

Vorhaben im InnoRegio Projekt „RIST“

Entwicklung eines integrierten Dampfreformers für erdgasbetriebene Brennstoffzellenheizgeräte

Abschlussbericht

Teil: DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH

Förderkennzeichen: 03I0306D

Zuwendungsempfänger: DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH
Theklaer Str. 42
04347 Leipzig

Autoren: Giesel, S.; Krause, H.;

Projektpartner: TU Bergakademie Freiberg
Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik
G.-Zeuner-Str. 7, 09596 Freiberg
UTF GmbH, Brand-Erbisdorf
Erzstrasse 15, 09618 Brand-Erbisdorf
Behr Industry Freiberg GmbH
Gewerbegebiet Ost, Ahornstrasse 8,
09627 Hilbersdorf

Berichtszeitraum: 01.11.2003 – 30.04.2006

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung	4
1. Aufgabenstellung.....	5
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	9
3.1 Planung des Vorhabens	9
3.2 Ablauf des Vorhabens	9
4. Wissenschaftlich-technischer Stand bei Beginn des Projektes	10
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	18
6. Literatur	19
II. Ausführliche Darstellung	21
1. Ergebnisse des Antragstellers DBI im Verbundprojekt.....	21
1.1 Erstellung eines Brennerkonzeptes für den Reformer.....	21
1.2 Entwicklung, Bau und Erprobung des Versuchsbrenners	24
1.3 Konstruktive Gestaltung des Kompaktreformers (Schwerpunkt Brenner/Abgasstrecke).....	28
1.4 Aufbau und Betrieb der Brennstoffzellenanlage	30
1.5 Monitoring und Auswertung der Betriebsergebnisse der Brennstoffzellenanlage	32
2. Verwertung der Ergebnisse	34
3. Fortschritte bei anderen Stellen.....	35
4. Veröffentlichung der Ergebnisse	36
III. Erfolgskontrollbericht	38
1. Beitrag des Vorhabens zur Erreichung der förderpolitischen Ziele.....	38
2. Ergebnisse und Erfahrungen.....	40
2.1 Wissenschaftlich– technisches Ergebnis.....	40
2.2 Erreichte Nebenergebnisse.....	41
2.3 Wesentliche Erfahrungen	42
3. Fortschreibung des Verwertungsplans	43
3.1 Erfindungen/Schutzrechte/Lizenzen/Verwertungsmöglichkeiten	43

3.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	43
3.3	Wissenschaftlich – technische Erfolgsaussichten	45
3.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	46
4.	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	46
5.	Präsentationsmöglichkeiten	47
6.	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	47

I. Kurze Darstellung

Die gekoppelte Bereitstellung von Wärme und Strom in dezentralen Anlagen mittels Brennstoffzellen ist in der jüngsten Zeit stark in den Vordergrund gerückt. Die Entwicklung von dezentralen Brennstoffzellenanlagen ist eine der ausgewiesenen Zukunftstechnologien die forschungspolitisch in Deutschland und der Europäischen Union höchste Priorität genießt. So ist diese Zukunftstechnologie in das VI. Rahmenprogramm aufgenommen worden.

Zur Brennstoffzellentechnologie gehören sowohl die dezentrale Bereitstellung von Wasserstoff aus verfügbaren Energieträgern (Erdgas) als auch die Entwicklung von Brennstoffzellenstacks. Eine alternative Wasserstoffwirtschaft, die in der Lage wäre Wasserstoff zu niedrigen Preisen und in großen Mengen als Energieträger an einen breiten Anwenderkreis zu verteilen, existiert derzeit nicht. Deshalb hat eine dezentrale Erzeugung von Wasserstoff, z. B. durch die Erdgas-Reformierung, eine ähnlich hohe Priorität wie die Brennstoffzelle selbst. Die Effektivität von Brennstoffzellengeräten ist damit wesentlich von der Güte des Reformierungsprozesses abhängig, von seinen Verlusten und der internen Nutzung von Sekundärenergien. Gerade auf dem Gebiet der Wasserstoffbereitstellung im Kleinlastbereich (< 50 kW) bestehen Lücken in der technologischen Umsetzung von Grundlagenergebnissen der Katalysatorhersteller zum funktionstüchtigen Reformer. Diese Lücken führen einerseits zu hohen Herstellungskosten wegen der komplexen Anlagenstruktur, andererseits kann ein ausreichend stabiler Langzeitbetrieb nicht garantiert werden. Im Rahmen des Projektes wurde die bewährte Zusammenarbeit zwischen der DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Freiberg (DBI) und der TU Bergakademie Freiberg, Inst. f. Wärmetechnik und Thermodynamik (TUBA) durch zwei Partner aus der Industrie erweitert:

Behr Industry Freiberg GmbH (BIF)

UTF GmbH, Brand-Erbisdorf (UTF)

1. Aufgabenstellung

Innerhalb des Reformers gibt es mehrere innovative Ansätze zur Optimierung, sei es durch die Kombination von Prozessstufen oder durch den Einsatz neuer Materialien. Diese Ansätze haben sich während der bisherigen Zusammenarbeit der Partner und aus den Ergebnissen von Versuchen ergeben. Hauptziel ist die Entwicklung eines kompakten Dampfreformermoduls für Brennstoffzellenheizgeräte. Diesem Endprodukt ordnen sich folgende grundsätzliche Ziele unter:

- Erhöhung der spezifischen Leistung bzw. der Lebensdauer
- Senkung des Primärenergieverbrauches
- Verringerung der Anlagenkomplexität und des Steuerungsaufwandes
- Erweiterung des Gasbeschaffenheitsbereiches für den Mehrstoff-Porenbrenner im Anfahrbetrieb und bei höheren H₂-Nutzungsgraden in der Brennstoffzelle
- Senkung der Anlaufzeiten und Zeiten für Lastwechsel.

Die Zielstellungen sind eng miteinander verknüpft. Sie lassen sich durch den Einsatz neuer Materialien, die intelligente und innovative Zusammenfassung von Prozessstufen und damit der Minimierung der Baugrößen erreichen. Aus dieser strategischen Zielstellung ergeben sich die konkreten Entwicklungsziele für das Verbundprojekt:

1. Entwicklung eines Vorreformers auf der Basis neuer Materialien
2. Entwicklung eines chemisch aktiven Wärmeübertragers

Die Entwicklungsarbeit für den Reformer muss in eine PEM-Brennstoffzellen-Testanlage münden, in der die Funktionstüchtigkeit des kompletten, neu entwickelten Dampfreformermoduls mit der Restgasrückführung und unter den verschärften Bedingungen des späteren Einsatzes Langzeit erprobt werden kann. Die beiden Entwicklungsziele sind dazu geeignet, das Produktspektrum der beteiligten Produzenten zu erweitern und das nicht nur für das gemeinsame Endprodukt, sondern auch für die Zwischenprodukte. Nach Abschluss des Vorhabens werden deshalb aus den Erkenntnissen der Versuchsanlage Prototypen für eine Serienproduktion entwickelt. Die Erweiterung einer Werte schöpfenden Produktion auf innovative Erzeugnisse trägt damit nachhaltig zur Stärkung der Region Freiberg bei.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Bei der Beantragung des Forschungsprojektes hatten sich folgende Brennstoffzellen-Konzepte für den Einsatz in kleinen stationären Energieversorgungsanlagen als aussichtsreich herausgestellt:

- die Niedertemperatur-PEM-Zellen (NT-PEM)
- die SOFC-Technologie (SOFC)

Allen Technologien wurde ein ausreichendes wirtschaftliches Potenzial bescheinigt. Nach den Einschätzungen der Verbundpartner zeichnete sich die NT-PEM-Technologie dabei durch den fortgeschrittensten Entwicklungsstand und die größte Flexibilität in der Weiterentwicklung aus. Deshalb, und weil hier die besten Voraussetzungen vorhanden waren, sollte das Konzept der PEM-Technologie konsequent beibehalten und weiter entwickelt werden.

Die Antragsteller beschäftigen sich zum Teil seit 1995 mit der Entwicklung und Erprobung der Brennstoffzellen-Technologie auf der Seite des Erdgas-Reformings. Im TGZ Riesa-Großenhain, Glaubitz werden seit 1996 Aufgabenstellungen zur Entwicklung von Brennstoffzellenanlagen bearbeitet. Dazu gehören vor allem Fragen des Erdgas-Steam-Reformings, aber auch Fragen des Zusammenspiels von Anlagenkomponenten [1]. Im Vordergrund standen die Problematik der Reformatgasqualität (H_2 -Gehalt, CO-Gehalt) in Abhängigkeit von bestimmten Betriebssituationen sowie der elektrische Wirkungsgrad von Brennstoffzellen-Stacks bei unterschiedlichen Wasserstoffgehalten im Reformatgas. Die Anlage und der Mitarbeiterstab wurde 1999 von der TU Bergakademie Freiberg übernommen und die Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Dampfreformern wurden fortgesetzt.

Der Partner DBI ist ein ausgewiesener Entwickler von Brennern, insbesondere von Brennern für unterschiedliche Gase, wie wasserstoffhaltige Gase, die im Reformierungsprozess anfallen. Zusätzlich nahm das DBI an mehreren Projekten teil, die eine Analyse des Betriebsverhaltens von Brennstoffzellen- BHKW zum Ziel hatten [4].

Die Firma UTF Umwelttechnik Freiberg GmbH ist Entwickler, Hersteller und Vertreiber von Anlagen und Ausrüstungen der Thermoprozesstechnik (Trocknersysteme, Thermoprozessanlagen u.a.). Dazu gehören auch Brennersysteme,

Nachverbrennungsanlagen und katalytische Abgasnachbehandlungen. Auf dem Gebiet der Abgasnachbehandlung werden auch Abgaskatalysatoren und Rußfilter für Fahrzeuge entwickelt und gefertigt. Die UTF verfügt dazu über hervorragende Kapazitäten für den Thermoprozessanlagenbau mit Kenntnis der Besonderheiten von chemisch aktiven Komponenten.

Auf dem Gebiet der Herstellung kleiner Wärmeübertrager besitzt die Behr Industry GmbH, Freiberg (BIF - ehemals KF Kühlerbau Freiberg GmbH) langjährige Erfahrungen. BIF entwickelt, konstruiert und fertigt Wärmeübertrager/Kühler für Dieselmotoren und den industriellen Einsatz. Die Kompetenz in der Herstellung von Kühlsystemen basiert auf langjährigen Erfahrungen bei der Produktion und dem Vertrieb von Wärmetauschern zur Motorenkühlung. Das Unternehmen hat sich besonders auf den Gebieten der Schmieröl- und Getriebeölkühlung, der Rückkühlung von mittels Abgasturbolader verdichteter Ladeluft sowie der Kühlung des Motorkühlwassers bei Schienenfahrzeugen und Schiffen spezialisiert. Als Zulieferer für Motorenhersteller und Energieerzeuger wird BIF von den einschlägigen Entwicklungen in diesen Branchen tangiert und versucht mit der Entwicklung eigener Produkte in relevante Marktbereiche einzudringen. BIF trug ebenfalls zu den bisher erzielten Ergebnissen bei. Für die o.g. Brennstoffzellen-Versuchsanlagen der TUBA lieferte sie einen Überhitzer für das Rohgasgemisch als auch einen Hochtemperaturwärmeübertrager, der als Konditionierer eingesetzt wurde.

Seit 1999 arbeiteten die Verbundpartner gemeinsam an der Entwicklung und Erprobung von Versuchsanlagen nach der PEM-Technologie mit einem eigenen Dampfreformer auf Erdgasbasis. Diese Anlage war im Jahr 2001 in den Testbetrieb gegangen. Sie erreichte in ihrer letzten Ausbaustufe vor Beginn des Projektes eine elektrische Leistung von ca. 4 kW. Ein Schema der Anlage ist in Abbildung I-1 dargestellt. Auf der Grundlage dieses Entwicklungsstandes wurden die Forschungsaufgaben zum Gesamtsystem im ZIP-Projekt „Entwicklung und Feldtest von stationären PEM- Brennstoffzellenanlagen für die dezentrale Energieversorgung im Leistungsbereich bis 12 KW“ erfolgreich fortgesetzt. Im Ergebnis dieses Projektes musste aber festgestellt werden, dass die Erforschung und Entwicklung der Komponenten bei den Zulieferern nicht die Erwartungen erfüllte bzw. hinter den Fortschritten bei der Systementwicklung stark zurückgeblieben war. Daraufhin musste im Rahmen des vorliegenden Folgeprojektes dieser Problemkomplex

vertiefend bearbeitet werden. Dabei war die Nutzung der im vorhergehenden Projekt und anderen vorangegangenen Forschungsarbeiten geschaffenen Basis besonders vorteilhaft. Das betraf insbesondere:

- vorhandene Versuchsanlagen
- vorhandene Werkzeuge
- Versuchsergebnisse
- spezifisch entwickelte Messverfahren
- Kooperationen mit technologiespezifischen Lieferanten

und nicht zuletzt die Erfahrungen der Mitarbeiter und der Kooperationspartner.

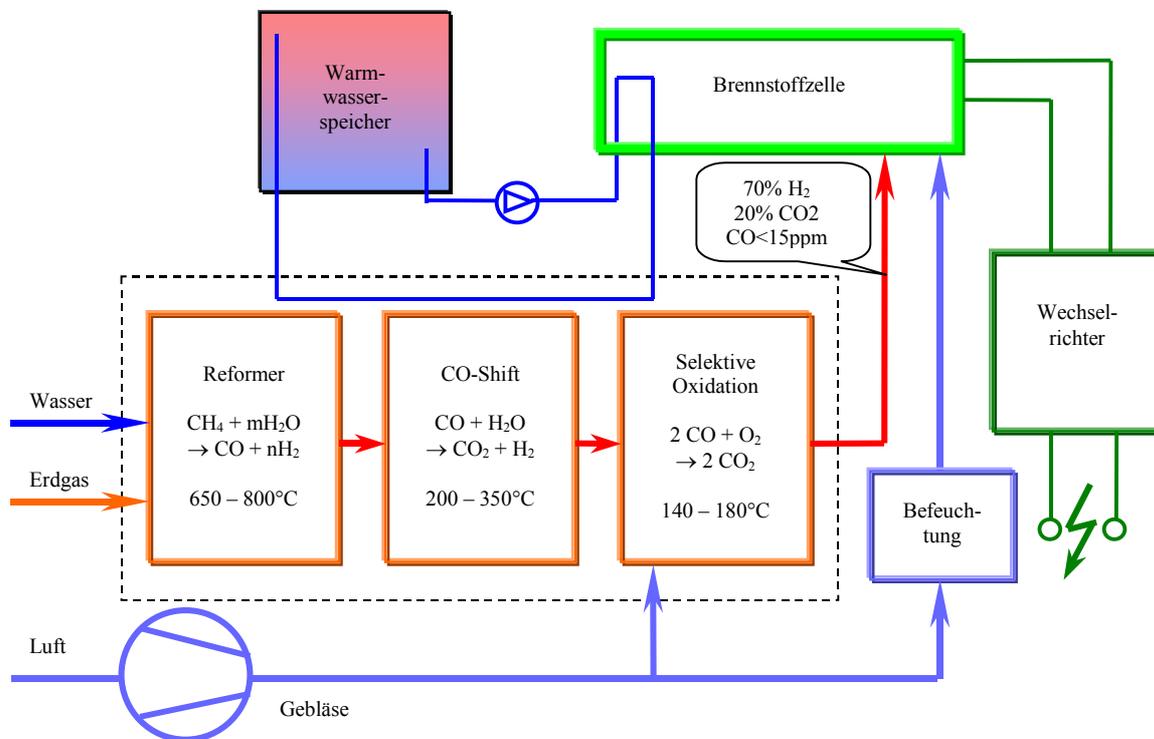


Abbildung I-1: Schema eines Brennstoffzellen- BHKW – Entwicklungsstand des Konsortiums mit Beginn des Forschungsprojektes [2]

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1 Planung des Vorhabens

Die Planung des Vorhabens erfolgte aufbauend auf die positiven Erfahrungen des vorhergehenden Projektes in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern im Rahmen der Antragserarbeitung. Dabei wurde, wie im Übersichtsplan des Antrags dargestellt, großer Wert auf die Optimierung des Verhältnisses zwischen der Verantwortung der Partner für Ihre spezifischen Teilaufgaben und die Zusammenführung der Teilaufgaben im Gesamtprojekt gelegt.

Bei den einzelnen Verbundpartnern wurden Verantwortliche auf der Teilprojektebene festgelegt und regelmäßige Projektberatungen für das Verbundprojekt durchgeführt. Zusätzlich wurden die Zuständigkeiten für die Zusammenarbeit mit den vorgesehenen Systemanwendern und Lieferanten abgestimmt.

3.2 Ablauf des Vorhabens

Bis auf die beantragte und nicht bestätigte Verlängerung des Vorhabens um zwei Monate wurde das Vorhaben im Wesentlichen vom Ablauf her planmäßig realisiert. Es gab während der Fertigungsphase der neuen beschichteten Wärmeübertrager erhebliche Fertigungsprobleme, die den Aufbau der Gesamtanlage und deren Inbetriebnahme deutlich verzögerten. Innerhalb der ersten Projektphase wurde die Entwicklung der einzelnen Komponenten des Systems durch die jeweiligen Projektpartner in Angriff genommen. Für die DBI Gas- und Umwelttechnik betraf das vor allem

- Die Entwicklung eines Brenners für die unterschiedlichen Energieträger und Sekundärenergien im Brennstoffzellen-Heizgerät
- Die Einordnung des Brenners in den Kompaktreformer
- Die Entwicklung einer angepassten Sicherheits- und Steuerungstechnik
- Die Entwicklung eines Abgassystems mit Brennwertnutzung

Während die ausführliche Beschreibung der Ergebnisse im Abschnitt II erfolgt, sollen nachfolgend noch einige Besonderheiten innerhalb des Ablaufs genannt werden:

- Der ursprüngliche Ansatz eines einheitlichen Oberflächenbrenners musste wegen der physikalischen Grenzen der Technologie verworfen werden.

- Es wurde die Entwicklung eines Zweikreisbrennersystems gestartet und erfolgreich zum Abschluss gebracht.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich die sorgfältige Ablaufplanung bewährt hat. Gleichzeitig zeigte sich, dass bei vielen Neuerungen immer wieder Überraschungseffekte im positiven und negativen Sinn auftreten, die den Ablauf beeinflussen und bei der Planung nur pauschal berücksichtigt werden können.

4. Wissenschaftlich-technischer Stand bei Beginn des Projektes

Der tiefgreifende Strukturwandel in der Energietechnik bietet neuen Technologien zur dezentralen Erzeugung von Strom und Wärme im Bereich der Hausenergieversorgung und regionalen Versorgung künftig gute Marktchancen. Die stationäre Brennstoffzellentechnologie befindet sich derzeit in der entscheidenden Entwicklungsphase. Wichtige Wegbereiter dieser Technologie sind internationale Unternehmen wie Ballard (Kanada, USA), Plug Power (USA) und Sulzer Hexis (Schweiz). Diese Unternehmen haben deshalb mit großen Gas- und Stromversorgern aber auch mit Unternehmen der Kraftwerks- und Heizungstechnik internationale Allianzen gebildet, um ihre Brennstoffzellen-Technologie auf dem Gebiet der Hausenergieversorgung umzusetzen.

Dabei werden unterschiedliche Wege beschritten. So wird in den USA hauptsächlich unter dem Gesichtspunkt der Deckung des Strombedarfs von Gebäuden entwickelt, z.B. Fa. H-Power USA. Im Gegensatz dazu wird in Europa und besonders in Deutschland die bestmögliche Ausnutzung der Primärenergie durch Kraft-Wärme-Kopplung angestrebt [4]. In Deutschland aktive Firmen auf diesem Gebiet sind z.B. Vaillant, Viessmann, Buderus oder European Fuel Cells (EFC). Aber auch durch Institute wie dem Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Verbindung mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme oder dem Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT) wird die Entwicklung vorangetrieben.

Das Potential der stationären Brennstoffzellen lässt sich an Hand der folgenden Zahlen sehr gut erkennen. So soll die derzeit weltweit installierte Leistung von 45 MW elektrisch um das 350 fache auf 16.000 MW elektrisch anwachsen [11].

Damit ergeben sich mittelfristig Marktchancen für stationäre PEM Brennstoffzellenanlagen in Anwendungsbereichen mit einem erhöhten Elektroenergiegrundbedarf (ab 4 kW elektrisch) und einem vorhandenen Wärmebedarf. Dies sind vorrangig Objekte wie:

- Bürogebäude mit Klimatisierungssystemen, Abluft-Wärmerückgewinnungssystemen und hohem Lüftungsaufwand aus denen sich ein erheblicher Strombedarf ableitet,
- Einsatz in Einrichtungen mit Notstrom und USV-Bedarf (IT-Branche, Telekommunikation, Katastrophenschutz, Polizei, THW u.a.),
- Hilfsstromaggregate bzw. Bordstromversorgung für große Transport- und Trägersysteme, wie Landfahrzeuge, Schiffe, Bohrinseln usw.

Eine Studie zur „Analyse der Auswirkungen der Brennstoffzellentechnologie auf den Maschinen- und Anlagebau“ [13], erstellt im Auftrag des VDMA und BMBF, geht für den Zeitraum bis zum Jahr 2010 von einem jährlichen Marktvolumen von 300.000 Anlagen (installierte Gesamtleistung von 600 MW elektrisch im Bereich 1 – 50 kW elektrisch, durchschnittliche Leistung 2 kW elektrisch) für den bevorzugten Einsatz für die Strom-/Wärmeerzeugung in der Hausversorgung (jeweils 50% PEM FC Systeme, 50% SOFC Systeme) aus.

Derzeit liegt der maximale Systemwirkungsgrad η_{sys} solcher dezentralen PEM-FC Anlagen mit Erdgasbetrieb bei 88%. Der thermische Wirkungsgrad η_{th} liegt dabei bei ca. 64% und der elektrische Wirkungsgrad liegt abzüglich aller nicht optimierten internen Verbraucher bei ca. 25 bis 28 %. Im Laborversuchsbetrieb wird derzeit eine Verfügbarkeit von 80 – 90% erreicht [12]. Auf Grund ihres effizienten Teillastverhaltens und ihrer schnellen Reaktionszeit bei Bedarfsänderungen sind diese Anlagen besonders für den dynamischen Betrieb geeignet. Während bei herkömmlichen Verbrennungsaggregaten die Wirkungsgrade im häufig auftretenden Teillastbetrieb stark abfallen, bleiben sie bei PEM Brennstoffzellensystem bis in den unteren Lastbereich von ca. 30 - 40% nahezu konstant. Aufgrund der niedrigen Betriebstemperatur von 70 °C ist eine direkte Wärmeauskopplung, gepuffert über einen Speicher, in den Heizkreislauf von Gebäuden möglich [7]. Die im Moment noch sehr teure PEM FC lässt für die Zukunft auf eine erhebliche Kostenreduzierung aufgrund großer Stückzahlen und der möglichen Volumenreduzierung erwarten, weil insbesondere auch die Automobilindustrie bei der Entwicklung ihrer emissionsfreien

Antriebskonzepte ausschließlich auf diesen Niedertemperaturbrennstoffzellentyp setzt. Aufgrund dieser Prognosen werden wichtige Komponenten, wie die Katalysatoren der Membran – Elektrodeneinheit (MEA) von großen Chemieunternehmen wie umicore (ehemals OMG) in Deutschland entwickelt. Bei den für das vorliegende Projekt vorgesehenen Entwicklungen handelte es sich um Komponenten, die in PEMFC Anlagen eingesetzt und speziell für diesen Einsatz zu optimiert werden sollten. Sie sollen nach den gesammelten Erfahrungen das Niveau dieser neuen Anlagentechnik wesentlich mitbestimmen.

Voraussetzung für den Betrieb von PEMFC in Anlagen zur Hausenergieversorgung ist das Wasserstoff- Gaserzeugungssystem. Als kommerzielle Verfahren zur Wasserstoffgewinnung kommen nach heutigem Stand der Technik vorrangig die Dampfreformierung, die partielle Oxidation und die autotherme Reformierung (als Kombination von reiner Wasserdampfreformierung und partieller Oxidation) zum Einsatz. [3] Die flächendeckend in Deutschland verfügbaren Brennstoffe Erdgas und Heizöl sind dabei mögliche Wasserstofflieferanten. Erdgas besitzt gegenüber Heizöl das kleinere C/H – Verhältnis. Damit ist sein spezifischer CO₂ – Ausstoß geringer. Bei Substitution existierender Heizungsanlagen ist in der Regel bereits ein Gasanschluss vorhanden. Daher ist Erdgas für den Betrieb stationärer Brennstoffzellenanlagen vorteilhafter.

Die Dampfreformierung bietet auf Grund ihres zusätzlichen Wasserstoffeintrages durch den Wasserdampf die höchste Wasserstoffausbeute aller oben genannten Verfahren. Bei der Dampfreformierung wird ein Gemisch aus Erdgas und Wasserdampf einem, durch den Brenner auf 750 – 800°C erhitzten, Reaktionsraum unter Luftabschluss zugeführt. Es kommt zum Umsatz von Methan (CH₄ ist die Hauptkomponente von Erdgas) unter Bildung von Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Die folgende Bruttoreaktionsgleichung beschreibt den Vorgang



Einen weiteren Entwicklungsschwerpunkt im Wasserstoff – Gaserzeugungssystem bildet die Zuführung, der für das Reforming benötigten Wärme. Grundsätzlich ist es möglich, Brenn- und Reformierungskammer getrennt voneinander anzuordnen, wie dies z.B. bei der Dampfreformierung getan wird. Bei der partiellen Oxidation und der

autothermen Reformierung wird ein Teil des Erdgases in der Reformierungskammer verbrannt. Abbildung I-2 stellt die beiden Konzepte der Wärmezufuhr schematisch dar. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Verfahren liegt in der Zusammensetzung des Produktgases. Während bei der Dampfreformierung ein Wasserstoffgehalt von 75 – 80 Vol% erreicht wird, kann bei der autothermen Reformierung als Folge der Teilverbrennung von Luft mit Erdgas nur ein Wasserstoffgehalt von maximal 45 Vol% erzielt werden. Der Vorteil der autothermen Reformierung lag bisher in der hohen Effektivität der katalytischen Umsetzung und dem damit verbundenen wesentlich kleineren Katalysatorvolumen. Dieser Vorteil wird durch die jüngsten Entwicklungen auf dem Gebiet der Katalysatoren für Dampfreformer zunehmend verringert. Nachteil des autothermen Reformings ist die schwierige Einstellung des Wärmehaushaltes im Reformerkatalysator. Die stark exotherme Reaktion kann sehr schnell zur Überhitzung und damit zu Verringerung der Lebensdauer führen. Dies sind einige der Gründe warum sich die Dampfreformierung insbesondere beim Erdgas durchgesetzt hat. So werden auch die Projektpartner weiterhin an der Strategie der Dampfreformierung festhalten.

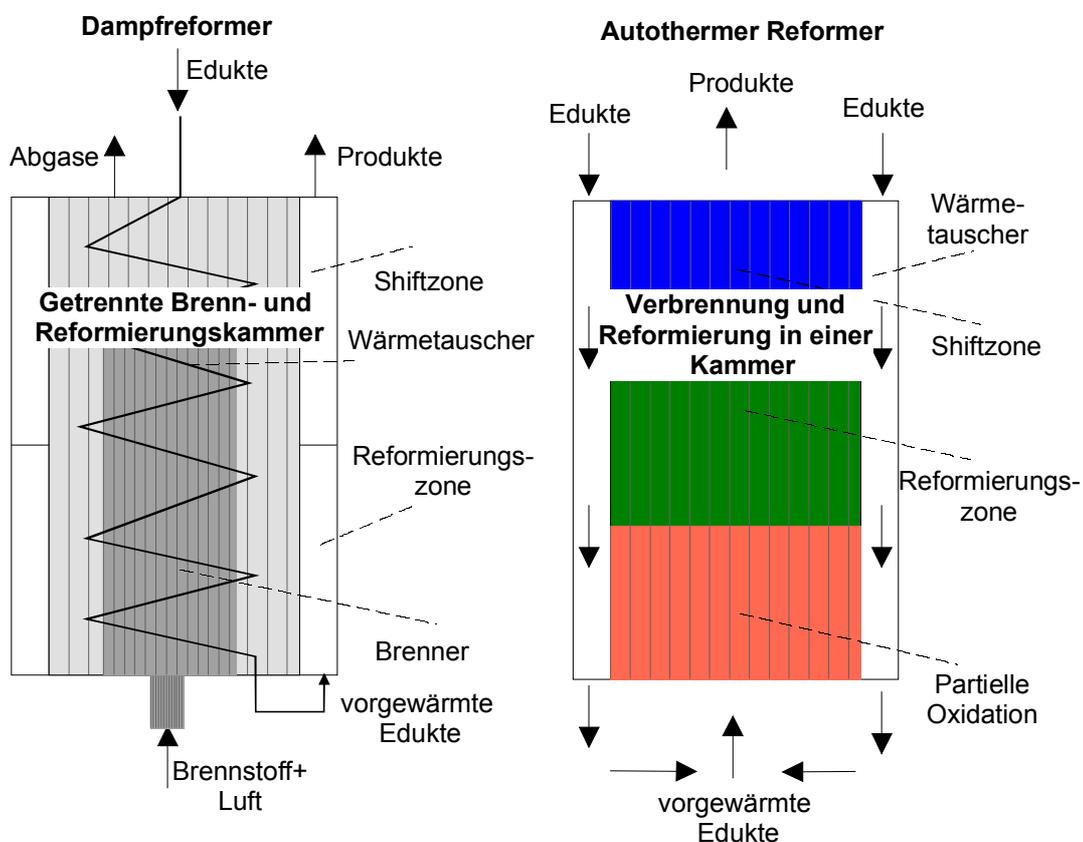


Abbildung I-2: Wärmezufuhr bei Dampf- und autothermer Reformierung

Nach der Reformierung erfolgt die Aufbereitung des wasserstoffreichen Gases. Hierbei wird besonders das Kohlenmonoxid durch verschiedene Reinigungsstufen aus dem Reformatgas entfernt, da dieses vom anodenseitigen Edelmetallkatalysator adsorbiert wird und ihn innerhalb kürzester Zeit deaktiviert. In den Hoch- und Tieftemperatur- Shiftreaktoren wird das Kohlenmonoxid oxidiert zu Kohlendioxid. Der Kohlenmonoxidgehalt wird in diesen Stufen abgesenkt auf ca. 1 Vol%. In der anschließenden katalytischen Feinreinigung wird der Kohlenmonoxidgehalt auf den Endwert von ca. 10 – 30 ppm abgesenkt. Erst jetzt ist das Reformat für den Einsatz in der PEM FC geeignet.

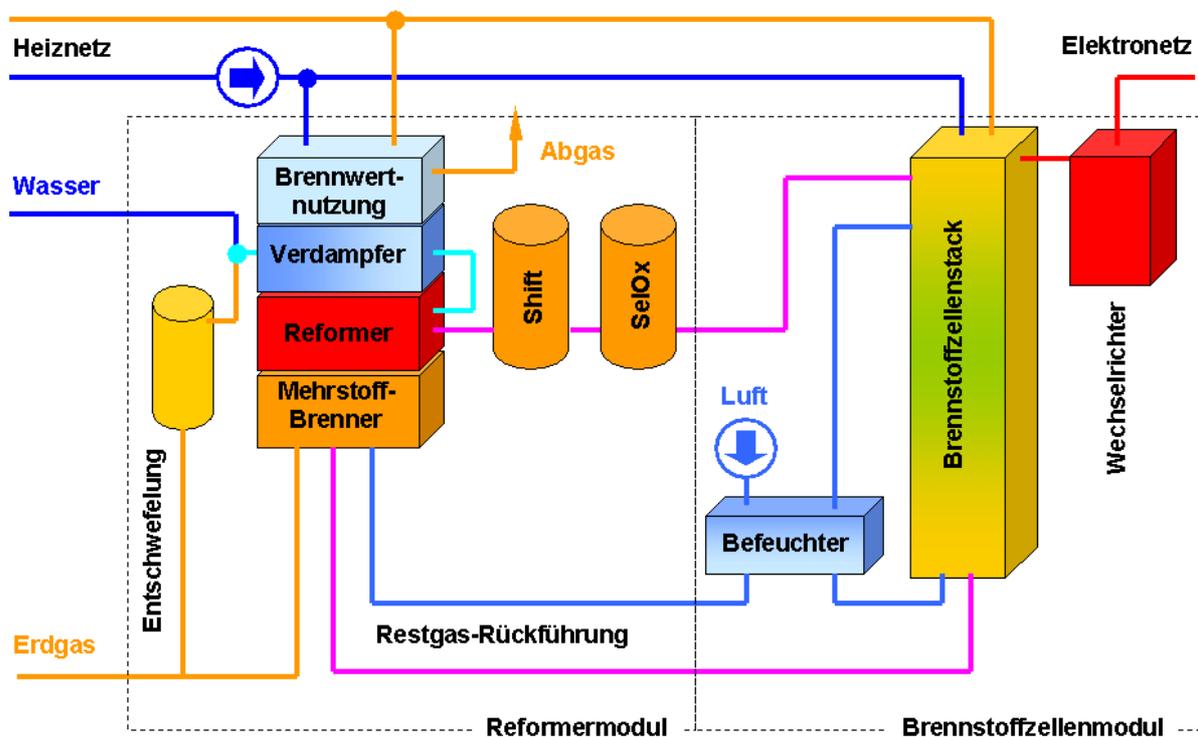


Abbildung I-3: Schema eines stationären PEM Brennstoffzellensystems

In Abbildung I-3 ist der grundsätzliche Aufbau eines stationären PEM – Brennstoffzellensystems dargestellt. Es gibt den gegenwärtigen Entwicklungsstand für die Dampfreformierung in stationären Anlagen mit kleinen Leistungen wieder. Dieser Stand wurde bereits in einem vorangegangenen Projekt erreicht. Sekundärveröffentlichungen anderer Hersteller deuten darauf hin, dass ähnliche Entwicklungen nachvollzogen werden [14]. Wesentliche Erweiterungen gegenüber der klassischen Produktlinie sind:

- die Wärmerückgewinnung den Produkten zu den Edukten im Reformer

- die Verbrennung der Brennstoffzellenrestgase aus dem stationären Betrieb im Reformier
- die Verbrennung des wasserstoffreichen Gases im Anfahrbetrieb des Reformers und dessen Auskopplung ins Heizsystem

Weitere sehr wesentliche Fortschritte wurden in der Verringerung des Anlagenvolumens und durch den Einsatz neuer effektiverer Verdampfer und Wärmeübertrager erzielt.

Katalysatoren :

Dennoch liegen derzeit die Kosten für Reformersysteme deutlich über den Zielwerten. Eine Ursache dafür sind die Kosten der Katalysatoren. Wenn jedoch weitere Fortschritte erzielt werden sollen, müssen die Wärmeübertragung an und in die Katalysatoren deutlich verbessert werden, um das Potential der Katalysatoren vollständig auszuschöpfen und deren notwendiges Volumen zu verringern. So werden z.B. im Labormaßstab unter idealisierten Bedingungen Raumgeschwindigkeiten $> 10.000 \text{ h}^{-1}$ angegeben. In Dampfreformern nach gegenwärtigem Stand werden für einen 90 %igen Methanumsatz nur Raumgeschwindigkeiten zwischen $3.000 - 5.000 \text{ h}^{-1}$ erreicht. Nach Ansicht der Antragsteller kann durch eine Optimierung der Wärmeübertragung zwischen Wärmequelle und Edukten/Katalysatoren und durch eine Verbesserung der Strömungsführung die Diskrepanz zwischen Laborversuch und Realanlage überwunden werden. Dies trifft schwerpunktmäßig für den Reformier zu, gilt aber auch für Shift und Selox.

Ein weiterer Aspekt sind die Herstellungskosten für Katalysatoren und deren Träger. Katalysatoren sind in 2 Konfigurationen erhältlich, als Schüttgut aufgebracht auf Keramikkörper wie Kugeln, Granulat oder Raschig-Ringen oder als monolithische Strukturen auf metallischen oder keramischen Wabenkörpern. Wabenkörper wurden bisher wegen ihrer regelmäßigen Struktur, der reproduzierbaren Strömungsführung, der gleichmäßigen Katalysatorbelegung und der daraus resultierenden deutlich höheren Effektivität bevorzugt. Nachteilig bei Wabenkatalysatoren sind die jedoch wesentlich höheren Herstellungskosten (bis 10-fach höher) und die deutlich eingeschränkte Flexibilität bei der Formgebung. Alternative Trägertypen sind flexible metallische Schäume. Diese wurden bisher noch nicht betrachtet, könnten aber die Vorteile beider Systeme effektiv miteinander verbinden. Aus Sicht des Antragstellers

muss gerade unter Berücksichtigung des vorangegangenen Absatzes intensiver an der grundlegenden Untersuchung und Optimierung kostengünstiger Trägerstrukturen gearbeitet werden.

Andere Entwicklungsschwerpunkte des Gasreinigungssystems von reformerbetriebenen PEM Brennstoffzellenanlagen sind die thermische Anpassung der Shift-Stufen sowie der selektiven Oxidation (Gasfeinreinigung). Ziel ist es, die Temperaturniveaus der einzelnen Stufen aneinander anzupassen und so den Aufwand zur Temperierung der Gasströme zu senken.

Rückführung der Brennstoffzellenrestgase

Da PEM Brennstoffzellen das höchste Stromdichte-Materialaufwand-Verhältnis bei einem Wasserstoffumsatz von ca. 70 – 80 % erzielen, enthält das Anodenrestgas noch einen Wasserstoffanteil von ca. 20 – 30 %. Dieser Restwasserstoff kann und wird bei angewendeter Dampfreformierung zur Wärmeezeugung im Brenner des Reformers genutzt. Die durch die Verbundpartner beschrittene Brennerentwicklung erlaubt die Verbrennung von Restgas gemeinsam mit Erdgas im Bereich von 10 – 40 % Wasserstoff in einem Brenner. Doch gerade in der Anlaufphase oder bei Lastwechseln ist eine Erweiterung dieses Bereichs notwendig, da hier Wasserstoffgehalte von bis zu 75 % auftreten können. Die besondere Problemstellung ergibt sich aus den unterschiedlichen Stoffeigenschaften wie z.B. Diffusions- und Zündfähigkeit von Erdgas auf der einen und Anodenrestgas auf der anderen Seite. Bei allen bisher bekannten PEM-Brennstoffzellenanlagen wurde dieses Problem durch einen außerhalb des Reformers nachgeschalteten katalytischen Brenner umgangen.

Skalierbarkeit von Brennstoffzellenbaugruppen:

Gegenwärtig sind die Entwicklungen im Bereich der Brennstoffzellenheizgeräte auf Anlagengrößen zwischen 1 bis 4,6 kW elektrisch ausgerichtet. Sie sind für eine einphasige Einspeisung in das öffentliche Netz vorgesehen. Mittel- und langfristig wird jedoch ein Bedarf an Geräten mit höherer Leistung und mehrphasiger Einspeisung entstehen. Die Verbundpartner sehen eine Marktnische in diesem Bereich. Um gleichzeitig eine Reduktion der leistungsspezifischen Kosten zu erreichen, ist die Entwicklung auf eine spätere Serienproduktion standardisierter Baugruppen auszurichten. Durch eine Zusammenschaltung baugleicher Module soll

die Skalierbarkeit von Leistungsgrößen bei minimalen Kosten erreicht werden. Dies sind neue Wege, die bisher nur von wenigen anderen Herstellern noch beschritten wurden.

Betrieb von Brennstoffzellen in stationären Anwendungen

Eine immer bedeutendere Rolle beim Einsatz vorhandener Energieressourcen gewinnt die rationelle und effiziente Energienutzung. Einen sehr guten Ansatzpunkt dafür liefern Brennstoffzellen in stationären Anwendungen, da die elektrische und thermische Energie direkt am Ort des Verbrauchs zur Verfügung gestellt wird und die somit bei zentraler Energieerzeugung üblichen Transportverluste entfallen. Während die Bereitstellung von Energie/Elektrizität bei den konventionellen Wärmekraftmaschinen indirekt erfolgt (Carnot-Prozess), wird bei der Brennstoffzelle die chemische Energie direkt in elektrische Energie gewandelt.

Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen werden nicht nur zur Stromerzeugung (vgl. mobile Anwendungen von Brennstoffzellen), sondern insbesondere auch in Kraft-Wärmekopplung zur Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt. Im stationären Bereich sind auch netzunabhängige Stromversorgungen und Blockheizkraftwerke als Anwendungen für Brennstoffzellen denkbar [6]. Prinzipiell sind Brennstoffzellen – Blockheizkraftwerke im Netzparallel- oder Inselbetrieb in den folgenden Betriebsweisen fahrbar:

- stromgeführter Betrieb
- wärmegeführter Betrieb
- wechselnd strom-/ wärmegeführter Betrieb

Durch die hohen Wirkungsgrade auch im Teillastbereich und die hohe Flexibilität der Brennstoffzellensysteme bezüglich der verschiedenen Betriebszustände Winter/Sommer sowie Tag/ Nacht ist ein Betrieb auch bei geringerer Auslastung, außerhalb der Nennlast, technisch vertretbar. Jedoch ist es nicht sinnvoll, das BZ-Heizgerät auf die Maximallast des Einsatzortes auszulegen. Bedingt durch den großen Unterschied zwischen Voll- und Grundlast sollten Brennstoffzellen aus wirtschaftlichen Gründen nur die Grund- und Mittellast abdecken, obwohl das gute Teillastverhalten und die Eigenschaft der Brennstoffzelle, Laständerungen schnell folgen zu können, eine Vollversorgung nahe legen.

Die Studie „Stationäre Anwendungen von Brennstoffzellen in der Kraftwärmekopplung: Perspektiven einer Wasserstoff- Energiewirtschaft“ [5] behandelt unter anderem die Problematik des Brennstoffzellenbetriebsverhaltens an Hand ausgewählter Beispiele. Zur Definition allgemeiner Aussagen hinsichtlich des Verhaltens stationärer Brennstoffzellensysteme in Abhängigkeit der Betriebstrategie besteht die Notwendigkeit weiterführender detaillierter Untersuchungen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wegen der hohen Komplexität der Thematik haben die Verbundpartner ein Netzwerk aufgebaut, das die Zusammenarbeit mit den folgenden Partnern beinhaltet:

1. Gremien, Arbeitsgruppen und Vereine, dazu gehören der Arbeitskreis Berta und Power Systems des VDMA, die Gesellschaft für erneuerbare Energien FEE, die Brennstoffzelleninitiative Sachsen.
2. Universitäten, Fachhochschulen und Forschungseinrichtungen; dazu gehören insbesondere die Universitäten in Graz, Magdeburg und die Fachhochschule in Köthen, das ATB in Potsdam, das Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Materialforschung IFAM, NTU Trondheim (Norwegen) und viele andere.
3. Lieferanten als FuE-Partner; dazu gehören die wichtigsten Technologie-spezialisten für Brennstoffzellenkomponenten wie SGL, Südchemie, Umicore, Schunk, Freudenberg und viele KMU die spezielle Komponenten wie Dichtungen, Kunststoffteile, Verbindungselemente, Regelungskomponenten usw. herstellen.
4. Anwender der Technologie, dazu gehören insbesondere Stadtwerke, Gaslieferanten und Projektentwickler für Gebäudekomplexe.

Gemeinsam mit dem Technologieorientierten Gründerzentrum Riesa-Großenhain (TGZ) und dem BTI Technologieagentur Dresden wurde ein Netzwerk ins Leben gerufen, in das sich vor allem interessierte Komponentenhersteller einbringen können. Dieses Netzwerk verfügt über eine Internetseite zur öffentlichen Darstellung www.PEM-Brennstoffzelle-Sachsen.de.

6. Literatur

- [1] Oertel, D., Fleischer, T.: TA-Projekt "Brennstoffzellen – Technologie" Endbericht, TAB-Arbeitsbericht Nr. 67, Büro für Technologiefolgen-Abschätzung bei Deutschen Bundestag, Berlin 2000
- [2] Ledjeff, K.: Brennstoffzellen; Entwicklung, Technologie, Anwendung; C.F. Müller Verlag GmbH, Heidelberg 1995
- [3] Siebtes Fachforum Brennstoffzellen 17./18. Oktober 2000; Entwickler und Anwender berichten, Tagungsband, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg 2000
- [4] Vaillant Homepage www.vaillant.de
- [5] Forschungsstelle für Energiewirtschaft: Stationäre Anwendungen von Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung: Perspektiven einer Wasserstoffenergiewirtschaft; Verlag Energie- und Managementgesellschaft; 2000; 1. Auflage
- [6] Suttor, W.: Praxis der Kraft-Wärme-Kopplung: Technik, Umfeld, Realisierung von KWK – Anlagen; Verlag C.F. Müller; Karlsruhe 2000
- [7] Krein, S.: Brennstoffzelle für die dezentrale Energieversorgung; „Erdgasreport“; 2/99; Leipzig 1999
- [8] EU Kommission; Energy Program Revision and Target Actions; Brüssel 10/2000
- [9] Innovationsförderung; Hilfe für Forschung und Entwicklung; Bmb+f BMWi; Bonn 1999
- [10] Grosser, K.; Heinzl, A.: Erfahrungsbericht TGZ Glaubitz; Sechstes Fachforum Einsatz von Brennstoffzellen; 04/05.10.1999 Leipzig, Tagungsband Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg 1999
- [11] Allied Business Intelligence (ABI), Oyster Bay USA, Quelle "Stationary Fuel Cell Market Commercialization at the Door", Business Wire [Aug 01, 2002] <http://www.ewworld.com/databases/printit.cfm?pageid=news010802-08>

- [12] Klinder,K.: Fa. Vaillant Angaben aus Vortrag „Ganzheitliche Kostenbetrachtung bei stationären Brennstoffzellen – Heizgeräten“, VDI-Tagung Stationäre Brennstoffzellen, Heilbronn 1.-2. April 2003
- [13] „Markteinführung von Brennstoffzellenprodukten: Auswirkungen auf den Maschinen- und Anlagenbau“; Endbericht 2002, AMCG Unternehmensberatung GmbH, München
- [14] Fraunhofer-ISE: „Abgasrückführung steigert den Wirkungsgrad“, In Brennstoffzellen - Magazin 2/2003

II. Ausführliche Darstellung

1. Ergebnisse des Antragstellers DBI im Verbundprojekt

Bei den Arbeiten des Antragstellers lassen sich entsprechend des Projektantrages die folgenden Arbeitsschwerpunkte zusammenfassen:

- Erstellung eines Brennerkonzeptes für den Reformer,
- Entwicklung, Bau und Erprobung des Versuchsbrenners,
- Konstruktive Gestaltung des Kompaktreformers Schnittstellen zum Brenner und Abgassystem,
- Aufbau und Betrieb der Brennstoffzellenanlage (Brenner, Abgassystem und Sicherheitstechnik),
- Monitoring und Auswertung der Betriebsergebnisse der Brennstoffzellenanlage / Schwerpunkt Brennertechnik / Abgas.

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse aus diesen Arbeiten dargestellt.

1.1 Erstellung eines Brennerkonzeptes für den Reformer

Im ursprünglichen Brennerkonzept sollten alle während des Anlagenbetriebes anfallenden Gase (Reformatgas und Anodenrestgas) im Hauptbrenner dem Erdgas zugemischt werden. Ziel war es, alle Gase direkt zur Reformerbeheizung zu nutzen, um somit den Erdgasverbrauch der Anlage zu reduzieren und damit den elektrischen Wirkungsgrad des Brennstoffzellen-BHKW deutlich zu erhöhen. Während des Betriebes der Anlage treten mehrere unterschiedliche Gasarten und Gemische auf. Aus dem Kaltzustand wird der Reformingteil und der Verdampfer zunächst mit Erdgas auf die untere Betriebstemperatur gebracht. Während dieser Zeit wird kein Erdgas reformiert. Ist diese Temperatur erreicht, kann Erdgas und Wasserdampf in den Reformer eingeleitet und reformiert werden. Das so erzeugte Reformatgas besitzt nicht sofort die erforderliche Qualität und dient zunächst der Erwärmung der gesamten Gasreinigung. Bis zum Erreichen der korrekten Qualität wird ausschließlich das anfallende Reformatgas (ca. 70 % H₂) dem Brenner zugeführt und dadurch der Reformer und die nachgeschalteten Gasreinigungsstufen auf Betriebstemperatur gebracht. Wenn alle Baugruppen ihre Betriebstemperatur und das Reformatgas die notwendige Gasqualität erreicht haben, kann die

Brennstoffzelle zugeschaltet und Strom ins Netz eingespeist werden. Das Restgas der Brennstoffzelle mit einem Wasserstoffanteil um 30 % wird dann zur Reformerbeheizung genutzt, zusätzlich wird Erdgas als Regelenergie verwendet.

Zunächst wurden mit dem Projektpartner TU BAF die wesentlichen Parameter und die Anforderungen an den Brenner festgelegt:

- ✓ Leistungsbedarf von 2 bis 10 kW,
- ✓ hohe Leistungsmodulation / gute Regelbarkeit des Brenners von min. bis max. Leistung,
- ✓ sicheres Startverhalten mit Erdgas,
- ✓ der Brenner muss neben Erdgas auch Reformat und Anodenrestgas verbrennen können,
- ✓ geringe Schadstoffemissionen,
- ✓ hohe Leistungsdichte,
- ✓ einfache, kompakte Bauform,
- ✓ lange Lebensdauer, insbesondere der thermisch belasteten Komponenten.

Gemäß dem Projektansatz wurde das Konzept analog dem vollvormischenden Erdgasbrenner verfolgt, dem die wasserstoffhaltigen Gase zugemischt werden. Mit diesem Brennerkonzept waren das Aufheizen des Reformers mit Erdgas und der Betrieb mit wasserstoffhaltigem Anodenrestgas (bis 45 % Wasserstoff) problemlos möglich. Schwierigkeiten traten beim Einsatz von Reformatgas mit einem Wasserstoffgehalt von über 70 % auf.

Bei der Verbrennung von Wasserstoff ändern sich die verbrennungstechnischen Eigenschaften (Zündgeschwindigkeit, Flammentemperatur usw.) gegenüber Erdgas wesentlich. Dies führte bei dem Konzept des vollvorgemischten Oberflächenbrenners zum Flammenrückschlag und damit zum Ausfall des Brenners. Um dies zu verhindern, wurde das im Anfahrprozess zu verbrennende Reformatgas in einer thermischen Nachverbrennung mit einem separaten Wasserstoff-Diffusionsbrenner genutzt. Damit konnte ein zuverlässiger Betrieb des Reformers auch im Anfahr- und BZ- Störbetrieb sichergestellt werden. Diese Art der Reformatgasnutzung hat jedoch einige Nachteile:

- die Energie des Reformatgases kann nicht zur Reformerbeheizung genutzt werden, sondern nur zur Warmwassererzeugung,

- zur Reformerbeheizung muss zusätzlich Erdgas verbrannt werden, was den elektrischen Wirkungsgrad der Brennstoffzellenanlage verringert,
- es wird eine zusätzliche Brennkammer inkl. Zünd- und Überwachungseinrichtung benötigt.

Um auch das wasserstoffhaltige Reformatgas zur Reformerbeheizung nutzen zu können wurden umfangreiche Untersuchungen am Brenner durchgeführt. Ziel war es, durch Modifikation der Brennerplatte das Flammenrückschlagen zu verhindern. Als Ursache für das Rückschlagen der Flamme wurde folgender Mechanismus identifiziert. Das Material der Brennerplatte besteht aus einem Fasermaterial mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit aber hoher Porosität. Das Brenngas-Luft-Gemisch (ab H_2 -Konzentrationen $> 50\%$) dringt in diese Poren und zündet. Dies führt nach kurzer Zeit dazu, dass das Gasgemisch bereits in den Löchern der Brennerplatte brennt und sich in Richtung Vormischkammer ausbreitet. In Abbildung II–1 und Abbildung II–2 ist der Unterschied bei den verschiedenen Wasserstoffgehalten im Bild festgehalten.

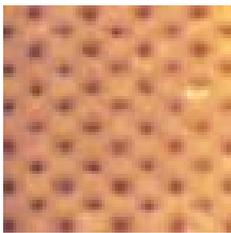


Abbildung II–1: Betrieb des Vormischbrenners mit Erdgas

Flammenbildung oberhalb der Brennerplatte – sicherer Betrieb mit Erdgas und Anodenrestgas (bis $40\% H_2$)

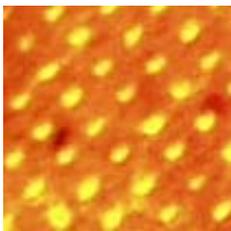


Abbildung II–2: Betrieb des Vormischbrenners mit Reformatgas

Flammenbildung in der Brennerplatte – führt zum Flammenrückschlag beim Betrieb Reformatgas

Um diesen Effekt abzustellen wurden folgende Lösungsansätze untersucht:

- ✓ Test verschiedener Fasermaterialien unterschiedlicher Dichte, Temperaturbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit;
- ✓ Variation der Anordnung der Brennergasströmung (Lochabstände);
- ✓ Veränderung der Ausströmgeschwindigkeiten durch unterschiedliche Düsendurchmesser.

Diese Maßnahmen führten jedoch zu keiner befriedigenden Lösung, mit der ein zuverlässiger Betrieb des Brenners unter allen Betriebszuständen des Reformers innerhalb der geforderten Leistungsparameter gewährleistet werden konnte.

Deshalb wurde das Konzept eines Zweikreis-Mehrstoff-Brennersystems entwickelt. Dieses Konzept sieht die Aufteilung der Brenngase in zwei Verbrennungszonen innerhalb der Reformerbrennkammer vor: zum einen das bewährte Vormischkonzept für den Erdgasbrenner und zum anderen einen Diffusionsbrenner für das wasserstoffhaltige Reformatgas (s. Abbildung II-3). Dieses Brennerkonzept weist folgende Vorteile auf:

- ✓ zuverlässige Zündung und Überwachung des Erdgasbrenners,
- ✓ automatisches Zünden des wasserstoffhaltigen Gases im heißen Brennraum,
- ✓ Leistungsregelung durch den Erdgasbrenner,
- ✓ problemloses separates Zu- und Abschalten beider Brenner möglich,
- ✓ effektive Nutzung des Reformatgases zur Reformerbeheizung.

1.2 Entwicklung, Bau und Erprobung des Versuchsbrenners

Ein Zweikreisbrennersystem wurde durch den Partner DBI entwickelt, durch UTF gefertigt und danach am Brennersversuchsstand des DBI getestet. Bei der Auslegung wurde auf den Erfahrungen beim Betrieb mit dem vorher getesteten Oberflächenbrenner aufgebaut. Um das Flammenrückschlagen beim Einsatz von Reformatgas zu verhindern werden das vollvorgemischte Erdgas-Luft-Gemisch, sowie das wasserstoffhaltige Reformatgas und Anodenrestgas mit der zur Verbrennung notwendigen Luft separat der Brennkammer zugeführt. Damit wird dem Reformatgas der zur Verbrennung notwendige Sauerstoff erst in der Brennkammer zugeführt und somit wird ein Flammenrückschlagen selbst bei Einsatz von reinem Wasserstoff zuverlässig verhindert.

Der Zweikreisbrenner wurde erfolgreich mit unterschiedlichen Gaszusammensetzungen im gesamten Leistungsbereich von 2 bis 10 kW getestet. In Tabelle II-1 ist das Versuchsprogramm für das Brennersystem zusammengestellt. Die Abbildung II-4 zeigt den Zweikreisbrenner während des Versuchsbetriebes bei Einsatz von Erdgas und Reformat.

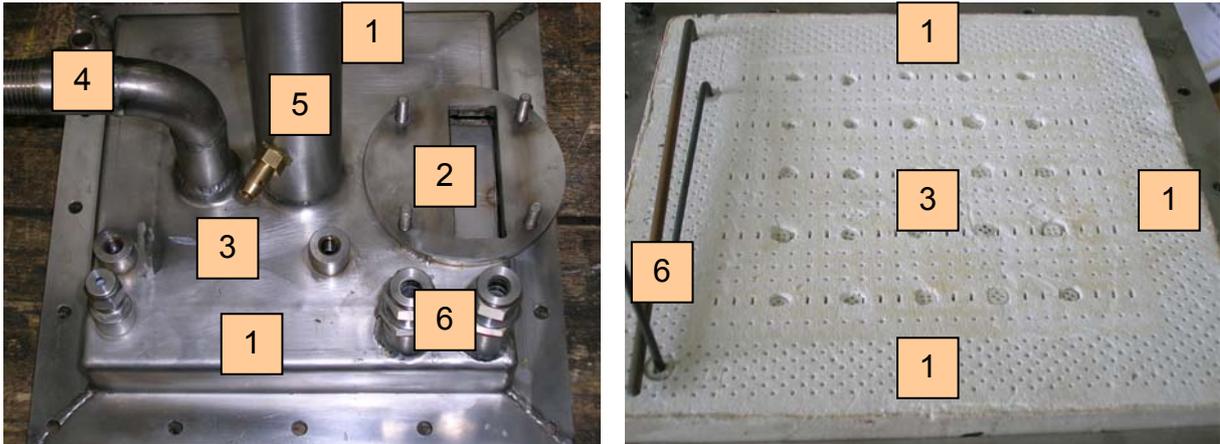


Abbildung II-3: Aufbau des Zweikreisbrenners

1. vollvorgemischter Erdgasbrenner als Ringbrenner
2. Anschluss Lüfter mit Erdgasregelstrecke
3. Reformatgasbrenner mit getrennter Luft- und Gaszuführung
4. Anschluss Reformatgas
5. Anschluss Luftversorgung Reformatgasbrenner
6. Zünd- und Überwachungseinrichtung

Tabelle II-1: Durchgeführte Funktionstests des Zweikreisbrenners am Brenner-
versuchsstand des DBI

Brennerleistung	2 kW		5 kW		10 kW	
	24 h	1000 h	24 h	1000 h	24 h	1000 h
Erdgas (100% CH ₄)	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Anodenrestgas (30% H ₂)	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Reformatgas (70% H ₂)	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Reiner Wasserstoff (100% H ₂)	☑	/	☑	/	☑	/

☑ erfolgreich getestet

/ nicht notwendig

☒ nicht bestanden

Am Versuchsstand wurde der Zweikreisbrenner unter realitätsnahen Bedingungen erfolgreich betrieben. Die Zündung und Überwachung des Erdgasbrenners sowie das Zu- und Abschalten des Reformatgasbrenners erfolgte problemlos. Die Anschlussbedingungen für den Brenner, die Steuerung und Regelung und die Gasregelstrecke wurden an die konstruktive Gestaltung des Kompaktreformers angepasst. Am Ende der Erprobungsphase am Brennersversuchsstand wurde der

Zweikreisbrenner am Prüfstand nach DIN EN 437 mit den für eine Zertifizierung vorgeschrieben Grenzgasen getestet und die Emissionswerte ermittelt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle II-2 dargestellt.

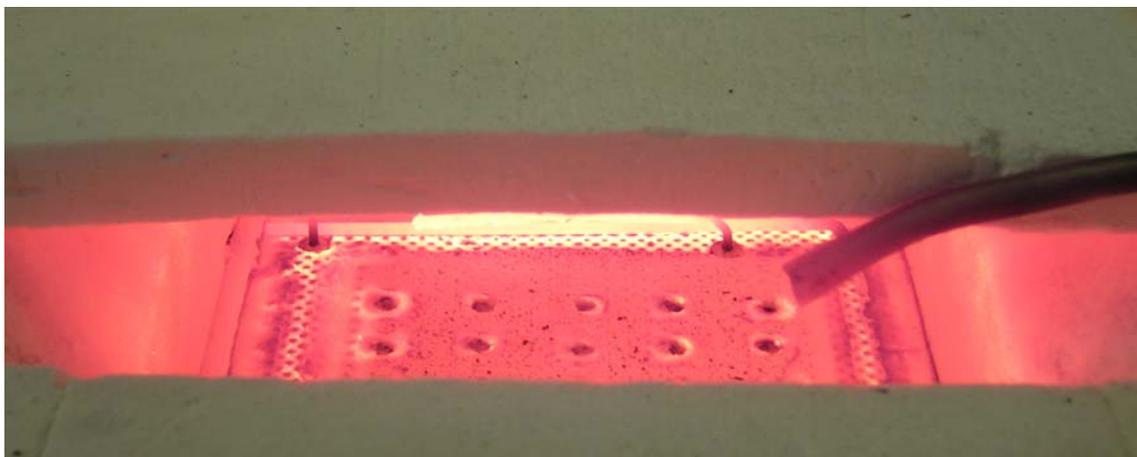


Abbildung II–4: Zweikreisbrenner am Versuchsstand

Die Entwicklung des Zweikeisbrenners mit den in Absatz 1.1 beschriebenen Betriebsmodi zog nach sich, dass die Flammenüberwachung des Brenners vollständig überarbeitet werden musste. Für den Ergas-Betrieb (s. Abbildung II–3, Pos. 1) kann die übliche Ionisationsüberwachung eingesetzt werden. Bei Reformat-Betrieb bzw. Anodenrestgas-Betrieb ist die Ionisationsüberwachung nicht möglich, weil Wasserstoffflammen keine ausreichende Flammenionisation besitzen. Da bei diesen Betriebsarten in der Brennkammer die Zündtemperatur der Gase sicher überschritten wird, kann auf eine Temperaturüberwachung an geeigneter Stelle zurückgegriffen werden. Dieses Überwachungskonzept ist zertifizierungsfähig.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Entwicklung des „Zweikreisbrenners“ erfolgreich realisiert wurde. Ein Flammenrückschlagen ist erwartungsgemäß auch bei Einsatz von reinem Wasserstoff im Diffusionsbrenner nicht zu beobachten. Der entwickelte Zweikreisbrenner kann den Reformer der Brennstoffzellenanlage unter allen Betriebszuständen im geforderten Leistungsbereich effektiv und emissionsarm beheizen.

Tabelle II-2: Ergebnisse der Brennerprüfung nach DIN EN 437

Prüfgas	Einstellung	Prüfdruck [mbar]	O ₂ Abgas [Vol.-%]	t _{Raum} [C°]	t _{Gas} [C°]	λ	CO _{unverd} [ppm]	NO _{X unverd} [ppm]	CO _{2 math} [ppm]
G 20	Kleinbrand	20	7,89	20,3	23,6	1,54	1,9	6,9	7,3
Hs=11,060 kWh/m ³	Großbrand	20	7,67	20,3	23,5	1,52	3,8	8,5	7,4
p _{Atmosphäre} =970 mbar		25	7,55	20,3	23,5	1,50	3,8	9,0	7,5
		17	7,66	20,3	23,6	1,52	3,8	8,6	7,4
G 231	Kleinbrand	20	9,18	20,3	23,7	1,71	1,2	3,9	6,5
Hs=9,400 kWh/m ³	Zünden im warmen und kalten Zustand i.O., kein Abheben der Flamme								
p _{Atmosphäre} =970 mbar	Großbrand	20	10,03	20,3	23,7	1,84	1,5	2,3	6,0
G 222	Kleinbrand	20	8,03	19,8	23,7	1,55	1,2	6,3	6,8
Hs=9,330 kWh/m ³	kein Rückschlagen der Flamme im warmen und kalten Zustand								
p _{Atmosphäre} =970 mbar	Großbrand	20	8,19	20,2	23,8	1,57	2,8	7,1	6,7
G 21	Kleinbrand	20	6,52	19,6	23,2	1,41	2,9	13,1	8,5
Hs=13,300 kWh/m ³		25	6,31	19,7	22,9	1,39	5,6	15,7	8,6
p _{Atmosphäre} =970 mbar	Großbrand	20	6,50	19,6	23,0	1,41	5,3	14,3	8,5

1.3 Konstruktive Gestaltung des Kompaktreformers (Schwerpunkt Brenner/Abgasstrecke)

Gemeinsam mit den Projektpartnern, insbesondere der TU Bergakademie Freiberg, wurde die konstruktive Gestaltung des Reformers bearbeitet. Schwerpunkt bei DBI war die Bereitstellung der Wärme für den Reformierungsprozess und die Verdampfung des Prozesswassers auf den geforderten Temperaturniveaus. Aus den Berechnungen und den Vorversuchen am Katalysatorstand des Projektpartners wurden die notwendigen Größen zur Reformerdimensionierung ermittelt. Insbesondere sind dies:

- Anzahl und Form der Wärmeübertragerflächen,
- Wärmebedarf und Temperaturniveau.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurden bei DBI GUT die notwendigen Entwicklungsarbeiten zur Dimensionierung des Brenner- und des Abgassystems realisiert. Zielgrößen sind:

- Brennkammerdimension,
- notwendige Abgasquerschnitte,
- Dimension und Form des Abgaswärmetauschers zur Restwärmenutzung.
- Auswahl eines geeigneten Schornsteinsystems.

Hauptziel war es, den Wärmeübergang zwischen Brenner und Reformer zu optimieren um einen möglichst hohen thermischen und elektrischen Wirkungsgrad der Gesamtanlage zu realisieren. Außerdem soll der Dampfreaktor im gesamten Leistungsbereich eine gute Regelbarkeit besitzen, um eine stabile Reformergasqualität zu gewährleisten. Durch DBI wurde das Brennersystem konstruktiv und wärmetechnisch auf den Reformer und die nachgeschalteten Bauteilen abgestimmt (s. Abs. 1.2).

Zu den auf dem Abgasweg nachgeschalteten Komponenten des Reformers zählt insbesondere ein Abgaswärmeübertrager. In diesem werden die Brennerabgase auf Temperaturen von ca. 80 °C gekühlt und ein Teil der Abgasfeuchte auskondensiert. Auf diese Weise wird eine Brennwertnutzung des eingesetzten Erdgases erreicht. Dies ist für BZ-Systeme mit Dampfreaktion von besonderer Bedeutung, da das Abgas einen deutlich höheren Wassergehalt hat als bei üblicher Erdgasverbrennung. Die dabei gewonnene Abwärme wird ins Warmwassersystem eingespeist und erhöht

den thermischen und den Gesamtwirkungsgrad der BZ-Anlage. Im Rahmen der Entwicklungsarbeit wurden folgende Aufgaben des Abgaswärmeübertragers gelöst:

- Gestaltung der Abgasführung über die Wärmeübertragungsflächen, so dass das anfallende Kondensat aus dem Abgasstrom abgeleitet werden kann,
- Auswahl und Erprobung geeigneter korrosions- und thermisch beständiger Materialien,
- thermische Entkopplung von Verdampfer und Abgaswärmeübertrager (Vermeidung von nachträglicher Verdampfung des Kondensates),
- Sammlung des Kondensates aus dem Schornsteinsystem.

Anschließend wird das Abgas über ein doppelwandiges Schornsteinsystem über Dach abgeführt. Das Abgas steigt im Inneren des doppelwandigen Schornsteinsystems nach oben und erwärmt dabei gleichzeitig die im äußeren Ringspalt angesaugte Luft. Gemäß der Einteilung der Gasgeräte nach DVGW-TRGI 86/96 erfüllt die BZ- Anlage somit die Anforderungen an ein Gerät der Klasse C₃₃ und wird als raumluftunabhängiges Gerät betrieben.

Das im Anfahrprozess erzeugte Reformatgas kann nicht vollständig zur Reformierbeheizung eingesetzt werden, da dies zur Überhitzung des Reformers führen würde. Deshalb wird das anfallende Reformatgas aufgeteilt, zum einem zur Reformierbeheizung, zum andern zur Nachheizung im Abgaswärmeübertrager. Damit wird das anstehende Reformatgas energetisch effektiv innerhalb der BZ- Anlage verwertet. Zu diesem Zweck wurde ein Brennersystem für den Abgaswärmeübertrager entwickelt. Der Zusatzbrenner unterliegt grundsätzlich anderen Randbedingungen als der Reformierbrenner. Er dient lediglich zur sicheren Verbrennung des überschüssigen Reformatgases beim Aufheizen des Reformers (Wasserstoffgehalt 50 – 70 %). Diese Gaszusammensetzung wird sinnvoll in einer Diffusionsbrennerkonfiguration verbrannt. Dieser Brennertyp kann in den Abgasstrom des Reformers eingeordnet werden. Um Aufwand zu vermeiden nutzt der Zusatzbrenner den Restsauerstoff des Abgases aus dem Reformierbrenner. Die Einstellung des Sauerstoffgehaltes im Abgas erfolgt über den Reformierbrenner. Neben dem Brenner sind zusätzlich Zünd- und Flammenüberwachungseinrichtungen entwickelt worden. Auch bei diesem Brenner kommt eine thermische Überwachung zum Einsatz.

Die Steuerung des Zusatzbrenners wurde in den Programmablauf des Startbetriebes eingeordnet. Während des Anfahrbetriebes wird nach dem Erreichen der Reformertemperatur vollständig auf Reformatgas umgeschaltet. Die Beheizung erfolgt dann ausschließlich durch Reformat. Der Zusatzbrenner wird elektrisch gezündet und mittels Thermoelement überwacht. Ist die Gasqualität erreicht und das Reformatgas wird zum Brennstoffzellenstack geleitet, schaltet der Brenner ab und das Anodenrestgas wird vollständig über den Reformerbrenner verwertet.

Neben der konstruktiven Gestaltung wurde das Steuerungs- und Regelungskonzept der Brenner an das MSR-Konzept der Gesamtanlage angepasst. Die Leistungssteuerung des Brenners erfolgt über ein Standardsignal durch die zentrale SPS in Abhängigkeit vom aktuellen Betriebspunkt der Anlage. Dabei wird lediglich die Drehzahl des Brennerlüfters gesteuert, die Gasdosierung, die Zündung und die Flammenüberwachung werden durch die Brennereinheit autark realisiert und kontrolliert. Die eingesetzten Komponenten sind DVGW zertifiziert und bilden eine hardwareseitige Sicherheitskette. Der zentralen Anlagensteuerung wird lediglich der aktuelle Betriebszustand der Brenner übergeben.

Die Zündung und Überwachung sowie die Steuerung der Reformatgasführung wurde ebenfalls in den Programmablaufplan der SPS eingearbeitet.

1.4 Aufbau und Betrieb der Brennstoffzellenanlage

Das Konzept des integrierten Dampfreformers für die Brennstoffzellenanlage wurde in erster Linie aus den bisherigen Erfahrungen und den Versuchsergebnissen am Katalysatorversuchsstand des Projektpartners TU Bergakademie Freiberg erstellt. In Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern wurde die Detaillösungen erarbeitet, sowie Stücklisten und Zeichnungssätze für alle Komponenten angefertigt. Die Einzelkomponenten des Reformers und des Brenners wurden nach diesen Angaben vom Projektpartner UTF gefertigt und anschließend in die Gesamtanlage integriert. Der Reformatgaswärmeübertrager wurde vom Projektpartner Behr Industry gefertigt und anschließend katalytisch beschichtet. Im Ergebnis wurde ein Kompaktreformer erstellt, in dem alle wesentlichen Neuerungen, wie Zweikreisbrenner, katalytisch beschichteter Wärmeübertrager, sowie optimiertes Reformersdesign enthalten sind. Die Brennstoffzellenanlage (siehe Abbildung II-5) wurde beim UTF aufgebaut und

gemäß dem Versuchsprogramm an der TU BAF in Betrieb genommen und betrieben. Der eingebaute Zweikreisbrenner arbeitet in allen Betriebszuständen stabil und gewährleistet einen zuverlässigen Anlagenbetrieb des Reformers.



Abbildung II-5: integrierter Dampfreformer

1.5 Monitoring und Auswertung der Betriebsergebnisse der Brennstoffzellenanlage

Die wesentlichen Reformerparameter zur Beurteilung der Reformatgasqualität werden im Abschlußbericht der TU Bergakademie dargestellt. Hier wird lediglich auf die Auswertung der Kenngrößen des Reformerbrenners eingegangen.

Der Reformerbrenner wird in folgenden Betriebszuständen betrieben:

- Aufheizen im Kalt- oder Heißstart mit Erdgas
- Betrieb mit Reformatgas
- Betrieb mit Anodenrestgas und Erdgas

Beim Start des Reformers im kalten und heißen Zustand wird der Reformer zunächst mit dem Erdgasbrenner auf Betriebstemperatur gebracht. Während dieser Zeit arbeitet der Erdgasbrenner mit einer Leistung von 3 bis 8 kW. Die Abgasemissionen liegen deutlich unterhalb der Grenzwerte des „Blauen Engel“. Die Abgasemissionen und die Brennraumtemperatur sind in Abbildung II–6 dargestellt.

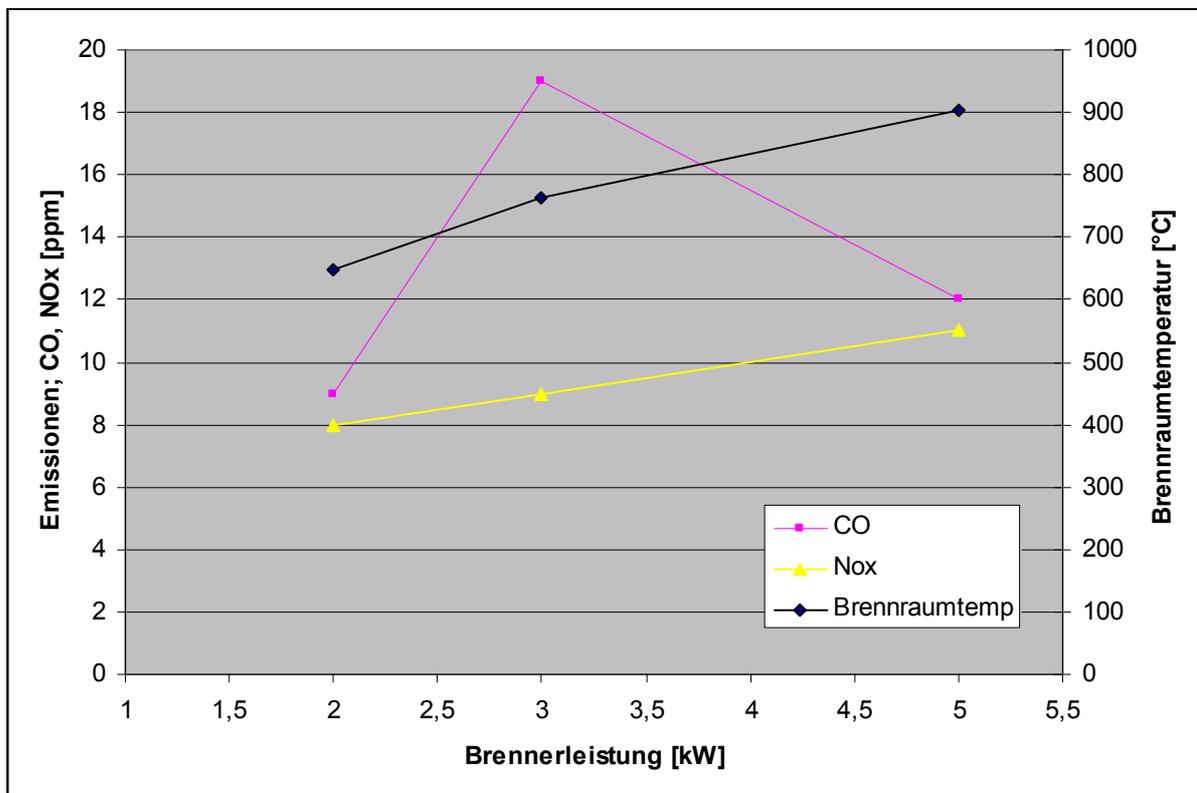


Abbildung II–6: Abgasemissionen der Brennstoffzellenanlage

Wenn der Reformer die Mindesttemperatur erreicht hat, bei der das zugeführte Wasser sicher verdampft, wird der Reformingprozeß gestartet. Das jetzt entstehende Reformat hat noch nicht sofort die notwendige CO- Reinheit um der Brennstoffzelle zugeführt zu werden. Deshalb wird es dem Zweikreisbrenner zugeführt und zur Beheizung des Reformers genutzt. Dabei wird der Erdgasbrenner abgeschaltet und die weitere Beheizung des Reformers erfolgt ausschließlich über das Reformatgas. Da das Reformat während dieses Betriebszustandes im Wesentlichen aus Wasserstoff und Kohlendioxid besteht sind in dieser Aufheizphase keine CO Emissionen messbar.

Wenn alle Prozessstufen ihre Solltemperaturen erreicht haben befindet sich kein CO mehr im Reformat und somit kann die Brennstoffzelle zugeschaltet werden.

Im Brennstoffzellenbetrieb wird sämtliches aus der Brennstoffzelle austretende Anodenrestgas dem Zweikreisbrenner zugeführt und zur Reformerbeheizung genutzt. Zur Einhaltung der gewünschten Reformertemperatur wird jetzt lediglich der Erdgasbrennerteil in Abhängigkeit von der Reformertemperatur geregelt. Unter stationären Bedingungen gemäß Auslegung reicht das Anodenrestgas des Brennstoffzellenstacks für die Beheizung des Reformers aus. Erdgas wird als Regelenergie genutzt.

Die Abgasemissionen der Brennstoffzellenanlage mit Stackbetrieb sind gegenwärtig noch nicht endgültig ausgewertet, die Versuchsergebnisse am Brennersversuchsstand mit synthetisch erzeugtem Anodenrestgas weisen jedoch noch niedrigere Schadstoffemissionen auf.

Das überarbeitete Konzept des Zweikreisbrenners funktioniert damit in allen Betriebszuständen zuverlässig und gewährleistet eine sichere Fahrweise des Dampfreformers.

2. Verwertung der Ergebnisse

Das Konsortium bewegt sich bei der Brennstoffzellenentwicklung auf dem gleichen Markt wie große und sehr große Unternehmen (Viessmann, Baxi-Group, RWE/Bosch/Idatec, Vaillant usw.). Um in diesem Umfeld einen sinnvollen Marktanteil zu belegen, hat sich das Konsortium von Anfang an auf einen Nischenmarkt, kundenbezogene Brennstoffzellenanlagen mit mittleren Leistungen (≥ 4 kW), konzentriert. Dafür ist es aber erforderlich, dass das notwendige Know-how für alle Komponenten bei den jeweiligen Partnern liegt. Im Konsortium wurden deshalb immer alle Komponenten selbst entwickelt und nur für die Herstellung bestimmter Komponenten wurden spezialisierte Partner beauftragt, die nach den Konstruktionsunterlagen des Konsortiums arbeiten.

Während andere Firmen durch den Einkauf erfahrener Partner (zum Beispiel Vaillant → Plug Power) schneller vorangekommen sind, hat dieser Weg aber auch Probleme bezüglich der spezifischen Lösungen (Wärmeauskopplung, Leistungsanpassung). Im Konsortium wird davon ausgegangen, dass mit dem avisierten Nischenmarkt bis 2010 eine Produktion von 1000 Brennstoffzellenanlagen pro Jahr möglich ist.

Zur Bedienung dieses Marktes wurde 2005 die RBZ Riesaer Brennstoffzellentechnik GmbH gegründet. Sie hat die Aufgabe ein Brennstoffzellen-Heizgerät herzustellen und zu vertreiben, unter anderem auch aus Komponenten die in diesem Projekt entwickelt wurden. Die Projektpartner sind teilweise Gesellschafter des Unternehmens bzw. haben feste Zulieferbeziehungen. Bis 2007 sollen dabei in Riesa (einer strukturschwachen Region) 4 technologisch hochwertige Arbeitsplätze in der neuen Firma installiert werden und viele Arbeitsplätze bei Spezialherstellern und Zulieferern erhalten oder neu geschaffen werden. Bis zum Jahre 2010 ist die Schaffung von 18 Arbeitsplätzen bei den Partnern des Projektes und der RBZ GmbH geplant.

Die Ergebnisse aus den grundlegenden Forschungsarbeiten des Projektes werden in die aktuelle Aus- und Weiterbildung des DVGW für Gasversorger und Fachhandwerker des SHK- Gewerbes einbezogen.

3. Fortschritte bei anderen Stellen

Während der Projektphase entwickelten mehrere deutsche Katalysatorhersteller unabhängig voneinander neue Materialien für die Entschwefelung von Erdgas. Sie basieren jeweils auf einer Mischung aus verschiedenen Schwermetalloxiden und zeigen eine hohe Aufnahmekapazität gegenüber Schwefelverbindungen in einer Höhe von 3 – 5 Ma%. Diese Produkte werden mit Preisen vergleichbar denen von Aktivkohle vertrieben, bei gleichzeitig bis zu zehnfacher Aufnahmekapazität hinsichtlich Schwefel. Zusätzlich wirken diese Materialien nicht mehr koadsorptiv gegenüber zum Beispiel zyklischen Kohlenwasserstoffen, was eine Entsorgung als Sondermüll erübrigt. Diese Ergebnisse wurden in die Forschungsarbeiten des Projektes einbezogen.

Der Stand der Technik vom August 2004 wird sehr gut in der unten gezeigten Abbildung II-7 (Veröffentlichung des PTJ) dargestellt.

Abb 3: Kenndaten verschiedener Entwicklungslinien von Brennstoffzellen-Heizgeräten*

	Ebara Ballard	European Fuel Cells	RWE / Buderus	Sulzer Hexis	Vaillant	Viessmann
Systemintegration	Ebara Ballard	European Fuel Cells	RWE / Buderus	Sulzer Hexis	Vaillant	Viessmann
Stackfertigung	Ballard	European Fuel Cells	IdaTech	Sulzer Hexis	PlugPower	Viessmann
Brennstoffzellentyp	PEMFC	PEMFC	PEMFC	SOFC	PEMFC	PEMFC
						
Leistung elektrisch	1 kW	1,5 kW	4,6 kW	1 kW	4,6 kW	2 kW
Leistung thermisch	1,4 kW	3 kW	7 kW	2,5 kW	7 kW	5 kW
Leistungsmodulation	k. A.	Ziel: 20 - 100%	Ziel: 20 - 100%	—	Ziel: 20 - 100%	Ziel: 20 - 100%
Leistung Zusatzbrenner	—	15 kW	40 - 160 kW	12 - 22	25 - 280	optional: 15 - 25
Systemwirkungsgrad elektrisch in %	34 / Ziel: ≥35	25 / Ziel: ≥30	Ziel: ≥35	25 / Ziel: ≥30	29 / Ziel: ≥35	28 / Ziel: ≥32
Entwicklungsstand	Feldtest von 17 Anlagen in Japan seit 2003	Beta-Unit	Prototyp, drei 4,6 kW-Pilotanlagen, zwei davon in Kombination mit Mikrogasturbine	Umfangreiche Praxistesterfahrung mit Vorserienprodukt	Seit 2003 europaweiter Test mit über 50 EURO-Systemen	Prototyp in dritter Version („SOFA 3“)
Planung	Kleinserie für 2005	Test mit 100 Beta-Anlagen in 2005/06	Feldtest ab 2005	Derzeit Entwicklung seriennahes Produkt. Auslieferung Kleinserie ab Ende 2005	Derzeit Entwicklung der nächsten Generation, anschließend weitere Feldtests	Feldtests ab Ende 2005, ab 2007 Kleinserie
Marktreife (Prognose 2004)	2005	ab 2012	ab 2008	ab 2008	bis 2010	ab 2010

Stand August 2004. *Alles Herstellerangaben.

Abbildung II-7: Kenndaten verschiedener Entwicklungslinien von Brennstoffzellen-Heizgeräten

Seit dieser Zeit sind keine weiteren Akteure bzw. neue Produkte auf den Markt für Brennstoffzellenheizgeräte erschienen. Die Fa. Sulzer Hexis AG hat Ende 2005 den Betrieb eingestellt. Die Nachfolger Hexis AG wird voraussichtlich mit dem Jahr 2007

eine neue Gerätegeneration für einen Feldtest vorbereiten. Die Fa. Vaillant hat eine Neuentwicklung der bisherigen Prototypen für die Jahre 2008/09 angekündigt. Zusätzlich sind keine wesentlichen Veränderungen oder spektakulären Fortschritte bei anderen Stellen bekannt geworden. Das liegt zum Teil daran, dass die Publikationen in der Vergangenheit dem realen Stand der Technik zu weit vorausgeeilt sind und gegenwärtig viele Hersteller bemüht sind, den publizierten Stand auch in Feldtests zu bestätigen bzw. Erkenntnisse aus Feldtests in neue Gerätegenerationen überzuleiten.

Nach wie vor sind zu hohe Kosten und eine zu kurze Lebensdauer das Hauptproblem bei der Einführung dieser neuen Technologie in Europa. Auch aus den laufenden Literatur- und Patentrecherchen sind bei anderen Stellen keine wegweisenden Fortschritte bekannt geworden. Zu beobachten sind allerdings sehr umfangreiche Patentanmeldungen großer Firmen auf der ganzen Welt.

Deutlich ist aber ein Trend in der Forschung zu Hochtemperatur- PEM- Membranen. Mit diesem Membrantyp werden die CO-Toleranz und das Feuchtmanagement besser beherrscht. Nachteile sind höhere Materialbeanspruchungen und noch geringere Leistungsdichten. Die in diesem Projekt entwickelten Komponenten können jedoch auch in Anlagen mit Hochtemperatur- PEM- Brennstoffzellen verwendet werden.

4. Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Verbundpartner haben eine umfangreiche Öffentlichkeitsarbeit betrieben. Im Wesentlichen sind das:

- [1] Krause, H.; Arnold, J.; Giesel, S.:
Feldtestergebnisse eines Brennstoffzellen- Mini-BHKWs aus dem Brennstoffzellen Netzwerk Sachsen
Forschungsforum - 55. Berg- und Hüttenmännischer Tag,
16.-18.06.2004, Freiberg
- [2] Grosser, K; Krause, H.; Arnold, J.; Giesel, S.:
Workshop „Neue Perspektiven der Brennstoffzellentechnologie“ -
Netzeinbindung von Brennstoffzellenanlagen -Technologiezentrum des
Landkreises Riesa-Großenhain, 09.11.2004
- [3] DBI; s&r; TU Bergakademie Freiberg; Moderator: Dr. Höwener (PTJ):
„Präsentation und Diskussion der Projektergebnisse zur

- Brennstoffzellenentwicklung“ - Brennstoffzellen zur Hausenergieversorgung
BMW Berlin, 15./16.11.2004
- [4] DBI:
Gutachten für das Brennstoffzellenheizgerät der SW- Riesa
Freiberg, 17.09.2004
- [5] Krause, H.; Giesel, S.; Kühne, W.; Arnold, J.:
„Konzepte und Erfahrungen beim Einsatz eines Mini- BHKW aus dem
Brennstoffzellennetzwerk Sachsen“;
Gas- Wärme- International; Januar 2005
- [6] Krause, H.:
inhouse4000 - 1 Jahr später (2006)
Riesaer Brennstoffzellen-Workshop,
Glaubitz, 24.1.2006
- [7] Krause, H.:
PEM- Brennstoffzellen "Made in Saxony"- mehr als eine Vision“
2. Dresdner Wasserstofftag
Dresden, 2.05.2006
- [8] Grosser, K.:
Auslegungsprinzipien eines integrierten Erdgas-Dampfreformers für
stationäre PEM-Brennstoffzellen-Systeme“
Diss. TU Bergakademie Freiberg, eingereicht 2006
- [9] Gerber, J.:
Methodik zur Bewertung modularer Konzepte zur Reformatgasaufbereitung
für PEM-Brennstoffzellenanlagen zur dezentralen Energieversorgung.
Diss. TU Bergakademie Freiberg, eingereicht 2006
- [10] Steinbrück, R.:
Entwicklung und Validierung eines dynamischen Simulationsmodells für die
Identifizierung von Dampfreformern
Dipl.-Arbeit, TU Bergakademie Freiberg, 12/2004
- [11] Steinbrück, R.:
A Practical Example of the Identification of Disturbed Systems with the
Component Method.
Vortrag, St. Petersburg, Russ.; 24.-27.04.06
- [12] Krause, H.:
Erfahrungen mit dem inhouse4000 Brennstoffzellensystem
Vortrag, 57. BHT 22.-23.06.2006

Präsentationen:

- [1] Thüringen-Ausstellung, 26.02.2005 bis 06.03.2005, Thüringen, 2005
- [2] enertec, 08.03.2005 bis 11.03.2005, Leipzig, 2005
- [3] Hannovermesse, 11.04.2005 bis 15.04.2005, Hannover, 2005

III. Erfolgskontrollbericht

1. Beitrag des Vorhabens zur Erreichung der förderpolitischen Ziele

Das InnoRegio – Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wurde vorrangig zur Beseitigung struktureller Defizite in den neuen Bundesländern gestartet. Ziel der InnoRegio - Initiative Freiberg RIST (Regionales Innovationsnetzwerk Stoffkreisläufe) war die Stärkung und Profilierung der Region Freiberg als Wissenschafts- und Wirtschaftscluster auf dem Gebiet der innovativen Werkstoffe und Materialien. Im Fokus steht dabei der Gedanke geschlossener Stoffkreisläufe als Beitrag für nachhaltiges Wirtschaften. Diesem Vorhaben ordneten sich aber auch Projekte unter, die sich mit der Entwicklung neuer innovativer Technologien und Produkte im Bereich der dezentralen Energieversorgung beschäftigen. Ein herausragendes Ziel war die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit gerade von klein- und mittelständischen Unternehmen mit Unterstützung regionaler Forschungseinrichtungen.

Mit dem nun abgeschlossenen Projekt wird dem Gedanken des nachhaltigen Wirtschaftens und zur Ressourcenschonung auch im Energiebereich in besonderer Weise Rechnung getragen. So können Brennstoffzellen im dezentralen, stationären Betrieb beim Endverbraucher durch die gleichzeitige und direkte Erzeugung von Strom und Wärme fossile Energieträger im gesamten Lastbereich effizienter umwandeln als bisherige Kraft-Wärme-Kopplungen in Großkraftwerken, bei denen die Nutzung der erzeugten Abwärme in der Regel nicht möglich ist. Darüber hinaus werden nur äußerst geringe Emissionen freigesetzt. Durch den Einsatz eines Reformers kann der derzeit erschlossene Energieträger Erdgas, der gleichzeitig den kohlenstoffärmsten fossilen Brennstoff darstellt, effektiver genutzt werden. Gleichzeitig wird mit der Vorreformertechnologie das Einsatzfeld der regenerativen Energieträger (Biogas) für die Brennstoffzellentechnologie eröffnet.

Das Vorhaben schließt fachlich an andere Vorhaben an (z. B. BMWi-FKZ: 0327141). Mit dem Vorhaben wurde das Netzwerk aus Herstellern von Komponenten für Brennstoffzellensysteme auf die Region Freiberg ausgedehnt. Den regionalen Forschungseinrichtungen wie TU Bergakademie Freiberg und DBI GUT ist es

gelingen, ihr Know-how für die Region Freiberg gewinnbringend in ortsansässige Unternehmen überzuleiten. Es wurde ein Keim, geschaffen der selbständig und über das Netzwerk hinaus seine Produkte anbieten kann.

Das Vorhaben ordnet sich außerdem den energiepolitischen Zielstellungen der Bundesregierung unter, die sich insbesondere in den neuen Teilprogrammen der Ministerien BMBF, BMWi und BMVBS wieder finden und im Nationalen Entwicklungsplan des Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie festgehalten wurden. Die konsequente Orientierung des Vorhabens auf diese Ziele und die erreichten Ergebnisse (siehe Punkt II des Abschlußberichtes) sind Beleg dafür, dass mit dem Vorhaben wesentliche forschungspolitische Ziele erreicht wurden, insbesondere

- Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit hochwertiger Energietechnologien und der zugehörigen Gerätetechnik durch deutsche Unternehmen, besonders von kleinen und mittelständischen Unternehmen in den strukturschwachen gebieten der neuen Bundesländer
- Schaffung von Arbeitsplätzen in diesen Regionen
- Entwicklung von Hochtechnologien in Deutschland
- Mehrwert für Deutschland

Mit dem Vorhaben wurde einer der technologische Schwerpunkte bearbeitet die sich sowohl in die Innoregio – Initiative RIST als auch in die aktuellen Forschungsziele der Bundesregierung einordnen. Dies sind die für den projektrelevanten Typ der PEM- Brennstoffzellen vorgegebenen Forschungsschwerpunkte

- Membranmaterialien
- Katalysatormaterialien
- Kompaktreformer

Sie wurden im Vorhaben komplex bearbeitet und im Sinne einer marktfähigen Systemlösung kombiniert. Das Ergebnis liefert neben der Brennstoffzellentechnik auch Beiträge zu anderen forschungspolitischen Schwerpunkten der Energieforschungspolitik der Bundesregierung, insbesondere „Energieeffizienz in Industrie, im Gewerbe, im Handel und bei Dienstleistungen“, „Rationelle

Energieumwandlung“ und zu übergreifenden Strategien der Kombination von fossilen Energieträgern (insbesondere Erdgas) mit erneuerbaren Energien.

Obwohl sich das Vorhaben den nationalen Programmen unterordnet, wurde die Zielstellung auch unter dem Aspekt fixiert, einen Beitrag zur Erreichung förderpolitischer Ziele Europas zu leisten und somit die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit der Projektergebnisse im europäischen Rahmen zu sichern. Ein Blick auf die im VI. Rahmenprogramm für Forschung und Entwicklung fixierten Ziele („Sustainable Energy Systems“) zeigt, dass die Vorhabensziele auch den Zielen der EU-Forschungspolitik entsprechen. Die Fortführung wesentlicher Linien aus dem VI. im VII. Rahmenprogramm insbesondere auch die Brennstoffzellentechnik wird durch die bisher zum VII. Rahmenprogramm vorliegenden Materialien bestätigt.

2. Ergebnisse und Erfahrungen

2.1 Wissenschaftlich– technisches Ergebnis

Im Vorhaben wurde ein funktionsfähiger Kompaktreformer für PEM- Brennstoffzellen-Heizgeräte entwickelt, in Betrieb genommen und ersten Tests unterzogen. Der Kompaktreformer wurde in ein Brennstoffzellen-Heizgerät integriert und kann mit diesem betrieben werden. Das Gerät wurde zum Statusseminar der InnoRegio-Initiative RIST im Oktober 2006 präsentiert. Es wurden ferner alle funktionsbestimmenden Komponenten entwickelt und sowohl einzeln als auch im Komplex als Kompaktreformer getestet. Der Langzeittest gemeinsam mit dem Brennstoffzellen-Heizgerät folgt im Anschluss an Vorhaben bei den Projektpartnern. Es liegt ein reproduzierbares System vor, auf dessen Basis weitere Arbeiten für die schrittweise Optimierung der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems ausgeführt werden können.

Nicht alle ursprünglichen Ziele konnten wie vorgesehen umgesetzt werden. Ein wesentlicher Vorteil war dabei die Zusammenarbeit zwischen den Forschungseinrichtungen und den Industriepartnern. So konnten hoch risikoreiche Voruntersuchungen bei den Forschungseinrichtungen mit einer Tiefe durchgeführt werden, die das Potenzial der beteiligten KmU bei weitem überschritt. Wesentliche

Beispiele sind die Entwicklungsarbeiten zur Hochtemperaturentschwefelung und zum Brennersystem. Trotz Rückschlägen in der Entwicklungsarbeit wurde das Projekt mit Verzögerungen erfolgreich zu Ende geführt. In allen Fällen wurden innovative neue Lösungen entwickelt, die die ursprünglichen Ziele erfüllen. Dazu gehören die Entschwefelung des Erdgases und die Entwicklung des Mehrstoffbrenners mit einem extrem weiten Arbeitsbereich über die ursprünglichen Ziele hinaus. Die Entwicklung des chemisch aktiven Wärmeübertragers und des Abgassystems könnten wie geplant durchgeführt werden, obwohl auch hier Ergebnisse erreicht wurden, die in der ursprünglichen Planung nicht vorgesehen waren aber durch parallel laufenden Entwicklungen bei anderen Unternehmen befördert wurden (insbesondere die Entwicklung neuer Katalysatoren).

Hinsichtlich der ausführlichen Darstellung des Ergebnisses verweisen wir auf den Hauptteil (Teil II.) des Schlussberichtes.

2.2 Erreichte Nebenergebnisse

Die Einordnung von Ergebnissen eines FuE-Vorhabens als „Hauptergebnis“ oder „Nebenergebnis“ kann naturgemäß nur sehr subjektiv erfolgen. Im Vorhaben sind als „Nebenergebnisse“ angefallen:

- Bei der Umwandlung der Odorstoffe im Erdgas zu H₂S fallen Zwischenprodukte an, die erst bei unerwartet hohen Temperaturen katalytisch zerstört werden können. Eine Hochtemperaturentschwefelung wird damit komplexer und kostenintensiver. (TU BAF)
- Es wurden die Grenzen ermittelt unter denen Wasserstoff und Erdgas in einem Vormisch-Oberflächen-Brennersystem eingesetzt werden können. (DBI GUT)
- Es wurden Sicherheitskonzepte bei der Verbrennung von Gasgemischen entwickelt, insbesondere bei der Sicherheitstechnik (Flammenüberwachung) wurden neue Arbeiten gestartet. (DBI GUT, TU BAF)
- Es wurden neue Erkenntnisse beim Einsatz von Lotwerkstoffen gesammelt. Schwerpunkt war der Einsatz von Lötpasten (Ni) bei der Vakuumlötlung von komplexen Strukturen. (BI)
- Erweitertes know-how zu Beschaffungs- und (auch potentiellen) Absatzmärkten als Basis für eine rationelle Vermarktung; (UTF, BI)

- Auf- und Ausbau des Geschäftsfeldes „Planung und Einbindung innovativer Energieversorgungssysteme in die Hausenergietechnik“ (DBI GUT);
- Aufbau eines Geschäftsfeldes „Gasanalyse für Brennstoffzellen“ (DBI GUT);
- Neue innovative Inhalte für die akademische Lehre (TU BAF) und praxisnahe Schulungen (DBI GUT).

2.3 Wesentliche Erfahrungen

Neben den unmittelbaren Ergebnissen der Entwicklung eines Kompaktreformers und einer Brennstoffzellenanlage, den wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen und Ergebnissen und dem Zugewinn an Know-how zur Reformingtechnologie konnten vor allem Erfahrungen gesammelt werden, die den Projektpartnern in ihrer künftigen FuE-Arbeit zugute kommen und so mittelbar die Wettbewerbsfähigkeit erhöhen werden. Wesentliche Erfahrungen sind:

- Ein konkretes FuE-Thema muss trotz wissenschaftlich-technischen Risikos so fixiert sein, dass seine Ziele erreichbar sind. Bei der Konzeption muss die Machbarkeit sehr realistisch eingeschätzt werden.
- Gleiches gilt für die realistische Einschätzung des finanziellen Risikos. Trotz der 50%igen Förderung verbleibt bei den Antragstellern ein hohes Risiko, wenn sich der prognostizierte wirtschaftliche Erfolg nicht oder zu spät einstellt.
- Mit dem Einsatz des Kompaktreformers in ein Brennstoffzellen-Heizgerät wurden wesentliche Erfahrungen im Zusammenspiel mit der äußeren Peripherie gesammelt. Die hat die Einordnung des Projektergebnisses in ein Endprodukt wesentlich erleichtert und hatte Rückwirkungen auf die Forschungsarbeit im Vorhaben.
- Das Zusammenspiel zwischen Industriepartnern und Forschungseinrichtungen mit der Möglichkeit Grundlagenuntersuchungen durchzuführen, hat wesentlich zum Erfolg des Projektes beigetragen und das Risiko auf ein für die Industriepartner vertretbares Niveau gesenkt.
- Eine frühzeitige und kontinuierliche Erfolgskontrolle ist immanenter Bestandteil der Arbeit an einem FuE-Projekt.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

3.1 Erfindungen/Schutzrechte/Lizenzen/Verwertungsmöglichkeiten

In der Projektlaufzeit wurde eine standortbezogene Verwertung der bisherigen Forschungsergebnisse realisiert. Mit der Installation der Versuchsanlage an der TU BAF haben alle Partner die Möglichkeit, von den Langzeituntersuchungen zu partizipieren. Die Anlage wird weiterhin für Versuchszwecke genutzt und dient als Demonstrationsobjekt für potentielle Anwender und interessiertes Fachpublikum. Außerdem konnten Vertreter der Administration anhand der Anlage für die Unterstützung der Brennstoffzellenforschung durch die öffentliche Hand sensibilisiert werden.

Erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten bestehen vor allem in der Installation weiterer Anlagen. Dazu wird in den kommenden Jahren (2007 – 2009) ein erweiterter Feldtest vorbereitet. Dazu liegen Bestellungen für Feldtestanlagen vom Type INHOUSE 4000 von der Verbundnetz Gas AG, sowie eine Bestellung für eine angepasste BZ-Anlage für Biogas vom Institut für Agrartechnik Bornim e.V. vor.

Es werden Schutzrechtsanmeldungen für Einzelkomponenten (Zweikreisbrenner, aktive Wärmeübertrager) vorbereitet.

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Der Projektstart fiel zeitlich in die Spätphase einer gewissen „Brennstoffzelleneuphorie“ in Deutschland. Der Entwicklungsstand bei den nationalen Wettbewerbern war nicht genau bekannt, da deren FuE-Aktivitäten nur sehr lückenhaft publiziert wurden. Es war aber nicht auszuschließen, dass ein Entwickler kurzfristig ein funktionsfähiges Produkt in großen Stückzahlen auf den Markt wirft und die eigenen Entwicklungen zu spät kommen.

Mittlerweile ist erkannt worden, dass der Entwicklungsfortschritt nicht so schnell vollzogen werden kann wie ursprünglich angenommen. Die bekannten deutschen Entwickler befinden sich in der Phase von Vorserien für kleine Feldtests, bzw. in Phasen, in denen gewisse Entwicklungsschritte überdacht und neue Forschungsprojekte initiiert werden. Unter diesem Aspekt ist die Entwicklung in unserem Vorhaben durchaus auf einem vergleichbaren technischen Stand. Die

wirtschaftlichen Erfolgsaussichten sind intakt und entsprechen nach wie vor der Darstellung im Antrag. Gleiches gilt für die anzusprechenden Nutzergruppen und Zielmärkte sowie für die Umsetzungsstrategien.

In die Anlagen der uns bekannten Wettbewerber (Abschnitt II.6) sind funktionsbestimmende Komponenten eingebaut, die nicht Eigenentwicklung sind. Damit sind diese Entwickler nur bedingt in der Lage, die Komponenten und das Gesamtsystem zu modifizieren. Die in unserem Vorhaben entwickelte Anlage besteht ausschließlich (Ausnahme Wechselrichter) aus selbst entwickelten Komponenten. Wir sehen darin einen konzeptionellen Vorteil. Hinzu kommt der Aspekt, dass damit auch alle Komponenten in Deutschland gefertigt werden sollen. Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurde das bestehende Netzwerk von den Projektpartnern wirkungsvoll erweitert, so konnten über dieses Vorhaben hinaus Baugruppenhersteller aus den neuen Bundesländern gewonnen und in die Entwicklungsarbeiten einbezogen werden. Ein erster Schritt in diese Richtung ist der Aufbau einer Fertigung/Endmontage in der RBZ GmbH in Riesa.

Wenn es gelingt, das Produkt in absehbarer Zeit (2 Jahre) zur Marktreife zu führen, kann unabhängig vom Erfolg anderer Entwickler ein großer Markt besetzt werden. Die Antragsteller arbeiten gegenwärtig (u.a. im Rahmen von Feldtestprogrammen) daran, diesen zu quantifizieren und die erforderlichen Produktionskapazitäten zu fixieren. Für eine Vorbereitung des Absatzes ist die Vorstellung eines neuen Prototyps auf der Hannovermesse 2007 in Vorbereitung, in die Erkenntnisse des Vorhabens einfließen.

Die wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse ist gemeinsam mit der RBZ GmbH in folgenden Stufen vorgesehen:

➤ **Start einer Feldtestkampagne**

- Bau von mindestens 12 Geräten bis 2008
- 2-jähriger Feldtest bei Anwendern
- Kooperationsverträge mit Gasversorgern wurden vorbereitet
- Stufe 1 in 2007 - 5 Anlagen: gegenwärtiger Entwicklungsstand
- Stufe 2 in 2008 - 7 Anlagen: mit Redesign und kostenoptimiert

➤ **Beginn der Serienfertigung 2009**

- Ca. 20 Anlagen im ersten Jahr

- Vorläufige Ausbaustufe 2010: 200 Anlagen/a
- Geschätzter Umsatz der beteiligten Unternehmen bei Brennstoffzellensystemen: 2,5 Mio/a

➤ **Erweiterung des Produktprogramms bei den Herstellern der Komponenten**

- Fortführung der Reformarentwicklung für andere Brennstoffe
- Erweiterung der Einsatzgebiete (Wärmebehandlungsanlagen, Erweiterung der Leistungsgröße bis 50 m³/h H₂)

3.3 Wissenschaftlich – technische Erfolgsaussichten

In der Vorhabenbeschreibung wurde der wissenschaftlich–technische Erfolg des Projektes als machbar eingeschätzt. Diese Prognose hat sich aus unserer Sicht bestätigt. Auf dieser Basis solider, innovativer und belastbarer FuE – Ergebnisse können auch die wissenschaftlich–technischen Erfolgsaussichten nach Abschluss des Projektes als sehr gut eingeschätzt werden. Der zukünftige wissenschaftlich–technische Erfolg wird sich in zwei Kategorien dokumentieren:

- a) Weiterführende FuE-Arbeiten zur Komplettierung und modularen Optimierung der Ergebnisse mit dem letztendlichen Ziel eines marktfähigen Produktes „Brennstoffzellenanlage“. Hierzu siehe Pkt. III.3.4 des vorliegenden Erfolgskontrollberichtes;
- b) Wissenschaftliche Erfolge im Sinne der Verbreitung der Ergebnisse. Hier sind vor allem zu nennen:
 - Einbeziehung der Ergebnisse in die akademische Lehre der TU Bergakademie in Form von Vorlesungen und Praktika;
 - Schulungszyklus „Innovative Energiesysteme“ des DBI im Auftrage des DVGW im nationalen Rahmen;
 - Einbindung der Ergebnisse in die internationale Weiterbildung von Gasingenieuren (e-learning system for gas engineering, www.celgas.net)
 - Innovationsforum „Brennstoffzellen in dezentralen Energieversorgungsanlagen“ im TGZ Riesa – Großenhain und eine jährliche Workshopreihe für Produzenten und Anwender (nächster Workshop 27.02.2007);
 - Präsentation auf der Hannover – Messe 2007

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Auch hier wurden die in der Vorhabenbeschreibung genannten Prognosen realisiert. Dies ist wiederum eine gute Basis für den künftigen wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Anschluss.

Der wissenschaftliche Anschluss ist erforderlich, um ein marktfähiges Produkt zu entwickeln und auf einem wettbewerbsfähigen Niveau zu halten. Die Anschlussprojekte sollen „weiße Flecken“ in der bisherigen Entwicklung tilgen sowie eine schrittweise Komponenten- und Systemoptimierung für das Produkt bewirken. Gegenwärtig sind folgende FuE-Aktivitäten zum wissenschaftlichen Anschluss in Arbeit:

- Mitarbeit im Projekt „Kompetenz-, Innovations-, und Netzwerkzentrum Brennstoffzelle im TGZ des Landkreises Riesa – Großenhain“
Technologieförderung des Freistaates Sachsen, Teil „Transferprojekte“
- FuE – Projekt „Entwicklung einer Flammenüberwachung für Brenner zum Betrieb mit wasserstoffhaltigem Gas“
Laufzeit: 11/2004 – 12/2006, Förderprogramm IGF des BMWA
- Beantragtes FuE – Projekt „Entwicklung von PEM- Brennstoffzellensystemen mit Hochtemperaturmembranen“
geplante Laufzeit: 09/2006 – 02/2009, BMWi

Das Projektergebnis ist auch wirtschaftlich anschlussfähig. Der Anschluss wird erreicht durch die Installation weiterer Anlagen (siehe 3.2, weitere Bestellungen werden derzeit verhandelt). Der Gründung der Firma RBZ GmbH, welche Aufbau, Wartung und Service weiterer BZ-Anlagen des Typs „INHOUSE 4000“ realisieren wird, ist ein Beleg für das starke Interesse der Projektpartner am wirtschaftlichen Erfolg des Vorhabens.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Trotz erheblichen Schwierigkeiten im Projektablauf konnte in Abstimmung mit dem Projektträger eine Präzisierung der Aufgabenstellung vereinbart werden, so dass alle vorgesehenen Zielstellungen erreicht worden sind. Die durch DBI zu verantwortenden Arbeitspakete konnten erfolgreich abgeschlossen werden.

Zusätzlich zum ursprünglichen Antrag wurde das Konzept des Zweikreisbrenners entwickelt, erprobt und erfolgreich in die Gesamtanlage integriert.

5. Präsentationsmöglichkeiten

Die realisierten und geplanten Möglichkeiten zur Präsentation vor potentiellen Nutzern und zur Verbreitung der Ergebnisse wurden unter Abs. 3.3 dargestellt. Ein Teil der während des Projektes präsentierten Zwischenergebnisse ist in Abschnitt II-7 aufgelistet. Diese Aktivitäten werden planmäßig weitergeführt. Damit unterstützen die Antragsteller die Aktivitäten, ihre Verpflichtungen entsprechend NKBF 98 (Nutzung der Ergebnisse zu Innovationen, Ausübungs- und Verwertungspflicht) zu erfüllen.

Am TGZ- Riesa- Großenhain wurde die jährliche Workshopreihe für Produzenten und Anwender von Brennstoffzellenanlagen sehr erfolgreich weitergeführt.

Zusätzlich beteiligen sich die Projektpartner über das Transferprojekt an der Gestaltung der Internetseite www.pem-brennstoffzelle-sachsen.de, in der aktuelle Entwicklungen und Ergebnisse präsentiert werden.

Die Abschlussveröffentlichung zum Projekt ist gegenwärtig in Vorbereitung und wird voraussichtlich im Januarheft der Zeitschrift „Gaswärme international“ erscheinen.

6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

In der ersten Hälfte der Projektlaufzeit konnte die Ausgaben- und Zeitplanung eingehalten werden. Mit den weiterführenden Erkenntnissen zum Aufgabenpaket Brennerentwicklung wurden jedoch zusätzliche Untersuchungen notwendig. Ähnliche Situationen ergaben sich bei den Projektpartnern, sodass die Arbeiten nicht zum vorgesehenen Projektende abgeschlossen werden konnten. Damit ergaben sich auch Mehrkosten bei allen Partnern. Der Projektträger zeigte sich an dieser Stelle nicht bereit, trotz objektiv vorhandener Gründe und Erklärungen der Partner eine Verlängerung bzw. Aufstockung mit zu tragen. Die Inbetriebnahme der Versuchsanlage und das gesamte Monitoringprogramm für den Versuchsbetrieb wurde und wird über die Laufzeit des Projektes fortgeführt.