterbrechungsfreie Stromversorgung mit Batterien und mit Brennstoffzelle (Quelle: ReliOn, Inc.)	24
Abbildung 1-18 Independence 1000 (Quelle: ReliOn, Inc.)	24
Abbildung 1-19 Daten Independence 1000 (Quelle: ReliOn, Inc.)	25
Abbildung 1-20 Outdoor Enclosure System (Quelle: ReliOn, Inc.)	25
Abbildung 1-21 Vorserienmodell HXS 1000 Premiere (Quelle: Sulzer Hexis)	28
Abbildung 1-22 Degeneration verschiedener Stackgenerationen (Quelle: Sulzer Hexis)	28
Abbildung 1-24 Seriennahes Brennstoffzellengerät Galileo Mk II (Quelle: Sulzer Hexis)	29
Abbildung 1-25 Prototyp des CHP und schematische Darstellung (Quelle: Ceramic Fuel Cells, Ltd.)	31
Abbildung 1-26 Schematische Darstellung DG (Quelle: Ceramic Fuel Cells, Ltd.)	32
Abbildung 2-1 Wirkungsgrad abhängig von Leistung für Stromerzeuger (Quelle: Hydrogeit, MTU)	33

Abbildung 2-2 Ansicht und Schemazeichnung 250 kW-PEMFC-Brennstoffzelle (Quelle: Ballard Generation Systems).....	35
Abbildung 2-3 PC 25 C, PAFC-Brennstoffzelle (Quelle: UTC Fuel Cells)	37
Abbildung 2-4 Ansicht offenes Hot Module und Schema Querschnitt Hot Module (Quelle: MTU CFC Solutions)	40
Abbildung 2-5 Hot Module HM 300 (Quelle: MTU CFC Solutions).....	41
Abbildung 2-6 Demonstrationsanlage 100 kW _{el} (Quelle: Ansaldo Fuel Cells)	42
Abbildung 2-7 EDB/ELSAM 100 kW SOFC Anlage in Westervoort (NL) (Quelle: Siemens Westinghouse)	44
Abbildung 2-8 220 kW Hybridanlage mit Mikro-Gasturbine, Southern California Edison (Quelle: Siemens Westinghouse)	44
Abbildung 2-9 Vereinfachtes Prozessdiagramm der druckaufgeladenen SOFC (Quelle: Siemens-Westinghouse)	45
Abbildung 2-10 Vergleich Hybrid-Anlage mit konventionellen KWK-Anlagen anhand Wirkungsgrad abhängig von elektrischer Leistung (Quelle: Siemens)	46
Abbildung 2-11 Schematische Darstellung SOFC (Quelle: Rolls-Royce)	47
Abbildung 2-12 SOFC (Quelle: Haldor Topsoe).....	47
Abbildung 2-13 Schematischer Anlagenkonfiguration SOFC mit Gasturbine (Quelle: ZTEK Corporation, Inc.).....	48
Abbildung 2-14 Schematische Darstellung SOFC mit Gasturbine (Quelle: ZTEK Corporation, Inc.)	49
Abbildung 2-15 Schematische Darstellung SOFC mit Absorptionskältemaschine (Quelle: ZTEK Corporation, Inc.).....	49
Abbildung 4-1 Klimabilanz verschiedener KWK-Optionen (Brennstoff: Erdgas) und ungekoppelter Stromerzeugung. Technologiestatus 2010. Für KWK-Technologien ist jeweils die optimistische „obere“-Abschätzung (weißer bzw. hellgrauer Balkenanteil) und die mittlere Abschätzung (gesamter Balken) dargestellt (angelehnt an Studie vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Quelle: Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e. V. und BUND).....	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1 Kenndaten zu PEMFC	6
Tabelle 1-2 Daten der Brennstoffzelle EURO (Quelle: Vaillant)	7
Tabelle 1-3 Daten der Brennstoffzelle (Quelle: Viessmann)	10
Tabelle 1-4 Daten Nexa Power Module (Quelle: Ballard).....	14
Tabelle 1-5 Daten Vorserie EBC (Quelle: Ebara Ballard Corporation)	16
Tabelle 1-6 Daten EtaGen5 für Brennstoffzellen-Heizgerät (Quelle: BINE Informationsdienst, IdaTech/RWE Fuel Cells/Bosch Buderus Thermotechnik)	19
Tabelle 1-7 Kenndaten KWK-Anlage aus Brennstoffzelle und Mikrogasturbine in NRW- Landesvertretung in Berlin (Quelle: RWE Fuel Cells GmbH).....	20
Tabelle 1-8 Daten Avanti (Quelle: Nuvera Fuel Cells)	22
Tabelle 1-9 Daten PEMFC (Quelle: Axane Fuel Cell System)	23
Tabelle 1-10 Kenndaten SOFC	26
Tabelle 1-11 Daten der Brennstoffzelle HXS 1000 Premiere (Quelle: Sulzer Hexis).....	27
Tabelle 1-12 Daten des seriennahen Brennstoffzellengeräts (Quelle: Sulzer Hexis)	30
Tabelle 1-13 Daten CHP (Quelle: Ceramic Fuel Cells, Ltd.)	31
Tabelle 1-14 Daten DG (Quelle: Ceramic Fuel Cells, Ltd.)	32
Tabelle 2-1 Kenndaten PEMFC	34
Tabelle 2-2 Kenndaten PAFC	36
Tabelle 2-3 Daten PC 25 C (Quelle: UTC Fuel Cells)	37
Tabelle 2-4 Kenndaten MCFC	39
Tabelle 2-5 Daten Hot Module HM 300 (Quelle: MTU CFC Solutions).....	40
Tabelle 2-6 Kenndaten SOFC	43
Tabelle 4-1 Kenndaten verschiedener Brennstoffzellentypen (Quelle: B.KWK e. V. und BUND)	54

Quellen

- Hoogers, G., Simon, R.
Entwicklungsstand stationärer Brennstoffzellen
Weiterbildungs-Seminar „Dezentrale Energiesysteme“
29. April 2004
- Fachinformationszentrum Karlsruhe
Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
BINE Informationsdienst
projektinfo 06/04
Hausenergiesysteme mit Brennstoffzellen
- EWR Aktiengesellschaft
Informationsveranstaltung
Mit Energie in Richtung Zukunft
26. März 2004
- BZ Bündnis Deutschland
Brennstoffzellen in Deutschland
Eine Strategie zur Markteinführung
- BHKW-Infozentrum Rastatt
Brennstoffzellen-Projekte in Deutschland
(Stand: August 2002)
- Siemens Power Generation
Power Journal 1/2001
Vorkommerzielle Demonstrationskraftwerke für SOFC-Anlagen und Hybridsysteme mit Mikrogasturbinen
- Sulzer Hexis
An intermediate report on the way to a near-series Sulzer Hexis fuel cell system
Fuel Cell Forum 2004
CH-Luzern
- Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e. V. (B.KWK) und Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND)
Zwischen Euphorie und Ernüchterung
Stand und mittelfristige Perspektiven stationärer Brennstoffzellen
Oktober 2004
Martin Pehnt, Klaus Traube

- Zusammenfassung
Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung - Ökobilanzen, Szenarien, Marktpotenziale
W. Krewitt, M. Pehnt, M. Fishedick, H. Temming (Hrsg.)
Erich Schmidt Verlag
Berlin 2004
Auftraggeber/Förderer: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- Vaillant: www.vaillant.de
- Viessmann: www.viessmann.de
- UTC Fuel Cells: www.utcfuelcells.com
- European Fuel Cell GmbH: www.fuelcellmarkets.com
- Ebara Corporation: www.ebara.co
- Ballard Power Systems: www.ballard.com
- Axane Fuel Cell Systems: www.axane.fr
- Nuvera Fuel Cells: www.nuvera.com
- Buderus: www.buderus.de
- Ceramic Fuel Cells, Ltd.: www.cfcl.com.au
- HGC Hamburg Gas Consult GmbH: www.hgc-hamburg.de
- MTU CFC Solutions: www.mtu-friedrichshafen.com
- FEW RheinEnergie AG: www.rheinenergie.com
- www.initiative-brennstoffzelle.de
- www.energieportal24.de
- www.minibhkw.de
- www.diebrennstoffzelle.de
- www.innovations-report.de
- www.forum-brennstoffzelle.de
- www.energieland.nrw.de