Zukunfts-
investitions-
programm

zip

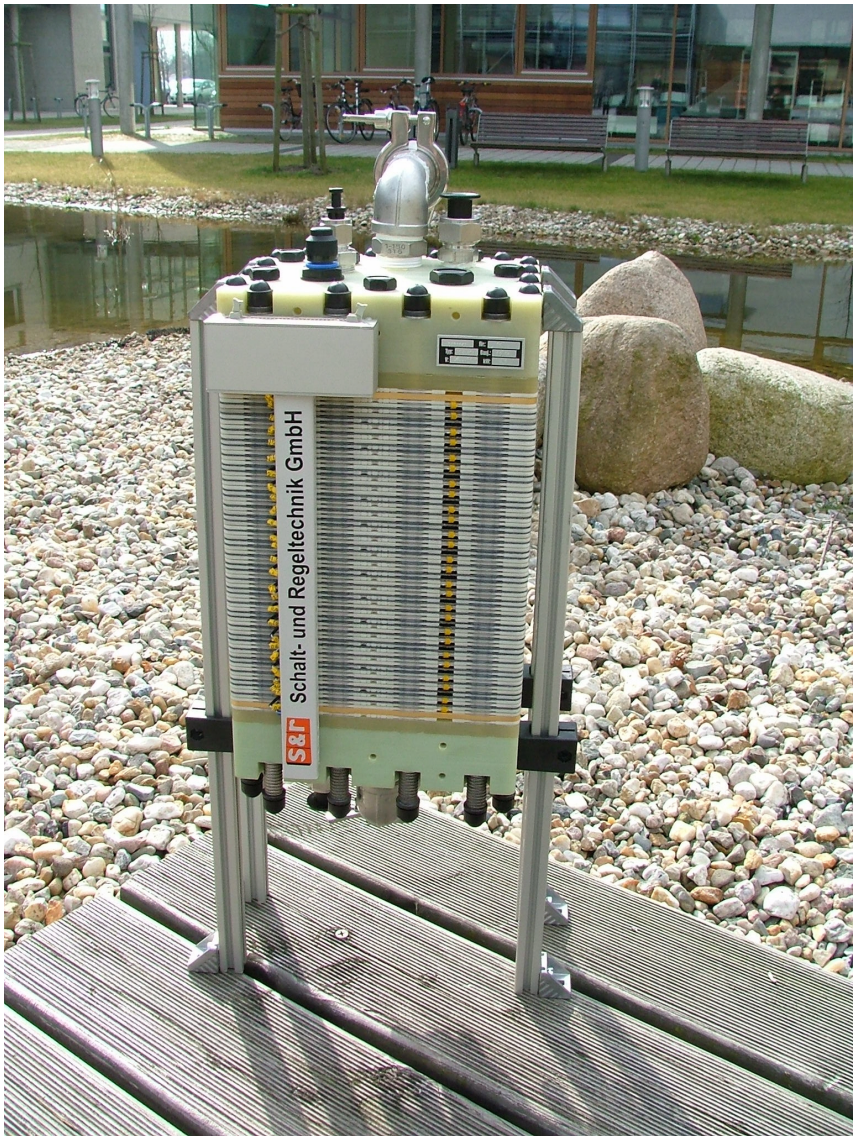
Abschlussbericht

zum Projekt

Entwicklung und Feldtest

von

stationären PEM-Brennstoffzellenanlagen



Abschlussbericht

zum Projekt

Entwicklung und Feldtest

von

stationären PEM-Brennstoffzellenanlagen

für

die dezentrale Energieversorgung

im Leistungsbereich bis 12 kW

Teilvorhaben:

" Entwicklung der Regelungstechnik, Messwerterfassung und Stacks für PEM Brennstoffzellen im Leistungsbereich bis 12kW"

Antragsteller: Schalt- und Regeltechnik GmbH, Berlin
Köpenicker Str. 325, 12555 Berlin

Projektpartner: DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Freiberg
Halsbrücker Str. 34, 09599 Freiberg

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik
G.- Zeuner-Str. 7, 09596 Freiberg

Förderkennzeichen: 0327141C

Berichtszeitraum: 01.08.2001 – 31.05.2004

Bild-/Tabellenverzeichnis I - II

BI/1	Schema eines Brennstoffzellen-BHKW – Entwicklungsstand des Konsortiums mit Beginn des Forschungsprojektes [2]
Tabelle I/1	Liste der Hauptarbeitsetappen
BII/1	Luftversorgungsmodul mit Schwingkolbenantrieb
BII/2	Versuchsaufbau mit Rootsgebläsesystem
BII/3	Kompressormodul 1
BII/4	Kompressormodul 2
BII/5	Membranbefeuchter s&r_1
BII/6	Versuchsaufbau Sprühbefeuchter
BII/7	Gesamtanlage
BII/8	Korrodierte Stromabnehmerplatte
BII/9	Kennlinien 60-Zeller
BII/10	Anlage mit 2 Schaltfeldern
BII/11	EZM-Modul
BII/12	Containeranlage 1kW
BII/13	Stack-Kennlinien
BII/14	Brennstoffzellenmodul für 4kW-Versuchsanlage
BII/15	Container für 4kW-Versuchsanlage
Tabelle II/2	Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Anlagentypen
BII/16	Kenndaten verschiedener Entwicklungslinien von Brennstoffzellen-Heizgeräten

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung 6

1. Allgemeines 6
2. Aufgabenstellung 7
3. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 8
4. Planung des Vorhabens 10
5. Ablauf des Vorhabens 11
6. Literatur 14

II. Ausführliche Darstellung 15

1. Erzielte Ergebnisse 15
   1.1 Brennstoffzellenmodul (s&r) 15
   1.2 MSR-Technik 29
   1.3 GLT-Rechner 32
   1.4 Ergebnisse der Versuchs- und Feldtestanlagen 33
      1.4.1 1kW-Versuchsanlage 33
      1.4.2 4kW Brennstoffzellenversuchsstand Stackmodul 37
2. Voraussichtlicher Nutzen 42
3. Fortschritte bei anderen Stellen 43
4. Vorträge, Veröffentlichungen, Literatur zur Brennstoffzellentechnologie (V) .. 44

III. Erfolgskontrollbericht 50

1. Beitrag des Vorhabens zur Erreichung der förderpolitischen Ziele 50
2. Ergebnisse und Erfahrungen 52
   2.1 Wissenschaftlich – technisches Ergebnis 52
   2.2 Erreichte Nebenergebnisse 52
   2.3 Wesentliche Erfahrungen 53
3. Fortschreibung des Verwertungsplans 54
   3.1 Erfindungen/Schutzrechte/Lizenzen/Verwertungsmöglichkeiten 54
   3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende 55
   3.3 Wissenschaftlich – technische Erfolgsaussichten 56
   3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 57
4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben 57

5. Präsentationsmöglichkeiten 58
6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung 58

I. Kurze Darstellung

1. Allgemeines

Die nachhaltige Beeinflussung der Umwelt durch Emissionen aus der Bereitstellung von Elektro- und Heizenergie erfordert viel stärker als bisher eine Umstellung auf energiesparende und emissionsarme Technologien. Dabei spielen neben der Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien auch die rationelle Energieverwendung, die Senkung des spezifischen Energieverbrauches und innovative Technologien mit hohen Wirkungsgraden gerade im Bereich der dezentralen Energieversorgung eine entscheidende Rolle. PEM-Brennstoffzellen zählen zu den erfolgversprechendsten Technologien in diesem Sektor. Der Einsatz von Brennstoffzellen bietet die attraktive Perspektive Strom- und Wärme, *gekoppelt* und *bedarfsgerecht* am Ort des Geschehens bereitzustellen. Gerade im Haushaltsbereich und bei Kleinverbrauchern im gewerblichen Bereich liegt hier ein erhebliches Potenzial verborgen. Anders als bei der zentralen Energieversorgung mit der hocheffizienten GuD Kraft-Wärme-Kopplung ist der Absatz der entstehenden Wärme in vielen Betriebssituationen sichergestellt und mit geringen Transportverlusten behaftet. Ein weiterer Vorteil von Brennstoffzellen ist ihr hervorragendes Teillastverhalten bei nahezu gleichbleibenden Wirkungsgraden. Daraus ergeben sich hohe Gesamtwirkungsgrade mit folglich geringeren Schadstoffemissionen. Werden Brennstoffzellenanlagen mit Erdgas als Primärenergieträger betrieben, so kann man auf eine vorhandene Infrastruktur zurückgreifen. Zudem ist das Emissionspotenzial von Erdgas als niedrig einzuschätzen, sowohl den Schwefelanteil im Brennstoff betreffend als auch den Anteil am Treibhausgas CO_2 im Abgas, der bei der Reformierung unvermeidlich ist. Eine Direktversorgung von Brennstoffzellen mit Wasserstoff ist kurz- und mittelfristig nicht zu erwarten, deshalb wird im wesentlichen auf die Reformierung von Erdgas orientiert. Im Rahmen des Forschungsprojektes hatte sich ein Konsortium aus vier Unternehmen und Forschungseinrichtungen zusammengeschlossen:

S&R Schalt- und Regeltechnik GmbH, Berlin (S&R)
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Freiberg (DBI)
TU Bergakademie Freiberg, Inst. f. Wärmetechnik und Thermodynamik (TUBA)

KET Energietechnik GmbH Anlagenbau & Co. KG, Wermsdorf (KET)

2. Aufgabenstellung

Die Grundlagen der Reformierung von Erdgas zu Wasserstoff und dessen Umwandlung in elektrische Energie in einer PEM-Brennstoffzellenanlage sind bekannt. Das beantragende Konsortium ist an dieser Entwicklung beteiligt. Der wesentliche Forschungs- und Entwicklungsbedarf ergibt sich aus der Überleitung dieser Technologie in ein kostengünstiges, zuverlässig arbeitendes Produkt für die Serienfertigung. Teilschritte auf diesem Weg sind:

- die Anpassung der Komponenten an die erforderliche Größenordnung,
- die Optimierung der Brennstoffzellensysteme,
- die Verbesserung der Langzeitstabilität,
- die Miniaturisierung und die Integration der Bauteile sowie
- die Optimierung des automatischen Betriebes einer Brennstoffzelle im gegebenen Umfeld.

Kurz- und mittelfristig verspricht die Herstellung von BZ-Anlagen durch kmU in der Leistungsgröße 4 bis 12 kW (elektrisch) den größten Erfolg. Zielgruppe dieser Leistungsklasse sind Mehrfamilienhäuser, kleine bis mittlere Gewerbebetriebe und öffentliche Gebäude.

Die strategische Zielstellung für das Konsortium ist die Erweiterung des Leistungsbereiches der Anlagen auf die genannte Größenordnung mit einer Abstufung von 4 kW elektrisch. Als Basistyp wurde die Leistungsklasse 4 kW fixiert. Für diesen Basistyp sollten Versuchsanlagen zur Erprobung von Komponenten bei den Partnern errichtet werden sowie Feldtestanlagen zur Langzeiterprobung des Gesamtsystems.

3. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Mit der Beantragung des Forschungsprojektes hatten sich bereits zwei Verfahrenswege für den Einsatz in kleinen stationären Energieversorgungsanlagen herauskristallisiert – die PEM- und die SOFC-Technologie. Beiden wurde ein ausreichendes wirtschaftliches Potenzial bescheinigt.

Die Antragsteller beschäftigen sich zum Teil seit 1995 mit der Entwicklung und Erprobung der Brennstoffzellen-Technologie sowohl auf der Seite des Erdgas-Reformings als auch in der Brennstoffzellen-Stack-Entwicklung. 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 stand die Problematik der Reformatgasqualität (H_2-Gehalt, CO-Gehalt) in Abhängigkeit von bestimmten Betriebssituationen sowie der elektrische Wirkungsgrad von Brennstoffzellen-Stacks bei unterschiedlichen H_2-Gehalten im Reformatgas. Die Anlage und der Mitarbeiterstab wurde 1999 von der TU Bergakademie Freiberg übernommen und die Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Dampfreformern fortgesetzt.

Der Partner S&R hat seinen Schwerpunkt seit 1995 im Wesentlichen auf die Entwicklung eines modularen Brennstoffzellen-Stacks und seiner unmittelbaren Peripherie gelegt [3]. Im Vordergrund stand das Design eines optimalen Flowfields zur Versorgung und Konditionierung der protonenleitenden Membran sowie die Auswahl geeigneter Werkstoffe. Neben diesen Fragen sind die Entwicklungsarbeiten auch auf die Steuerung der Anlagen ausgedehnt worden.

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].

Mit KET war dem Konsortium ein Anlagenbauer auf der Heizungs-, Klima- und Lüftungstechnik beigetreten.

Seit 1999 arbeitete das Firmenkonsortium gemeinsam an der Entwicklung und Erprobung einer Versuchsanlage nach der PEM-Technologie mit einem eignen Dampfreformer auf Erdgasbasis. Diese Anlage war im Jahr 2001 in den Teilbetrieb gegangen. Sie erreichte in ihrer letzten Ausbaustufe eine elektrische Leistung von ca. 4 kW. Ein Schema der Anlage ist in Bild I.-1 dargestellt. Auf der Grundlage dieses Entwicklungsstandes sollten die Forschungsaufgaben in einem mehrstufigen Arbeitsplan fortgeführt werden.

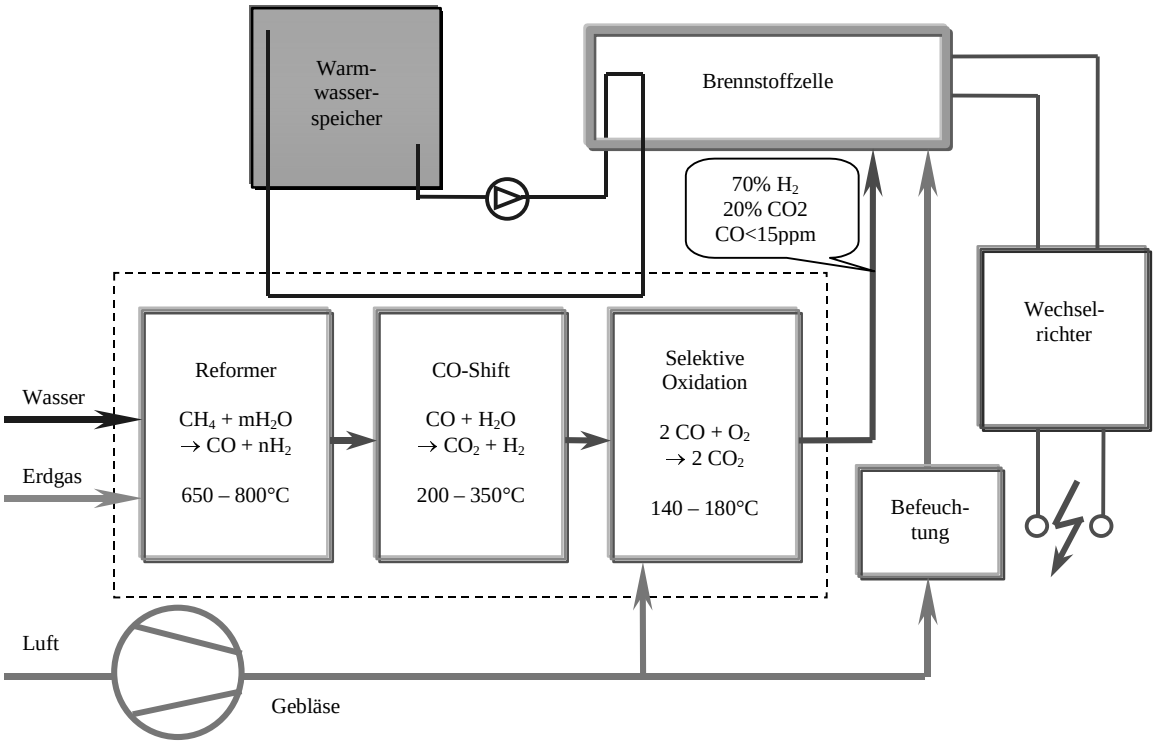


Bild I.-1 Schema eines Brennstoffzellen-BHKW – Entwicklungsstand des Konsortiums mit Beginn des Forschungsprojektes [2]

4. Planung des Vorhabens

Das Projekt wurde mit der Antragstellung in die Komplexe „Entwicklung“ und „Feldtest“ gegliedert. Beide Komplexe wurden entsprechend den langjährigen FuE-Erfahrungen der Partner gewissenhaft kalkuliert. Im Verlauf der Bearbeitung mussten die Partner aber konstatieren, dass der Teil „Entwicklung“ wesentlich mehr Zeit und Kapazitäten in Anspruch nahm als kalkuliert. Das lag nicht daran, dass die wissenschaftlich - technischen Risiken unterschätzt worden wären, sondern hatte im Wesentlichen Gründe, die in der Infrastruktur der Brennstoffzellentechnologie zu suchen sind. Ein großer Teil der benötigten Materialien und Komponenten konnte von den Anbietern nicht so geliefert werden, dass sie ohne Modifikationen und zusätzliche Entwicklungsarbeiten hätten verwendet werden können. Neue Entwicklungen wurden bekannt, deren Funktion noch nicht ausreichend gesichert war. Dies konnte zum Projektstart nicht vorausgesehen werden, denn von allen wesentlichen Lieferanten waren Angebote eingeholt worden (Basis für Kostenkalkulation). Diese waren detailliert und vermittelten den Eindruck, dass die Anbieter auch projektspezifisch und termingerecht liefern könnten.

Im Jahr 2003 schied der Partner KET Energietechnik GmbH Anlagenbau & Co. KG aus dem Konsortium aus. Die Gründe hierfür sind ausschließlich in der wirtschaftlichen Situation des Unternehmens KET begründet und wurden dem Projektträger PTJ ausführlich dargestellt. Mit dem sich ca. ab Mitte 2002 abzeichnenden „gleitenden“ Ausscheiden von KET mussten von den verbleibenden Partnern auf eigene Kosten und zu Lasten eigener Kapazitäten Arbeiten von KET übernommen werden.

Zugunsten einer vertieften Untersuchung bestimmter Komponenten (Katalysatoren, Dichtungen u.a.) sowie einer optimalen Konstruktion und Anordnung der Komponenten wurden die Arbeiten zu den Leistungsstufen 8 und 12 kW zurück-gestellt. Für die Leistungsstufe 4 kW wurde ein zusätzlicher Entwicklungsschritt eingeschoben. Das sich daraus ergebende Arbeitsprogramm ist in der Tabelle I.-1. dargestellt.

AE-Nr.	Bezeichnung der Arbeitsetappe
1000	1-kW-Versuchsanlage, Technologiepark Wuhlheide, Berlin
A1000	Katalysator-Screening-Untersuchungen
2000	4-kW-Versuchsanlage, TGZ Riesa-Großenhain, Glaubitz
2500	4-kW-Feldtestanlage, Stadtwerke Riesa
3000	4-kW-Versuchsanlage, Technologiepark Wuhlheide, Berlin
3500	4-KW-Feldtestanlage, Stadtwerke Chemnitz
5000	Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle I.-1 Liste der Hauptarbeitsetappen

Im Ergebnis dieser Abweichungen ergab sich für zwei der Partner (S&R, DBI GUT) die Notwendigkeit eines Aufstockungsantrages. Damit sowie mit einer Terminverlängerung im Rahmen der Laufzeit des ZIP-Programms war die Erreichung des Projektziels gesichert worden. Die im ursprünglichen Zuwendungsbescheid fixierte Höchstsumme für den Verbund wurde trotz der Aufstockungsanträge unterschritten.

5. Ablauf des Vorhabens

Im Folgenden werden der Ablauf und die Besonderheiten der einzelnen Arbeitsetappen in chronologischer Reihenfolge für alle Projektpartner dargestellt. Die ausführliche Beschreibung der Ergebnisse des jeweiligen Zuwendungsempfängers sind dem Abschnitt II vorbehalten.

- 1 kW Versuchsanlage, Technologiepark Wuhlheide, Berlin (S&R)

  Die Anlage wurde aufgebaut und im IV. Quartal 2001 in den Dauerbetrieb übernommen. Sie diente während der gesamten Projektlaufzeit dem Test von Stackkomponenten (Stackmodule bis 1 kW). Schwerpunkte waren die Untersuchung von Flowfields aus eigener Entwicklung, MEA-Konfigurationen unterschiedlicher Hersteller sowie Dichtungskonzepte und -materialien. Während des II. Quartals 2003 fand ein Schwefeldurchbruch statt. Dies zog die Erneuerung des Reformerkatalysators nach sich. Die Reparatur wurde genutzt, um einige neuere

Erkenntnisse umzusetzen. Der Versuchstand wurde Anfang des IV. Quartal 2003 nach einem umfangreichen Performancetest wieder in Betrieb genommen. Später musste der Reformer wegen mangelnder CO-Stabilität ganz abgeschaltet werden. Der Betrieb erfolgte danach nur noch mit synthetischem Reformat und Wasserstoff.

- Katalysator-Screening-Untersuchungen (TUBA)

  Der an der TUBA vorhandene Versuchsstand wurde für den Test von Reformerkatalysatoren, die auf dem Markt verfügbaren waren, ausgebaut. Auf dem Versuchsstand wurden zur Ermittlung der Umsatzeffektivität Katalysatormodule verschiedener Hersteller im Kurz- und Langzeitbetrieb vermessen. Die Ergebnisse gingen in die Auslegung des Erdgasdampfreformers ein. Der Versuchsstand wurde ab dem I. Quartal 2002 bis zum IV. Quartal 2003 betrieben.

- 4-kW-Versuchsanlage, TGZ Riesa-Großenhain, Glaubitz
  (S&R, TUBA, DBI, KET)

  Mit Beginn des Forschungsprojektes wurde von allen Partnern eine Typenkonzeption für eine 4 kW Anlage erstellt. Das Konzept sah eine modulare Bauweise vor, sodass die vorgesehene Typenreihe bis 12 kW möglich war. Je nach Verantwortlichkeit erfolgte eine Auslegung, der Bau und die Erprobung von Einzelkomponenten. Aufgrund der Versuchsergebnisse fand im 2. Halbjahr 2002 eine Überarbeitung der Baugruppen sowie die Optimierung von Anordnung und Verbindungstechnik statt. Die Anlage wurde entsprechend aufgebaut und 05/2003 nach der Funktionsprobe aller Komponenten im TGZ Glaubitz in den Dauerbetrieb übernommen. Die danach durchgeführten Versuche dienten vor allem dazu, das Zusammenwirken aller Komponenten sowie das dynamische Verhalten der Anlage zu testen.

- 4-kW-Feldtestanlage, Stadtwertke Riesa (S&R, TUBA, DBI)

  Aus den Erkenntnissen, die an der Versuchsanlage im TGZ gewonnen werden konnten wurde ein verbessertes Konzept entworfen. Baugruppen, deren Langzeitstabilität oder volle Funktionsfähigkeit nicht nachgewiesen werden konnten, wurden überarbeitet. Es fand eine räumliche Verdichtung der Anlage statt. Damit verbunden war eine Analyse der Fertigungsmöglichkeiten für eine spätere Serienproduktion. Das neue Konzept wurde im 2. Halbjahr 2003 umgesetzt. Als

Partner für den Betrieb der Feldtestanlage konnten die Stadtwerke Riesa gewonnen werden. Standort ist das Heizkraftwerk Weida. Im Dezember 2003 wurde die Anlage installiert und ging zum Jahreswechsel in Betrieb. Seit dieser Zeit lief die Anlage mit kleinen Unterbrechungen durch. Das Monitoring wurde bis zur Berichtserstellung und wird darüber hinaus weitergeführt.

- 4-kW-Versuchsanlage, Technologiepark Wuhlheide, Berlin (S&R, TUBA, DBI)

  Mit dieser Versuchsanlage wurden alle Erkenntnisse, die sich aus dem Betrieb der beiden vorangegangenen Anlagen ergaben, umgesetzt. Wesentliche Neuerungen waren der Einsatz einer Kondensatrückführung zur Senkung des DI-Wasserverbrauches, eine Erweiterung des Regelbereiches auf 1:4 für die Wasserstofferzeugung, der Einsatz und die Erprobung neuer Membranen für den Brennstoffzellenstack sowie eine weitere Verringerung des Anlagenvolumens. Durch eine Verringerung der Anlauf- und Lastwechselzeiten ergaben sich deutlich verbesserte Reaktionszeiten des Gesamtsystems. Mit dem Bau der Anlage wurde noch das 2-teilige-Konzept (Reformermodul und Brennstoffzellenmodul) verfolgt. Beide Module können auch getrennt betrieben werden. Die Inbetriebnahme der Anlage fand 04/2004 statt. Die Monitoringphase dauert gegenwärtig noch an, dennoch sind wesentliche Ergebnisse in diesem Bericht aufgenommen worden.

- 4-KW-Feldtestanlage, Stadtwerke Chemnitz (DBI)

  Während der Laufzeit des Projektes ist der Standort der Feldtestanlage gemeinsam mit den Stadtwerken Chemnitz ausgewählt worden. Vorgesehen ist die Versorgung des Botanischen Gartens in Chemnitz. Die Realisierung der Anlage ist für das Folgeprojekt vorgesehen. Die Feldtestanlage befindet sich gegenwärtig im Bau.

Mit dem Monitoring der in der Erprobung befindlichen Anlagen haben sich die Betriebserfahrungen der Partner zu Brennstoffzellen-BHKW deutlich erweitert. Eine Vielzahl von Erkenntnissen über das Betriebsverhalten und die Zuverlässigkeit verschiedener Komponenten unter realen Randbedingungen konnten gewonnen werden. Die Arbeiten haben aber auch neuen Forschungsbedarf aufgedeckt, der mit der Beantragung des Projektes so nicht abzusehen war (s. Abschnitt III.).

6. Literatur

[1] Grosser, K.; Heinzel, A.: Erfahrungsbericht TGZ Glaubitz; Sechstes Fachforum Einsatz von Brennstoffzellen 04./05.10.1999 Leipzig; Tagungsband, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg 1999

[2] Krause, H.; Grosser, K. Gerber, J.: Kompaktreformer für die Aufbereitung von Erdgas – Stand und Anforderungen, Tagungsband „Innovationsforum Brennstoffzellen in dezentralen Energieversorgungsanlagen“. Riesa, ZTS 2002, S. 22-25

[3] Arnold, J.: Eigenbedarfsdeckung bei Strom und Wärme durch Blockheizkraftwerke und Möglichkeiten zur Stromverbrauchssenkung, Unternehmer-Workshop; OstWestWirtschaftsAkademie (OWWA), Berlin, 9.-11. Dezember 1996

[4] EU-Projekt BU 0065/97 „Rational use of power, heat and cooling in buildings demonstrated by the Malteser hospital at Kamenz“, DBI GUT

II. Ausführliche Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse

1.1 Brennstoffzellenmodul (s&r)

Das Brennstoffzellenmodul (BZM) wandelt die chemisch gebundene Energie in Elektro- und Wärmeenergie. Dieser Kernprozess findet in dem PEM-Brennstoffzellenstack (kurz Stack) statt. Diese Energiewandlung wird über folgende Medienkreise realisiert:

- Luftkreis für die Versorgung der chemischen Reaktion mit Sauerstoff,
- Reformatkreis für die Versorgung der chemischen Reaktion mit Wasserstoff,
- Kühlkreis für die Auskopplung der entstehenden Reaktionswärme,
- Stromkreis für die Auskopplung der Elektroenergie.

Innerhalb des Projektes wurde bei der Antragstellung davon ausgegangen, dass die Zulieferer der Stackperipheriekomponenten für die einzelnen Funktionen geeignete Lösungen liefern können oder dass diese durch Anpassungen bestehender Geräte erreicht werden können. Diese Annahme stützte sich auf sehr optimistisch stimmende Angebote der Vertriebsmitarbeiter der einzelnen Fachfirmen. Die Praxis hat gezeigt, dass die meisten von den Lieferanten angebotenen Geräte den Anforderungen der Brennstoffzellentechnik nicht genügen. Deshalb wurde in dem vorliegenden Projekt erst einmal die Funktionsfähigkeit von Baugruppen realisiert und aus Zeit- und Kostengründen die Optimierung der Komponenten und Baugruppen auf das Folgethema verlagert. Nur dadurch konnten funktionsfähige Versuchsanlagen und Feldtestanlagen aufgebaut und erprobt werden.

Im Einzelnen wurden die nachfolgend beschriebenen Geräte und Baugruppen untersucht, brennstoffzellenspezifisch angepasst (oder auch verworfen) oder im Endeffekt erfolgreich erprobt.

Luftversorgung und –Konditionierung

Dem Brennstoffzellenstack wird entsprechend der erforderlichen Stöchiometrie eine konditionierte Luftmenge zugeführt, die die folgenden Forderungen erfüllen muss:

- regelbare Befeuchtung mit deionisiertem Wasser, wobei die relative Feuchte bis 100% betragen kann,
- Regelung der Luftmengenzuführung im Bereich von 30 – 100%,
- Bereitstellung eines ausreichenden Vordrucks für die Luft, um alle Anforderungen zu erfüllen wie: Stöchiometrie, Strömungsgeschwindigkeit, Ventilautorität bei Regelventilen usw.
- minimaler Energieaufwand für die Luftkonditionierung (z.B. 10% der elektrischen Stackleistung),
- minimale Kosten für die Luftkonditionierung.

Die Lösung dieser Aufgabe ist ein sehr komplexer und komplizierter Prozess. So konnten zwar am Anfang die Kosten für die Befeuchtung von 10.000 € auf 1.000,00 € gesenkt werden, gleichzeitig blieb aber der Energieaufwand im negativsten Fall bei mehr als 2 kW für die Verdampfung des DI-Wassers. Nachfolgend werden die Untersuchungsergebnisse kurz dargestellt.

(1) Die Anpassungen von Lüfter-Baugruppen nach dem Ventilatorprinzip wurden vorrangig wegen der zu niedrigen Drücke nach eingehenden Untersuchungen vorübergehend zurückgestellt. Weitergehende Untersuchungen erfolgen in einer Diplomarbeit 2005. Dieses Prinzip ist prinzipiell deshalb von besonderem Interesse, weil der Energieaufwand sehr niedrig ist.

(2) Ein Spezialsystem mit nichtmotorischem Schwingkolbenantrieb wurde als Muster aufgebaut und wegen des zu hohen Zusatzentwicklungsaufwandes zurückgestellt (siehe **Bild 1**)

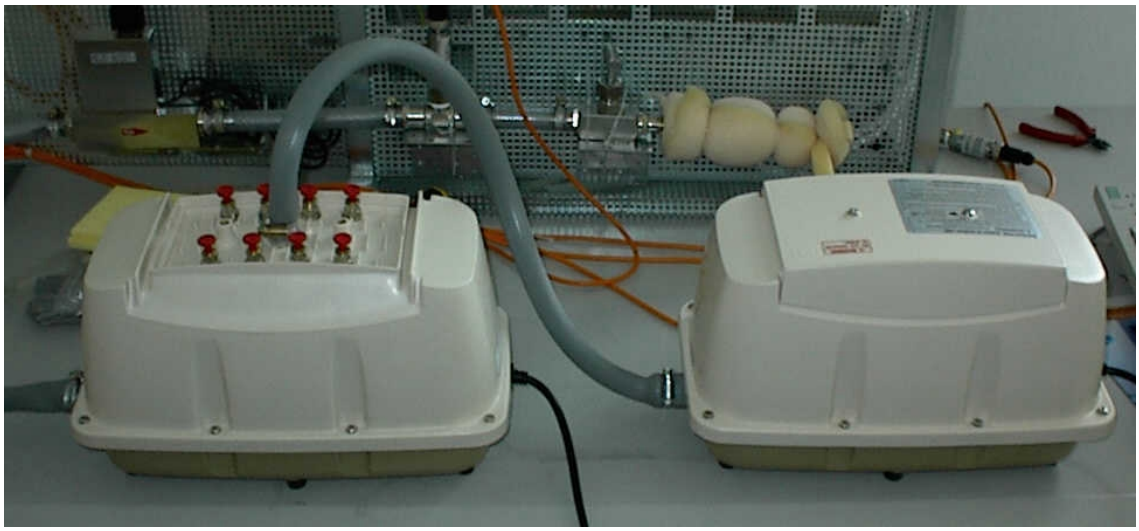


Bild 1 Luftversorgungsmodul mit Schwingkolbenantrieb

(3) Die Übernahme der Spezialentwicklung eines Rootsgebläses aus einem durch das Konsortium mit betreuten anderen Projekten wurde verworfen, weil die Schalldämmung von den Kosten und dem Volumen zu aufwendig war. Außerdem konnte im Störfall der Eintritt von Öl in den Luftkreislauf nicht ausgeschlossen werden. **Bild 2** zeigt den Versuchsaufbau mit diesem Gebläse.

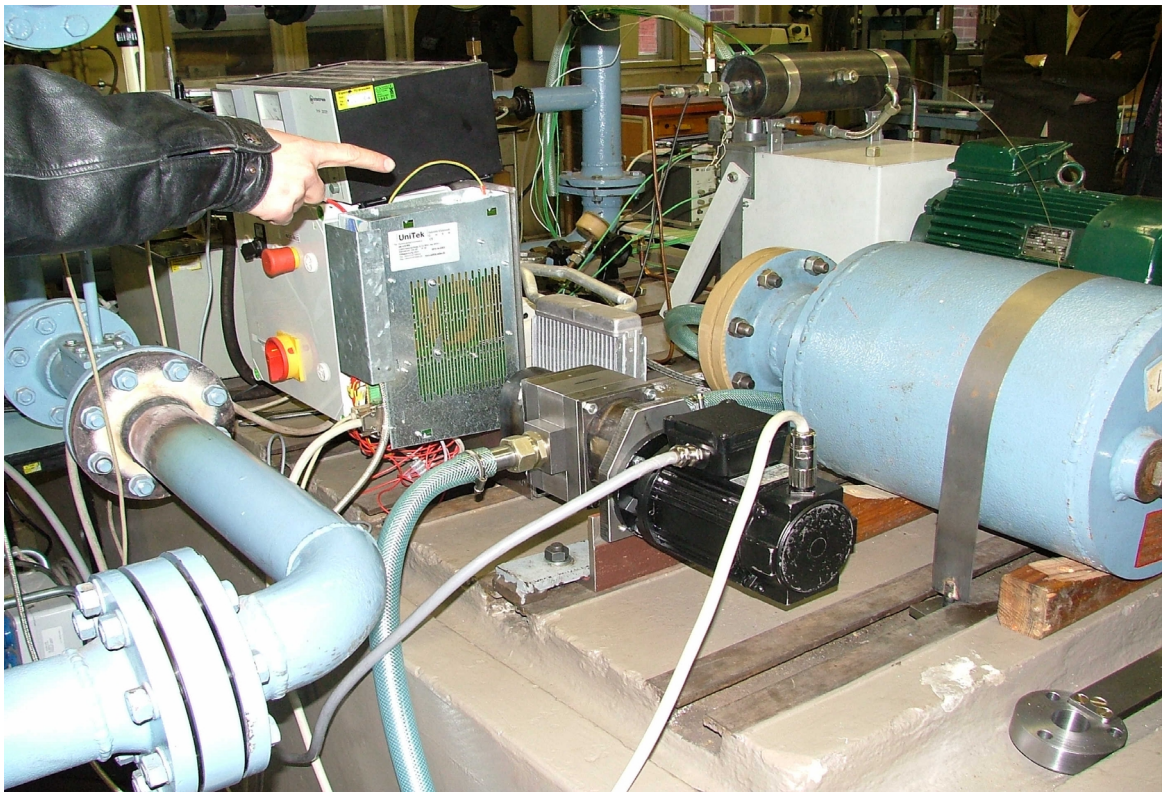


Bild 2 Versuchsaufbau mit Rootsgebläsesystem

(4) Auch die Erprobung und Vermessung von Scheibenkompressoren war für die vorliegende Aufgabe nicht erfolgreich. Das verwendete Gerät erzeugte zuviel Verlustwärme, es gab Probleme mit Kohlenstoffabrieb und die Lebensdauer der Geräte war zu niedrig.

(5) Nach umfangreichen weiteren Recherchen und Erprobungen wurde das Membrankompressorkonzept als derzeitige Vorzugsvariante ausgewählt. Bei dieser Lösung konnten mit Hilfe zusätzlicher Entwicklungen folgende Probleme vorteilhaft gelöst werden: Regelbarkeit des Luftstromes entsprechend der erforderlichen Stöchiometrie, zurzeit vorteilhaftes Preis/Leistungsverhältnis, Befeuchtung mit zusätzlichem Kapillarbefeuchter möglich, Schalldämmung günstig, geringer Eigenverbrauch, Zuverlässigkeit in einem für den gegenwärtigen Stand der Technik günstigen Bereich. Die **Bilder 3 und 4 „**Kompressormodul“ zeigen zwei Entwicklungsstände des realisierten Moduls. Nicht dargestellt ist auf diesen Bildern die Leistungselektronik und die Steuerung und Regelung. Diese ist so gestaltet, dass über einen Frequenzumrichter und ein Spezialventil der Bereich von 10% bis 100% Luftversorgung für einen 4kW-Stack realisiert werden kann, ohne dass dafür teure Maßflowcontroller benötigt werden. Dabei wurden ausgehend von den Betriebsbedingungen des s&r-Stacks „home 4000“ mit einer Stöchiometrie von 2 bis 2,5 gerechnet. Das Modul ist in der 4kW Versuchsanlage in Berlin eingebaut und in den Kundenanlagen ab „inhouse 4000“ Version Chemnitz. Im Folgethema wird diese Entwicklung weitergeführt, um insbesondere die Kosten und den Eigenverbrauch weiter zu senken. Außerdem werden die Untersuchungen zu Spezialventilatoren wieder aufgenommen.

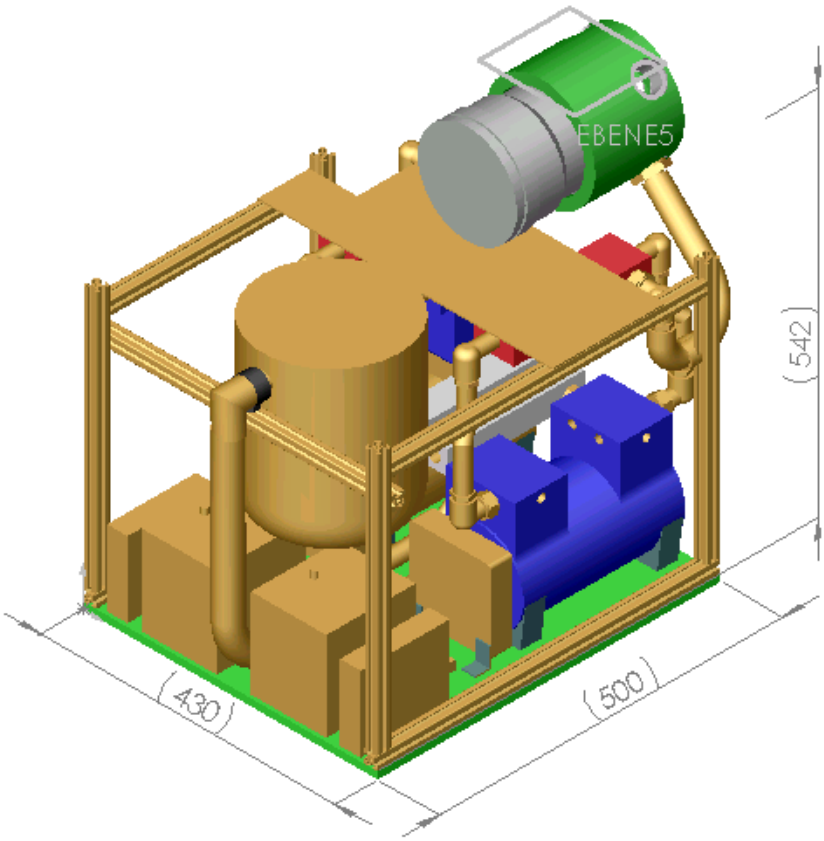


Bild 3 Kompressormodul s&r Version 1 Stand Februar 2004

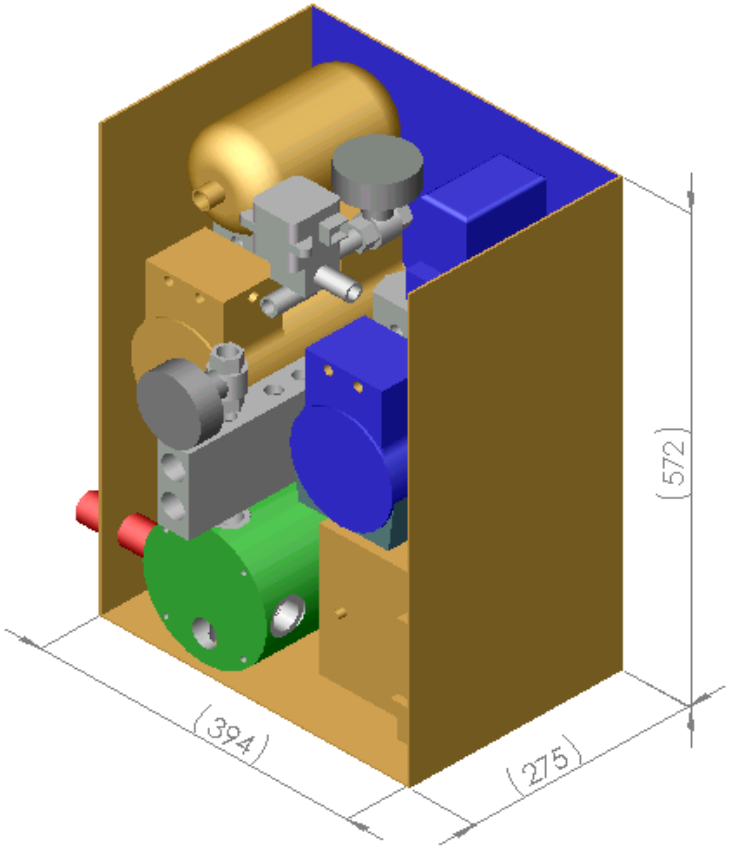


Bild 4 Kompressormodul s&r Version 2 Stand September 2004

(6) Die Konditionierung der Luft (Befeuchtung und Vorwärmung) erfolgt über einen Mikrohohlfasermembranbefeuchter. Dazu gibt es zwei Vorzugsvarianten:

- die Entwicklung eines sehr preiswerten Membranbefeuchters, die mit einer deutschen Firma läuft, wobei verschiedene preiswerte Hohlfasermaterialien getestet werden. Diese Entwicklung ist technologisch noch instabil und wird weitergeführt. Ein Muster zeigt **Bild 5** Membranbefeuchter s&r_1. Der wesentliche Vorteil dieses Befeuchters besteht darin, dass er auf einer sehr kostengünstigen Herstellungstechnologie basiert und deshalb preisgünstig realisiert werden kann.

Bild 5 Membranbefeuchter s&r_1

- die Entwicklung in Kooperation mit einer auf Nafion spezialisierten Firma aus den USA. Diese Entwicklung funktioniert nach der gemeinsamen Analyse und der Beseitigung von speziellen Mängeln zurzeit relativ gut und wird nach eingehenden Messungen in den neuen Anlagen eingesetzt. Das betrifft die Versuchsanlagen bei s&r und die Anlagen ab „inhouse 4000“ Version Chemnitz. Der Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass es sich bei den Hohlfasern um das gut erforschte Nafion handelt und damit die Verarbeitung und Nutzung auf ein breites Know-how zurückgreifen kann. Der Nachteil liegt in dem relativ hohen Preis.
- Vor der Wahl der Membranbefeuchtung wurden zuerst durch s&r und danach durch die TUBA verschiedene Befeuchter nach dem Sprühprinzip entwickelt, aufgebaut und vermessen. Eine Darstellung zeigt **Bild 6**. Diese Lösungen wurden bis zur Feldtestanlage „inhouse 4000“ Version Riesa eingesetzt. Die Nachteile dieser Geräte sind der hohe Energieeigenverbrauch und ein zu hohes Volumen und Gewicht. Deshalb wird diese Entwicklung nicht weitergeführt. In der Übergangsphase hat sie aber sehr gute Dienste geleistet, weil sie viel kostengünstiger war als am Markt erhältliche Varianten und weil sie im Projekt bis zur Realisierung der Membranbefeuchter die beste Lösung für den Betrieb der Versuchs- und Feldtestanlagen war. Dabei soll nicht verhehlt werden, dass es bei der Membranbefeuchterentwicklung umfangreiche Probleme und zeitliche Verzögerungen gab.

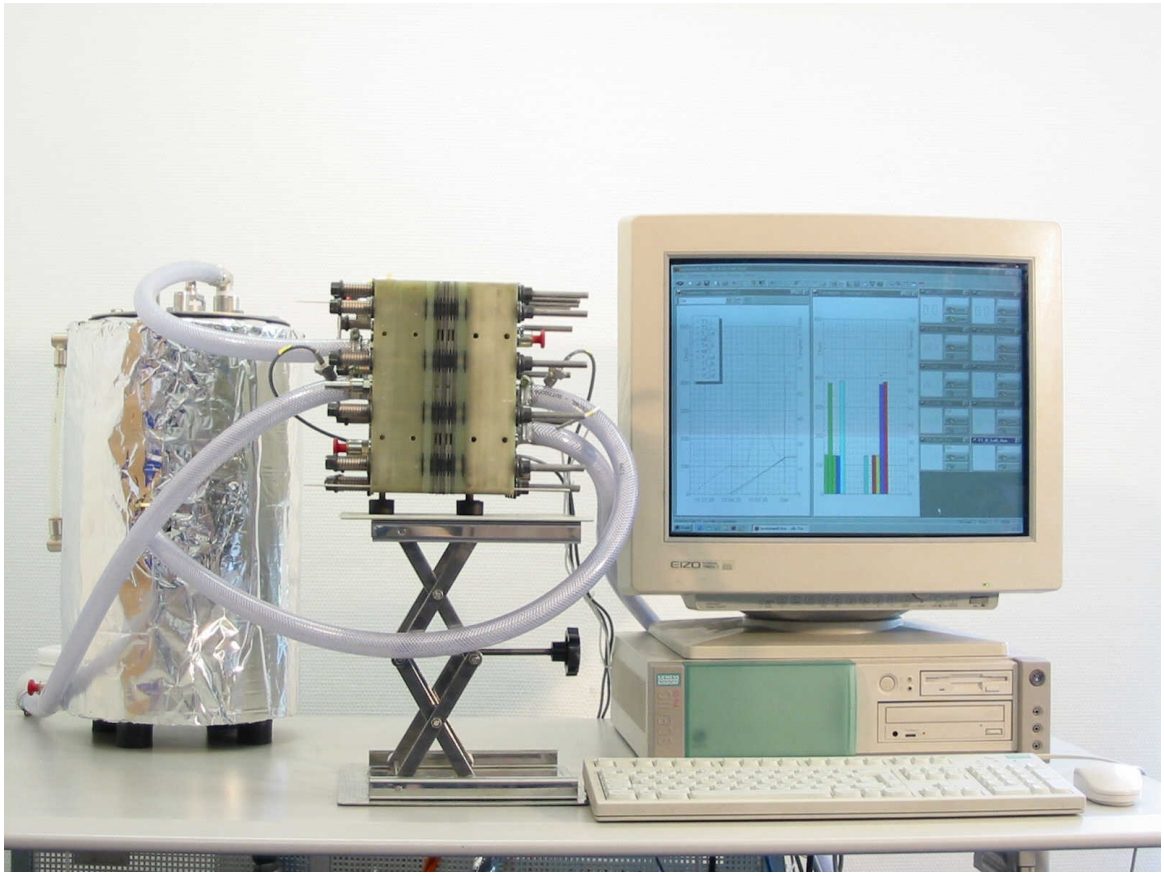


Bild 6 Versuchsaufbau Sprühbefeuchter

Die Hauptprobleme waren:

- die Auswahl von preiswerten Materialien, die als Hohlfasern verfügbar sind, eine günstige Übertragungskennlinie für die Gasbefeuchtung aufweisen und langzeitstabil sind;
- die Fasern müssen an den Enden so vergossen und geschnitten werden, dass sie im geforderten Temperaturbereich zuverlässig funktionieren;
- die Faserbündel verändern in Abhängigkeit von der Feuchte und Temperatur ihre Länge, das darf zu keinen Spannungen oder Zerstörungen führen;
- im DI-Wasser-Medium lagern sich bevorzugt spezielle Bakterien an, die durch ihre Vermehrung die Funktion beeinträchtigen;
- die Eigenisolation über das Gehäuse sollte möglichst groß sein;
- die Faserbündel dürfen nicht austrocknen;
- der Preis muss unter 200,00 € liegen.

Die Probleme konnten bisher noch nicht alle gelöst werden. Nach gegenwärtigem Stand liegt eine funktionsfähige Lösung mit Nafionbefeuchtern für ca. 1.500,00 € bei 4kW vor.

Die Verschaltung des Luftversorgungsmoduls mit dem Mikrohohlfasermembranbefeuchter wurde als Patent angemeldet. Der Hauptvorteil der gewählten Lösung besteht darin, dass die Enthalpie der Abluft, die normalerweise verloren geht, aus dem Stack zur Vorerwärmung der Zuluft zurückgewonnen wird und damit praktisch keine Hilfsenergie verbraucht wird, sondern dem System Verlustenergie zusätzlich zugeführt wird. Damit ist diese Lösung energetisch optimal [P2].

Reformatkreis

Das Reformat wird befeuchtet und vom Reformer direkt dem Stack über die entsprechenden isolierten Verbindungen zugeführt. Vom Stackausgang erfolgt die Rückführung zur Nachverbrennung im Reformer. Die Stöchiometrie und Befeuchtung wird von der MSR-Technik auf der Reformerseite gemessen und geregelt. Die technologische Verschaltung ist aus der Darstellung der Gesamtanlage in **Bild 7** ersichtlich.

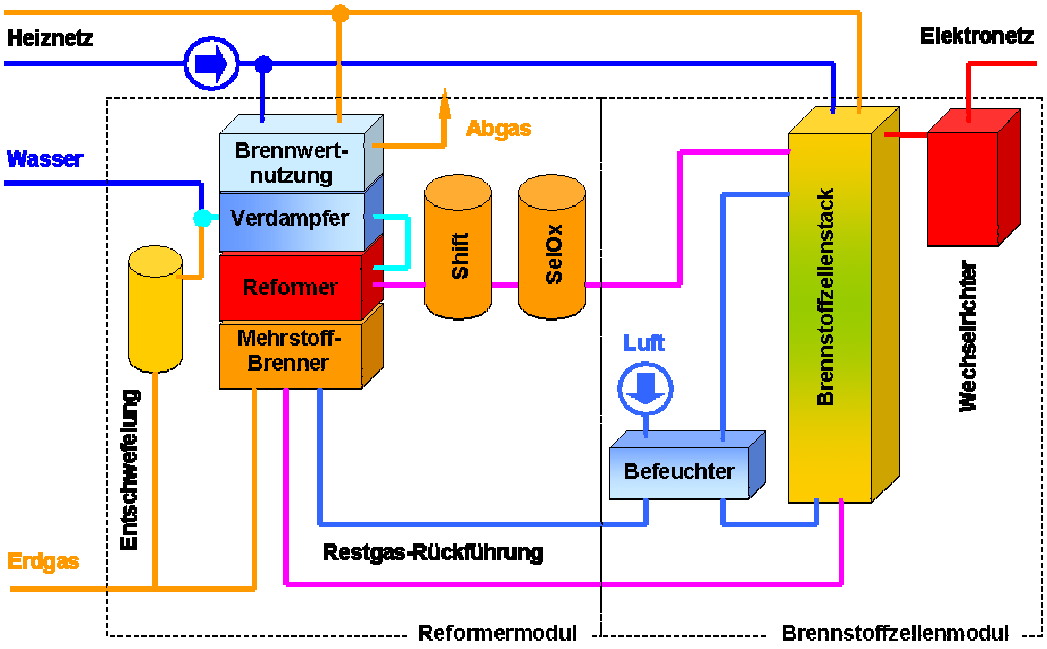


Bild 7 Gesamtanlage

Kühlkreis

Über den Kühlkreis wird in der vorliegenden Anwendung die entstehende Abwärme über DI-Wasser abgeführt. Die Entwicklungsproblematik besteht darin, dass es keine geeigneten Sensoren und Aktoren für DI-Wasser in unserem Leistungsbereich gibt. Darüber hinaus besteht das Problem der kostengünstigen Erzeugung des DI-Wassers. Wie auch beim Luftkreis wurden zwei Wege parallel beschritten. Zum einen wurde für die Versuchs- und Feldtestanlagen eine nichtoptimale Lösung entwickelt, die funktionssicher ist. Die einzelnen Geräte (Pumpen, Ventile usw.) sind aber noch zu teuer, verbrauchen zuviel Hilfsenergie oder sind zu groß. Zum anderen wurden umfangreiche Entwicklungsarbeiten durchgeführt, um mit Kooperationspartnern und durch die Systemauslegung in der weiteren Entwicklung bis 2005 eine Optimalvariante zu realisieren. Verfahrenstechnisch beinhaltet das Problem preiswerte DI-Wasser-resistente Wärmetauscher, Pumpen, Sensoren und Aktoren. Weil Edelstahl zu schwer und zu teuer ist, kommen hier für die Optimierung vielfach nur Spezialmaterialien und Konstruktionen auf Kunststoffbasis in Frage. Die Optimierung dieser Komponenten ist Bestanteil der Folgeentwicklung bis 2005. Als weiterer Nachteil der im Projekt realisierten „Zwischenlösungen“ hat sich beim Feldeinsatz die Abhängigkeit vom jeweiligen Wassernetz herausgestellt. Dadurch werden alle Störungen und Probleme aus dem Wassernetz auf die Brennstoffzelle übertragen. Das sind zum Beispiel Druckschwankungen, Kurzzeitabschaltungen, Fremdstoffe usw. Für das Folgethema wurde deshalb ein Konzept erarbeitet, bei dem der Wasserkreislauf in der Anlage geschlossen wird und nur für die Nachspeisung oder Reinigungsprozesse geöffnet wird.

Stromkreis

Die Elektroenergie wird über Stromabnehmerplatten als Gleichstrom ausgekoppelt. Durch die aggressive Atmosphäre im Stack unterliegen die Materialien höchster Beanspruchung. Diese führt zur Passivierung und Zersetzung der Materialien und letztlich zur Zerstörung der Brennstoffzelle. Um

hier eine akzeptable Lösung zu erreichen wurden u.a. folgende Varianten untersucht:

- Kohlenstoffplatten
- Titanplatten
- Spezialedelstahlplatten
- Messingplatten
- Aluminiumplatten

Kohlenstoffplatten brechen bei starken Beanspruchungen an den Anschlüssen leicht ab und sind relativ teuer.

Zum Schutz der Oberfläche gegen Korrosion und Passivierung müssen bei den anderen Platten die Oberflächen dieser Platten besonders vergütet oder gestaltet werden. Untersucht wurden verschiedene Varianten von Vergolden, Nickelbeschichtung, kombinierte Beschichtungen und spezielle Oberflächegestaltungen. Ein Problem dieser Untersuchungen ist, dass viele Effekte erst nach Langzeiterprobungen auftreten**. Bild 8** Stromabnehmerplatte 2 zeigt das Bild einer geschliffenen und vergoldeten Edelstahlplatte nach einer Betriebsdauer von ca. 3000 Stunden. Deutlich erkennbar sind die Korrosionserscheinungen im unteren Teil der Platte.

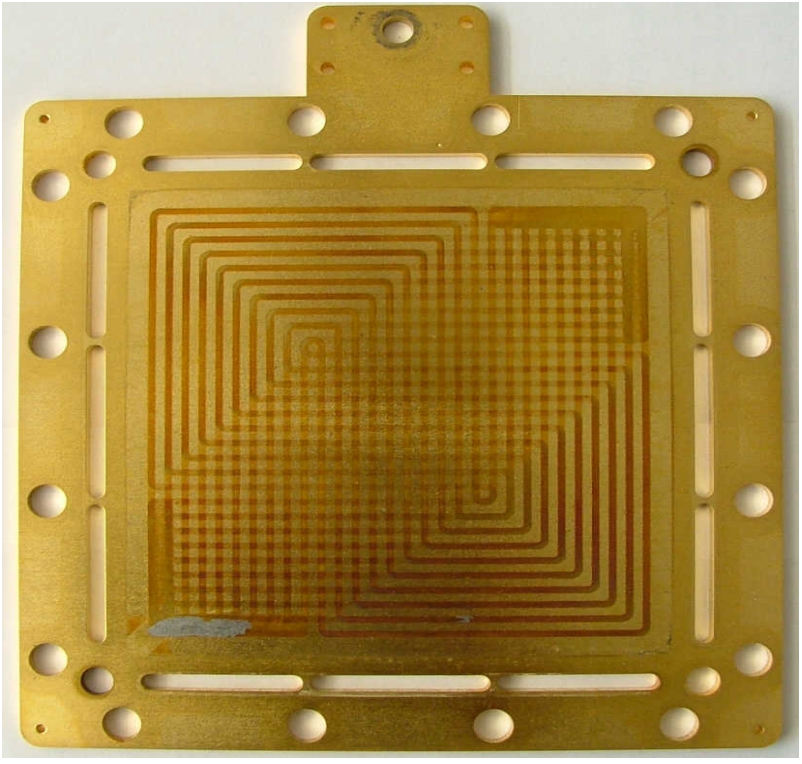


Bild 8 Korrodierte Stromabnehmerplatte

Im Ergebnis aller Versuche wurde eine spezielle Technologie für schwach vergoldete Edelstahlplatten erarbeitet, die in den bestehenden Anlagen eingesetzt wird. Wegen der langfristig unbefriedigenden Werte für Preis, Gewicht und technologische Stabilität wurde darüber hinaus ein neues innovatives konstruktives Konzept erarbeitet, mit dem die bestehenden Nachteile optimal beseitigt werden. Diese Lösung wurde zum Patent angemeldet und wird innerhalb des Folgethemas weiterentwickelt, erprobt und fertigungstechnisch optimiert [P3]. Weil es viele Verbraucher gibt, die mit Gleichstrom arbeiten, wurde der Gleichstromausgang des Stacks als Geräteschnittelle festgelegt.

PEM-Brennstoffzellenstack

Kernstück des Brennstoffzellenmoduls ist der Stack. In den ersten Jahren der Stackentwicklung ging es bei allen Institutionen und Firmen, die auf diesem Gebiet arbeiten im Wesentlichen darum, einen stabilen Betrieb zu erreichen. Viele Anlagen und Stacks, bei denen die unzulässig absinkende Einzelzellspannung bei einer oder mehreren Zellen zum Abschalten oder sogar zum Ausfall führten sind ein deutliches Zeugnis dafür, wie viele Probleme es schon bereitet, einen im Niederdruckbereich stabil laufenden Stack zu konstruieren. Durch eine Vielzahl von Verbesserungen insbesondere beim Feuchtemanagement werden diese Probleme heute von den kompetenten PEM-Stackherstellern beherrscht. In der Zeit des vorliegenden Projektes ging es vorrangig darum, die Stacks durch weitere Innovationen in folgenden Punkten zu verbessern:

- Leistung pro Flächeneinheit
- Lebensdauer
- CO-Verträglichkeit
- Zuverlässigkeit
- minimale Sauerstoff-Stöchiometrie
- minimale Wasserstoff-Stöchiometrie
- Druckabfall
- Dynamik

- Minimale Befeuchtung bezogen auf die abgegebene Leistung
- Minimale Verluste
- Preis/Leistungsverhältnis

Bei s&r wurden diesbezüglich im Projekt insbesondere folgende Ergebnisse erzielt:

- Die Leistungsdichte liegt bei den Werten fortgeschrittener Hersteller.
- Die Lebensdauer konnte von 5000h bei optimalen Betriebsbedingungen auf ca. 10.000h erhöht werden. Die Werte über 5.000 h wurden allerdings nicht messtechnisch nachgewiesen, sondern durch die Extrapolation verschiedener Versuchsergebnisse und Messungen bei den Komponentenlieferanten und bei s&r ermittelt. Das Nachweisproblem besteht darin, dass die Elemente ständig verbessert werden, man aber die Prüfmuster nicht ständig verändern kann. Das heißt, entweder untersucht man einen bestimmten Entwicklungsstand und erreicht die gewünschte hohe Prüfstundenzahl mit veralteten Komponenten, oder man verändert den Prüfling mit dem technischen Fortschritt und kommt damit nur zu einem Stützwert für Extrapolationen. Für die praktische Arbeit ist nur die zweite Variante sinnvoll. Die oben genannten Lebensdauerwerte beziehen sich auf quasi CO-freien Betrieb.
- Für die CO-Verträglichkeit wurden umfangreiche Messungen beim MEA-Hersteller und bei s&r durchgeführt. **Bild 9** Kennlinie 58-Zeller zeigt exemplarisch wichtig Ergebnisse. Die detaillierten Ergebnisse sind in den s&r-internen Messberichten enthalten.

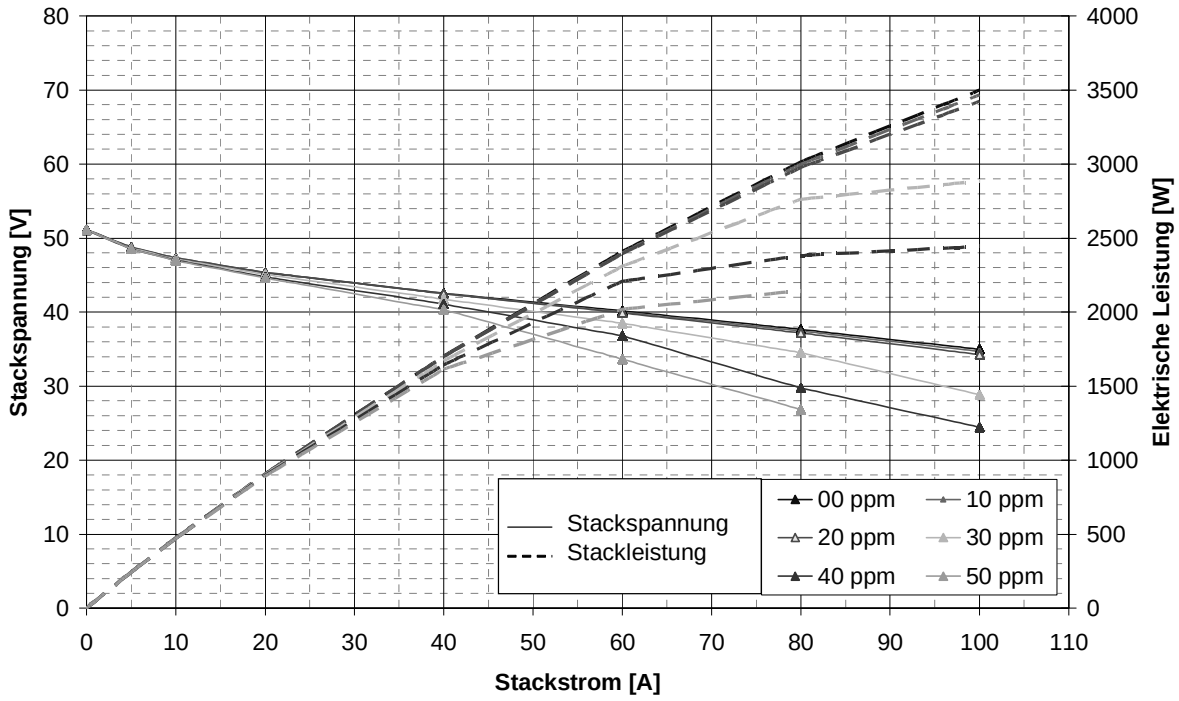


Bild 9 Abhängigkeit von Stackspannung und -leistung vom CO-Gehalt des Reformatgasstroms (58-Zellenstack bei 70°C, Betrieb mit syntetischem Reformat 70% H_2 und Luft)

- Die Zuverlässigkeit der Prozessführung konnte insbesondere durch folgende Maßnahmen deutlich verbessert werden: Verbesserung des Wassermanagements, Änderung der Gasdiffusionsschicht von Gewebe auf Filzmaterial, Nutzung von 7-Lagen-MEAs, weitere Vervollkommnung der Regelung und Prozessführung. Darüber hinaus wurde der Herstellungs- und Prüfprozess weiter optimiert. Dazu gehören die automatisierte reproduzierbare Dichtemessung der Stacks, spezielle Werkzeugkombinationen, technologische Vorschriften für die Verpressung der Stacks und eine weiterentwickelte Endprüfung und Vermessung der Stacks.

Wechselrichter

Der Wechselrichter wird bei der Anlageninstallation außen installiert, weil eine Reihe von Anwendern Gleichstrom benötigen (zum Beispiel Telekom). Die Wechselrichterentwicklung, für die ursprünglich die Firma KET verantwortlich war und die bisher auf eine Entwicklung beim ILK-Dresden ausgerichtet war,

hat in dem Projekt nicht die erwarteten Ergebnisse gebracht. Auch die anschließend mit der Firma SMA angestrebten Lösungen konnten das Gesamtproblem nicht lösen. Die Ursachen liegen in der Gesetzgebung für Elektronetze (ENS), dem Preis, dem Volumen und den geforderten Entwicklungskosten begründet. Für die Anlage in Riesa wurde der ILK-Wechselrichter eingesetzt und eine ENS-Freigabe beim Betreiber beantragt, um den Dauerbetrieb zu sichern. Bei den Versuchsanlagen wird mit elektronischen Lasten mit Netzrückspeisung gearbeitet. Hier treten die ENS-Probleme kaum auf. Für die Weiterentwicklung wurde im Nachfolgethema ein sehr viel versprechender Partner gefunden, dessen Kosten und Zielpreise deutlich besser sind, als bei den anderen Varianten. Außerdem sollen die gültigen Normen für die Netzanschaltung 2005 überarbeitet werden. Die Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten dazu laufen im Folgethema.

1.2 MSR-Technik

Die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik für die Prozesssteuerung bei der Gasaufbereitung im Reformer und die Energiewandlung im Brennstoffzellenmodul wurde bezüglich der Steuerung und Regelung mit der SAIA-SPS realisiert. Diese Auswahl wurde getroffen, weil

- die standardisierte Programmiersoftware die Benutzung des Systems durch verschiedene Projektmitarbeiter vereinfacht,
- die Hardware dieser SPS am preiswertesten ist,
- eine sehr gute Modularität der Hardware eine kostenoptimale Problemanpassung ermöglicht.

Zu Beginn des Projektes bestand die Ausführung vergleichbarer Anlagen (Ulm, Glaubitz) bezüglich der MSR-Technik aus mehreren Schaltfeldern für die Steuerung mit Siemens-SPS und zusätzlicher Messung der Einzelzellspannungen durch individuelle Systeme. Durch den Einsatz der SAIA-SPS- konnten hier die Hardwarepreise deutlich gesenkt werden. Die Realisierung der Steuerung über zwei autonome Schaltfelder mit SPS wurde anfänglich beibehalten (Anlage Glaubitz). In einer zweiten Etappe wurden

zwar zur Sicherung der selbständigen Erprobung die zwei Schaltfelder Steuerung beibehalten, aber durch entsprechende Optimierungen wurden nur für die Erprobung zwei SPS eingesetzt, die in der Komplettanlage durch umstecken auf eine Steuerung abgespeckt wurden.

Bild 10 zeigt die Anlage mit zwei SPS-Schaltfeldern.

Bild 10 Anlage mit 2 Schaltfeldern

Im Folgethema wird die MSR-Technik auf einen kleinen Steuerkasten verdichtet, wobei die Funktionalität noch wesentlich um einen integrierten Industrie-PC erweitert wird. In diesem Industrie-PC läuft das s&r-Messprogramm „FuellCell“ [P10].

In die Software wurden entwicklungsbegleitend alle Erkenntnisse eingearbeitet, die sich aus der Herstellung, Inbetriebnahme und dem Betrieb der Versuchs- und Feldtestanlagen ergeben haben. Dazu gehören auch die Änderungen, die sich aus der CE-Überprüfung der Feldtest-Anlage in Riesa ergeben haben [P13]. Weil die Temperaturmessungen im Reformer mit Thermoelementen durchgeführt werden, wurde in Zusammenarbeit mit Saia eine geeignete Analogeingabebaugruppe entwickelt und erprobt. Diese Baugruppe kommt in den Anlagen ab „inhouse 4000“ Version Chemnitz zum Einsatz. Ausgehend von den Erfahrungen mit der Riesaer Feldtestanlage sowie den Forderungen der Gutachter wurden neue Algorithmen für die automatischen An-, Abfahr- und Fehlerbehandlungsroutinen entwickelt.

Zur Überwachung und Messung der Einzelzellspannungen wurden spezielle Multiplexer entwickelt, die jeweils 48 Eingänge haben. Das heißt, dass für den 4kW Stack zwei Module erforderlich sind. Die Ausgänge dieser MUX-Module werden auf die SPS gelegt, dort verarbeitet und mit dem Progamm „FuelCell“

dargestellt und abgespeichert. Mit dieser Lösung konnten die Kosten gegenüber lieferbaren Einzelzellspannungsmodulen (EZM) um einige 1.000,00 € gesenkt werden. Der Anschluss an die Zellen erfolgt über vergoldete Kontaktstifte. **Bild 11** zeigt einen Typvertreter dieser Module. In einer weiteren Entwicklungsstufe werden in einem anderen Thema, basierend auf diesem Prinzip und unter Nutzung der vorliegenden Erfahrungen neue dezentrale prozessorgesteuerte EZM-Module mit der Uni in Magdeburg als Kooperationspartner entwickelt. Mit dieser Entwicklung ist eine weitere Kosteneinsparung und eine deutliche Volumensenkung zu erwarten.

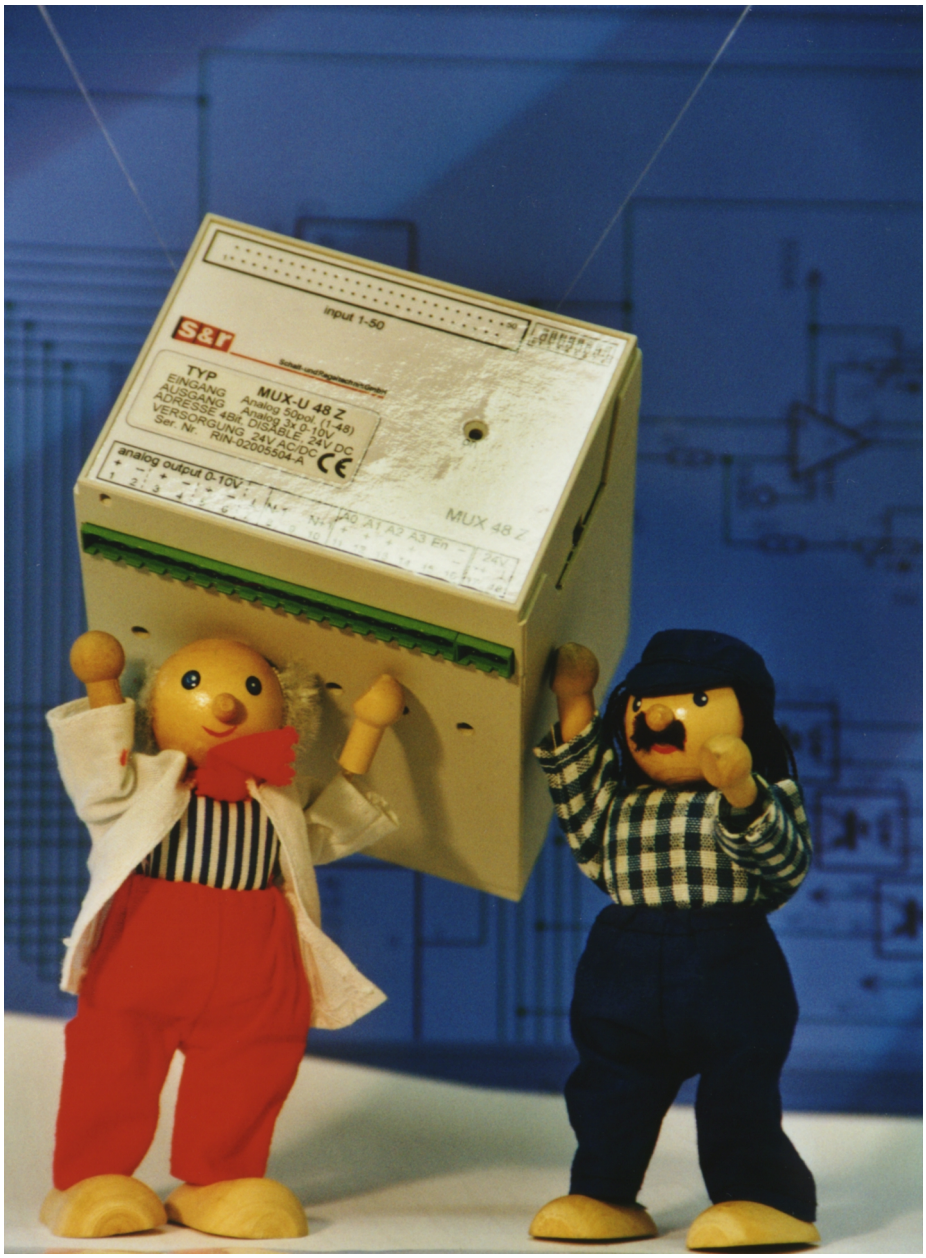


Bild 11 EZM-Modul

1.3 GLT-Rechner

Prinzipiell sind viele Messwerterfassungssyteme und Leitsysteme für die Prozessüberwachung und –steuerung am Markt verfügbar. Die Hauptnachteile bei der Übernahme solcher Systeme sind

- relativ hohe Lizenzkosten,

- die restriktiven Lizenzbedingungen (Verdonglung),

- die ständige Abhängigkeit vom Lieferanten,

- die sehr begrenzten eigenen Gestaltungsmöglichkeiten,

- die Abhängigkeit von den Vorgaben des Lizenzgebers bezüglich Hardware und Betriebssystem,

- die Geschlossenheit der Systeme.

Vorteilhaft sind die eingesparten Entwicklungskosten.

Beim Abwägen der Vor- und Nachteile hat sich ergeben, dass die Entwicklung einer eigenen Lösung eindeutig günstiger ist, weil das eigene System ständig an die Entwicklung angepasst werden kann und weil die Lieferanten zu restriktiv, zu teuer und nicht innovativ genug sind, um die bestehenden Anforderungen zu erfüllen. Das Ergebnis der Eigenentwicklung ist das System „FuelCell“ von s&r, das bei allen Anlagen erfolgreich eingesetzt wurde. Mit diesem System war es auch möglich die Anlage in Riesa relativ problemlos auf die bestehende Leitwarte über OPC-Server aufzuschalten und damit die Überwachung der Feldtestanlage im laufenden Betriebsregime zu gewährleisten. Das System FuelCell ist in der gleichnamigen s&r-Systembeschreibung detailliert dokumentiert [P10].

1.4 Ergebnisse der Versuchs- und Feldtestanlagen

1.4.1 1kW-Versuchsanlage

Bild 12 zeigt die Außenansicht der 1kW Versuchsanlage in Berlin.

Weil das Gelände des IPW-Wuhlheide nur einen Erdgasanschluss für das zentrale BHKW hat, das die gesamte Versorgung des Geländes mit Wärme und Strom übernimmt, musste eine Stichleitung vom BHKW zum Container mit eigenem GASAG-Gasanschluss gelegt werden.

Bild 12 Containeranlage 1kW

Diese Anlage dient im Wesentlichen der Stack- und Brennstoffzellenmodulentwicklung. Sie ist so ausgelegt, dass Short-Stacks (ab 4 bis 5 Zellen) bis 1kW-Stacks nach vorgegebenen Versuchsprogrammen automatisch getestet werden können. Zur Anlage gehört eine Fernbedienung mit Messwertübernahme. Die Anlage ist nach der Beseitigung von Frühausfällen zuverlässig im Dauerbetrieb gelaufen und hatte zum Themenabschluss eine Betriebszeit von ca. 12.000h absolviert. Im Gegensatz zu käuflichen Versuchsanlagen zeichnet sich die Anlage nicht nur durch einen günstigen Preis aus, sondern auch dadurch, dass in der Anlage - außer dem Stack - weitere Komponenten für die Feldtestanlagen getestet wurden. Anfänglich wurde die Anlage wahlweise mit einem 1kW-Steamreformer, synthetischem Gas oder Wasserstoff betrieben. Nach dem Ausfall des Reformers wurde die Anlage provisorisch so umgebaut, dass auch übergangsweise 4kW-Stacks und Komponenten getestet werden konnten. In der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an die jeweiligen Messaufgaben und den Erkenntnisfortschritt ist die Anlage unschlagbar.

Dieser Vorteil hat allerdings dazu geführt, dass die „Schönheit“ von dem Ausgangszustand und von käuflichen Anlagen deutlich abweicht. Weil trotz umfangreicher Reparaturmaßnahmen mit dem Reformer die erforderlichen Stackeingangsparameter für das Reformat nicht mehr erreicht wurden, wird die Anlage jetzt nur noch mit synthetischem Gas betrieben. Der bei den Versuchen erzeugte Strom wird ins Netz eingespeist. Die Wärme wird über einen Außenkühler abgeführt. Dadurch besteht die Möglichkeit alle erforderlichen Versuchspläne auszuführen. Ein besonderes Problem über die gesamte Projektlaufzeit war die Feuchtemessung. Immer wieder mussten mit den Lieferanten neue Entwicklungsdurchläufe vereinbart werden, weil die Feuchtemesssensoren nicht zuverlässig funktionierten. Und immer häufiger wurde vom Hersteller versucht, die vorhandenen Sensoren als voll funktionsfähig zu deklarieren. Letztlich wurden aber doch alle Mängel beseitigt und es liegen jetzt funktionsfähige Sensoren vor, die sich auch von einer zu großen Befeuchtung wieder erholen, ohne dass sie ausgebaut werden müssen. Um eine Messwertverfälschung durch äußere Abkühlung zu vermeiden wurden von s&r spezielle selbstisolierende Kunststoffmessblöcke entwickelt. Weil die handelsüblichen Kondenswasserauslässe zu groß und schwer waren, wurden Geräte aus einer anderen Anwendung so umgebaut, dass sie als kleine und preiswerte Kondenswasserauslässe eingesetzt werden können.

Die Anlage enthält eine CO-Überwachung, Fehler- und Alarmmelderegime und automatisierte An- und Abfahrroutinen.

Bild 13 zeigt beispielhaft Messergebnisse an einem Stack an dem die Kennlinien aufgenommen wurde.

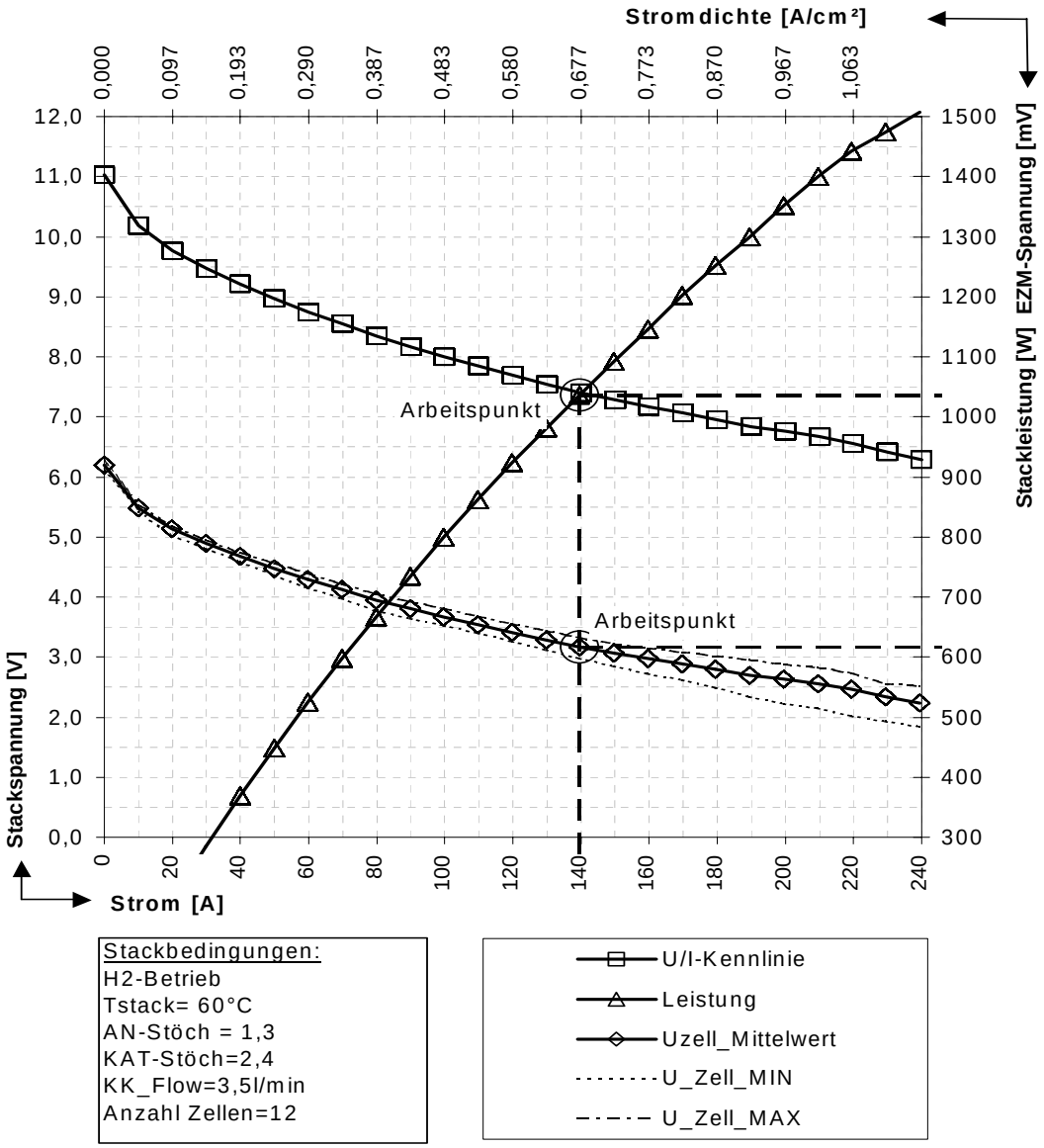


Bild 13 Stack-Kennlinien

1.4.2 4kW Brennstoffzellenversuchsstand Stackmodul

Der 4kW Versuchsstand in Berlin besteht aus einem autonomen Reformermodul für die Gasaufbereitung und dem autonomen Brennstoffzellentestmodul. Das Reformermodul wird ausführlich bei unseren Kooperationspartnern beschrieben. Das Brennstoffzellenmodul für den Versuchsstand ohne Verkleidung zeigt **Bild 14** 4kW Brennstoffzellenversuchsstand**.**

Während die meisten Hersteller von Stacks, Forschungsinstitute und auch insbesondere die Autoindustrie mit fertigen Testanlagen von spezialisierten Herstellern arbeiten, fiel im Konsortium die Endscheidung zugunsten einer Eigenentwicklung. Dadurch wurden zwar zusätzliche Entwicklungskapazitäten gebunden, aber die Vorteile und Herausforderungen waren so interessant, dass sich das Konsortium für die Eigenentwicklung entschied. Die wichtigsten Gründe für diese Entscheidung waren:

- der hohe Preis käuflicher Anlagen;
- die begrenzte Flexibilität käuflicher Anlagen;
- es war möglich, alle Eigenentwicklungen der Kundenanlagen problemlos auch in den eigenen Testanlagen zu erproben;
- die Verwendung der eigenen Reformertechnik führt zu erheblichen Betriebskosteneinsparungen und einen praxisnahen Betrieb;
- die Anlage kann jederzeit problemlos geändert werden und neuen eigenen Aufgabenstellungen angepasst werden;
- es konnten alle Wunschvorstellungen bezüglich einer optimalen Test- und Prüftechnologie verwirklicht werden.

Bild 14 Brennstoffzellenmodul für 4kW-Versuchsanlage

Gegenüber Kundenanlagen zeichnet sich die Versuchsanlage durch folgende Merkmale aus:

- Die Auslegung der Anlage ermöglicht den statischen und dynamischen Test und die Vermessung von Stacks im Leistungsbereich von 1 bis 5kW.

- Die Mengendosierung erfolgt über genau kalibrierte Maßflowcontroller für alle Medienkreise
- Bezogen auf den Stack wurde der Maximalausbau für die Sensorik realisiert.
- Alle Komponenten wurden auf Leistungsreserven ausgelegt, um einen möglichst weiten Testparameterraum zu erfassen.
- Die Befeuchtung wurde über speziell bei s&r entwickelte Wasser/Gas Befeuchter realisiert, um die Befeuchtung unabhängig von anderen Parametern regulieren zu können. Diese Befeuchter bestehen im Wesentlichen aus bei s&r entwickelten speziellen Thermostaten für die DI-Wassertemperierung, den DI-Wasserpumpen und Wasser/Gas-Membranbefeuchtern. Unabhängig vom Reformer wurde für das Synthesegas eine Brenngasbefeuchtung installiert.
- Die Messwerterfassung erfolgt über das von s&r speziell angepasste Messwerterfassungs- und -auswertesystem „FuelCell-Test“.
- Die elektrische Belastung wird über elektronische Lasten mit Netzrückspeisung simuliert.
- Für das Einfahren des Stacks in die Anlage wurde eine spezielle Transport- und Einbautechnologie entwickelt, um die Handhabung des Stackwechsels zu vereinfachen und zu beschleunigen.
- Die Auslegung der Anlage ist so erfolgt, dass vorgegebene Versuchsprogramme automatisch abgefahren werden können, was insbesondere für Langzeituntersuchungen für eine zügige Entwicklung unumgänglich ist.
- Die Brenngasversorgung erfolgt wahlweise über den Reformer, synthetisches Reformat, oder Wasserstoff, wobei eine gesonderte Zudosierung von CO und Luft oder Sauerstoff möglich ist.

Die Anlage ist in dem zweiten Container auf dem BHKW-Gelände des Innovtionsparks Wuhlheide in Berlin untergebracht (**Bild 15**).

Bild 15 Container für 4kW-Versuchsanlage

An den Container wurden die Versorgungsleitungen für Strom, Wasser, Abwasser und Gas und Telefon herangeführt. Die Be- und Entlüftung und Temperierung erfolgt über ein speziell angepasstes System, das am Container montiert wurde, wobei die bei den Versuchen entstehende Wärme in der kalten Jahreszeit mit zur Heizung genutzt werden kann.

Im Gegensatz zu den Feldtestanlagen besteht die 4 kW-Versuchsanlage nicht aus einem fest verbundenen System, sondern wie bereits oben erwähnt aus zwei autonom arbeitenden Modulen: dem autonomen Reformermodul und dem autonomen Brennstoffzellentestmodul. Durch diese Lösung ist es möglich verschiedenste Betriebsmodi einzustellen und unabhängig voneinander zu fahren. Der Reformer erfüllt in diesem Fall nur die Funktion eines preiswerten Reformatlieferanten. Natürlich ist er im weiteren Sinne auch Testobjekt insbesondere bezüglich Langzeitstabilität und dynamischen Verhalten. Wie schon die 1 kW-Versuchsanlage ist auch diese Anlage für den bedienerlosen Betrieb ausgelegt, wobei die Fernsteuerung und Überwachung der Anlage von einem frei wählbaren Ort ausgeführt werden kann.

Mit dem Bau der Versuchsanlagen und Feldtestanlagen wurden zusätzliche Erfahrungen gesammelt bezüglich der Unterschiede und Gemeinsamkeiten dieser Anlagentypen.

Tabelle 2 soll das exemplarisch verdeutlichen. Dabei wurden bestimmte Eigenschaften von 1 bis 5 gewichtet, wobei 1 eher unwichtig und 5 wichtig bedeutet.

Bezeichnung	Versuchsanlage	Kundenanlage
Preis	1	5
Flexibilität	5	2
Dynamik	5	3
Genauigkeit	5	3
Messpunktanzahl	5	2
Bedienerloser Betrieb	5	5
Lebensdauer	5	5
Größe, Gewicht	1	5
Standardisierung/Typisierung	2	5
CE-Kennzeichen	4	5
Reparaturzeit	5	5
Verfügbarkeit	5	5
Stackwechselzeit	5	3
Freie Programmierbarkeit	5	3
Hilfsenergieverbrauch	2	5
Netzrückspeisung	2	5
Netzunabhängiger Betrieb	5	3

Tabelle 2 Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Anlagentypen

Das heißt, bei dem Bau der Versuchsanlage wurden zum Beispiel ganz andere Prioritäten gesetzt und andere Komponenten entwickelt und eingebaut. Gleichzeitig wurde aber versucht, möglichst viele gleiche Komponenten in beiden Anlagen zu verwenden.

Wie schon der modulare Stack so zeichnet sich auch das Brennstoffzellentestmodul durch größte Flexibilität und Entwicklungsfreundlichkeit aus.

2. Voraussichtlicher Nutzen

Das Konsortium bewegt sich bei der Brennstoffzellenentwicklung auf dem gleichen Markt, wie große und sehr große Firmen und Konzerne (Vissmann, Baxi-Group, RWE/Bosch/Idatec, Vaillant usw.). Um in diesem Umfeld einen sinnvollen Marktanteil zu bekommen, hat sich das Konsortium von Anfang an auf einen Nischenmarkt konzentriert. Das sind kundenbezogene Brennstoffzellenanlagen. In diesem Marktsegment existieren bei der Firma s&r gute Erfahrungen, weil die anderen Geschäftsfelder der Firma seit 14 Jahren kundenbezogene Anlagen für die Versorgungstechnik realisieren. Dafür ist es aber erforderlich, dass das notwendige Know-how für alle Komponenten bei der leistenden Firma 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. Die Umsatzplanung ist detailliert in dem Business-Plan der in Gründung befindlichen Riesaer FuelCell GmbH

enthalten. Ziel dieser Firmengründung, die ein unmittelbares Ergebnis der insbesondere vom BMWA geförderten Brennstoffzellenentwicklung ist, ist die Produktion von kundenspezifischen Brennstoffzellenanlagen auf der Basis der erzielten Entwicklungsergebnisse. Bis 1996 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 geplant.

3. Fortschritte bei anderen Stellen

Der Stand der Technik vom August 2004 wird sehr gut in dem unten gezeigten **Bild 16** (Veröffentlichung des PTJ) dargestellt.

Abb 3: Kenndaten verschiedener Entwicklungslinien von Brennstoffzellen-Heizgeräten*

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.

Bild 16 Kenndaten verschiedener Entwicklungslinien von Brennstoffzellen-Heizgeräten

Die Beratung vom BMWA und Projektträger und die am 15. und 16.11.2004 in Berlin gegebenen Berichte dokumentieren sehr klar den gegenwärtigen Stand der Technik. Zusätzlich sind keine wesentlichen Veränderungen oder spektakulären Fortschritte bei anderen Stellen bekannt geworden. Das liegt

wahrscheinlich daran, dass die Publikationen in der Vergangenheit dem realen Stand der Technik zu weit vorausgeeilt sind und jetzt alle bemüht sind, erst einmal den publizierten Stand zu erreichen.

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 Patentrecherchen sind bei anderen Stellen keine wegweisenden Fortschritte bekannt geworden. Unbekannt ist die Wirkung der Milliardenförderungen durch Präsident Bush und das amerikanische Verteidigungsministerium bezüglich der amerikanischen Wettbewerber und der ebenfalls intensiven Förderung in Japan.

Zu beobachten sind allerdings sehr umfangreiche Patentanmeldungen großer Firmen auf der ganzen Welt, die sich vor allem mehr durch Masse als durch Klasse auszeichnen. Welche Strategie dahinter steckt ist uns noch unklar.

Deutlich ist aber ein Trend in der Forschung zu Hochtemperatur-PEM-Membranen. Mit diesem Mambrantyp wird die CO-Toleranz und das Feuchtemanagement besser beherrscht. Nachteile sind höhere Materialbeanspruchungen und noch geringere Leistungsdichten.

4. Vorträge, Veröffentlichungen, Literatur zur Brennstoffzellentechnologie (V)

[1] Arnold, J.: Eigenbedarfsdeckung bei Strom und Wärme durch Blockheizkraftwerke und Möglichkeiten zur Stromverbrauchs-senkung, Unternehmer-Workshop;
durchgeführt von der OstWestWirtschaftsAkademie (OWWA), Berlin, 9.-11. Dezember 1996

[2] Arnold, J.: Erfahrungen mit PEM-Brennstoffzellen in stationären Versuchs- und Feldtestanlagen, Zehntes Fachforum Brennstoffzellen
7./8. Oktober 2003, Berlin, 2003 (OTTI)

[3] Beckmann, F.: Einsatz von Biogas in Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen, in Biogas für alle - eine Stadt-Land-Partnerschaft, Tagung 17.-18. November 2003, Potsdam, 2003, S. 72-84

[4] Arnold, J.: Eine Brennstoffzelle als Gemeinschaftsprojekt, Branchenkonferenz Maschinen- und Gerätebau, Elektrotechnik und Elektronik, Metallverarbeitung, 31. März 2003, Berlin, 2004

[5] Arnold, J.: PEM-Brennstoffzellen-HVS vor dem Feldtest, Vortrag zum 10. Jahrestag der Gründung der FEE Fördergesellschaft erneuerbare Energien e.V., 25. Januar 2003, Berlin, 2003

[6] 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

[7] Grosser, K; Krause, H.; Arnold, J.; Giesel, S.: Workshop „Neue Perspektiven der Brennstoffzellentechnologie“ - Netzeinbindung von Brennstoffzellenanlagen - Technologiezentrum des Landkreises Riesa-Großenhain, 09.11.2004

[8] DBI; s&r; TU Bergakademie Freiberg; Moderator: Dr. Höwener (PTJ): „Präsentation und Diskussion der Projektergebnisse zur Brennstoffzellenentwicklung“ - Brennstoffzellen zur Hausenergieversorgung BMWA Berlin, 15./16.11.2004

[9] Brachold, A.: FuelCell-Systembeschreibung
s&r-Produktdokumentation

[10] Beckmann, F.; Schneider, B.;.: Patentrecherche 1 Brennstoffzellen
s&r-Dokumentation vom 30.10.2002

[11] Reichwald, A.: Patentrecherche 2 Brennstoffzellen
s&r-Fortschrittsbericht (aktuell v. 11/2004)

[12] CE-Prüfbericht für das Brennstoffzellenheizgerät SW-Riesa
Konzept zur Gründung eines Unternehmens zur Fertigung
von Brennstoffzellenanlagen

[13] Business-Plan für die Firma Riesaer FuelCell GmbH

Durchgeführte und geplante Ausstellungen

[1] Energietage in Cottbus

[2] Veranstalter: ITG ETG DGBMT GMM GMA
VDE-Kongress 2004 vom 18.10.-20.10.2004
Ausstellung im Hotel Estrel, Sonnenallee 225, 12057 Berlin

[3] Thüringen-Ausstellung, 26.02.2005 bis 06.03.2005, Thüringen, 2005

[4] enertec, 08.03.2005 bis 11.03.2005, Leipzig, 2005

[5] Hannovermesse, 11.04.2005 bis 15.04.2005, Hannover, 2005

Patente (P1)

[1] Modulare multifunktionale Brennstoffzelle mit Polymerelektrolytmembranen (PEM)

Erfinder: Dr.-Ing. Jürgen Arnold; Dipl.-Ing. Frank Beckmann;
Herr Bernd Schneider
Aktenzeichen: 100 58 381.4
Anmeldetag: 24.11.2000
Offenlegungstag: 13.06.2002

[2] Verfahren und Vorrichtung zur Luftkonditionierung von Niederdruck-PEM-Brennstoffzellen

Erfinder: Dr.-Ing. Jürgen Arnold; Dipl.-Ing. Christoph Hildebrandt;
Dipl.-Ing. Frank Beckmann; Herr Bernd Schneider
Aktenzeichen: 102 27 272.7
Anmeldetag: 19.06.2002
Offenlegungstag: 08.01.2004

[3] Endplatten aus isolierendem Material von PEM-Brennstoffzellenstacks bei denen die Anschlüsse für Medien, die elektrischen Gleichstromanschlüsse, die Mess- und Sicherheitstechnik in die Endplatten integriert sind.

Erfinder: Dr.-Ing. Jürgen Arnold; Dipl.-Ing. Frank Beckmann

Aktenzeichen: 10 204 035 168.6

Anmeldetag: 20.07.2004

Offenlegungstag:

[4] Bildmarke; inhouse - Energieerzeugung

Anmelder: s&r Schalt- und Regeltechnik GmbH

Aktenzeichen: 30458111.9/40

Anmeldetag: 08.10.2004

Offenlegungstag:

[5] Bildmarke; hope - Brennstoffzellen

Anmelder: s&r Schalt- und Regeltechnik GmbH

Aktenzeichen: 30458110.0/09

Anmeldetag: 08.10.2004

Offenlegungstag:

[6] Gebrauchsmuster

Anmelder: s&r Schalt- und Regeltechnik GmbH

Aktenzeichen:

Anmeldetag: 02.11.2004

Offenlegungstag:

III. Erfolgskontrollbericht

1. Beitrag des Vorhabens zur Erreichung der förderpolitischen Ziele

Das Vorhaben wurde eingeordnet in das Zukunfts-Investitionsprogramm (ZIP – Programm) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (jetzt: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, BMWA). Das ZIP– Programm ist ein Teil der komplexen Energieforschung des BMWA und darüber hinaus der Bundesrepublik Deutschland gesamt. Es war zunächst für die Jahre 2001 bis 2003 konzipiert und wurde zwischenzeitlich bis 2005 verlängert. Wesentlichster Schwerpunkt des ZIP – Programms ist neben geothermischen Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung, Offshore – Windtestparks, der energetischen Optimierung von Altbauten und innovativen Antriebstechnologien die Forschung, Entwicklung und Demonstration auf dem Gebiet der Brennstoffzellen (höchste Priorität im ZIP – Programm). Die

- Brennstoffzellentechnik zur Steigerung der Effizienz in der Energieversorgung

ist ein absoluter forschungspolitischer Schwerpunkt der Bundesrepublik und charakterisiert mit den weiteren Schwerpunkten

- Nachhaltige Umweltverträglichkeit durch Verringerung der Klima- und Umweltbelastung (Kyoto);
- Verbreiterung des Energiemix–Angebotes in Deutschland, Verringerung der Abhängigkeit von Importen, nachhaltige langfristige Energieversorgung;
- Integration der dezentral erzeugten Energie in das Gesamt – Angebot an Energie;
- Rationelle Energieanwendung

eine moderne, zukunftsorientierte und nachhaltige Energiepolitik. Die im Teil 6.1 „Sustainable Energy Systems“ (ganz aktuelle Überarbeitung vom September 2004) des Arbeitsprogramms zum VI Forschungsrahmenprogramm der EU genannten Themenkomplexe sind mit den o.g. Schwerpunkten sehr stark identisch und zeigen, dass die Energiepolitik der Bundesrepublik auch europäischen Ansprüchen und Anforderungen in hohem Maße gerecht wird.

Mit der Realisierung der genannten forschungspolitischen Ziele wird die Basis geschaffen für die Erreichung übergeordneter wirtschaftlicher Ziele, insbesondere

- Entwicklung von Hochtechnologien in Deutschland;
- Steigerung des Exports hochwertiger Energietechnologien durch deutsche Unternehmen
- Schaffung von Arbeitsplätzen in Deutschland
- **Mehrwert für Deutschland**

Die im Verbundvorhaben erzielten Ergebnisse belegen, dass ein beachtlicher Beitrag zur Erreichung der förderpolitischen Ziele geleistet wurde. Im Projekt wurde ein Typ von Brennstoffzellen-BHKW entwickelt. Dieser Typ wurde in mehreren Versuchsanlagen erprobt und als Feldtestgerät eingesetzt. Die Anlage besteht aus verschiedenen ebenfalls im Projekt entwickelten Komponenten (Zellstapel, Reformer, Reformerbrenner, Wechselrichter u.a.), die auch teilweise für sich selbst vermarktungsfähig sind. Neben dem zentralen Anliegen des ZIP–Programms (Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie) wurden für die Partner und für die Wirtschaft insgesamt auch ganz wichtige, den förderpolitischen Zielen entsprechende Effekte erreicht wie

- Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Partner
- Hoher Zuwachs an Know-how bei den Partnern
- Starker KMU-Bezug
- Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere KMU
- Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit
- Beitrag zur Verbesserung der Marktchancen der Brennstoffzellentechnologie und zum Abbau der Preisnachteile gegenüber anderen Technologien
- Schaffung günstiger Voraussetzungen für eine effektive Vermarktung der Projektergebnisse

Der schon jetzt erreichte Beitrag des Projekts zur Erreichung der förderpolitischen Ziele wird gravierend zu erhöhen sein, wenn die o.g. effektive Vermarktung gelingt. Hierzu siehe Pkt. 3 „Fortschreibung des Verwertungsplanes“.

2. Ergebnisse und Erfahrungen

2.1 Wissenschaftlich – technisches Ergebnis

Im Vorhaben wurde ein funktionsfähiges Brennstoffzellen – Heizgerät im Leistungsbereich von 4kW$_{el}$ entwickelt und unter Feldbedingungen getestet. Es wurden ferner alle funktionsbestimmenden Komponenten entwickelt und sowohl einzeln als auch im Komplex als Brennstoffzellenanlage getestet. Es liegt ein reproduzierbares System vor, auf dessen Basis weitere Arbeiten für die schrittweise Optimierung der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems ausgeführt werden können. Die vorliegende Lösung wurde im Rahmen eines Feldtests im Dauerbetrieb erprobt. Erste Erkenntnisse daraus sind noch während der Projektlaufzeit in die Entwicklung eingeflossen. Das 4kW$_{el}$ - Gerät ist so beschaffen, dass andere Leistungsgrößen entsprechend Bedarf und Nutzerprofil (Eigenheim, Mehrfamilienhaus, Gewerbeeinheiten, Schulen, Krankenhäuser etc.) auf seiner Basis entwickelt werden können. Das Gerät hat Schnittstellen, die die Modifikation bzw. Weiterentwicklung für den Betrieb mit anderen Energieträgern (insbesondere Biogase) ermöglichen.

Eines der inzwischen hergestellten Geräte wurde einer Einzelabnahme nach der vorläufigen Prüfgrundlage VP 119 „Brennstoffzellen-Gasgeräte bis 70 kW„ durch ein akkreditiertes Prüflabor der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) unterzogen und hat den Test erfolgreich bestanden.

Hinsichtlich der ausführlichen Darstellung des Ergebnisses verweisen wir auf den Hauptteil 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:

- Weitreichende Erkenntnisse über Katalysatoren und Katalysatormaterialien, die neue FuE-Arbeiten generiert haben;
- Erweitertes Know-how zu Beschaffungs- und (auch potentiellen) Absatzmärkten als Basis für eine rationelle Vermarktung;

- Neue innovative Inhalte für die akademische Lehre (betrifft den Partner TU Bergakademie) und praxisnahe Schulungen (betrifft den Partner DBI-GTI);
- Aufbau eines Geschäftsfeldes „Gasanalyse für Brennstoffzellen“ beim Partner DBI GUT;
- Ausbau des Geschäftsfeldes „Brennstoffzellen“ beim Partner s&r Schalt- und Regeltechnik GmbH.

2.3 Wesentliche Erfahrungen

Neben den unmittelbaren Ergebnissen der Entwicklung einer Brennstoffzellenanlage, den wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen und Ergebnissen und dem Zugewinn an Know-how zur Brennstoffzellentechnologie 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. So war im vorliegenden Vorhaben die Zielstellung einer Entwicklung bis zur Leistungsgröße 12kW aus heutiger Sicht sicher nicht realistisch. Gerade auf der Seite der Standardbaugruppen (Pumpen und Verdichter, Mess- und Regel-einrichtungen) für den angestrebten Leistungsbereich haben sich große Entwicklungslücken aufgetan. Diese haben es erforderlich gemacht, die Leistungsstufe 4 kW wesentlich tiefere Entwicklungsarbeiten zu leisten, als ursprünglich im Antrag geplant. Im konstruktiven Dialog mit dem Projektträger Jülich konnte die Zielstellung im Verlauf des Projektes präzisiert und ein sehr gutes Projektergebnis erreicht werden (s.o.).
- 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. Beispiel im Vorhaben ist das Ausscheiden des Partners KET Wermsdorf, welcher als KMU mit schwachem Eigenkapital nicht in der Lage war, seinen Eigenanteil bis zum wirtschaftlichen Erfolg vorzufinanzieren. Auch hier konnte

gemeinsam mit PTJ ein Weg zur Umstrukturierung des Konsortiums gefunden werden.

- Mit dem Einsatz als Feldtestgerät wurden wesentliche Erfahrungen im Zusammenspiel mit der äußeren Peripherie gesammelt. Insbesondere sind Erkenntnisse eingeflossen über die Stabilität von Parametern im Versorgungsnetz Wasser und im Elektronetz. Diese Erkenntnisse wurden genutzt um die Robustheit des Systems zu verbessern.
- Eine frühzeitige und kontinuierliche Erfolgskontrolle ist immanenter Bestandteil der Arbeit an einem FuE-Projekt. Die o.g. notwendigen Zäsuren am Projekt (Korrektur der wissenschaftlich-technischen Zielstellung, Ausscheiden eines Partners) konnten nur durch frühzeitiges Erkennen der Probleme im Rahmen der Erfolgskontrolle bewältigt werden.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

3.1 Erfindungen/Schutzrechte/Lizenzen/Verwertungsmöglichkeiten

Der Partner s&r hat mehrere Schutzrechte (siehe Veröffentlichungen) angemeldet.

In der Projektlaufzeit wurden folgende Fälle der standortbezogenen Verwertung realisiert:

a) Installation einer Versuchsanlage im TGZ Riesa – Großenhain. Die Anlage wurde für Versuchszwecke genutzt. Sie wurde anlässlich des Innovationsforums „Brennstoffzellen in dezentralen Energieversorgungs-anlagen“ einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Außerdem konnten Vertreter der Administration anhand der Anlage für die Unterstützung der Brennstoffzellenforschung durch die öffentliche Hand sensibilisiert werden.

b) Installation einer Feldtestanlage bei den Stadtwerken Riesa GmbH. Die Anlage wurde und wird für die Gewinnung von Betriebserfahrungen sowie den Test der Komponenten und ihres Zusammenwirkens genutzt. Durch die finanzielle Beteiligung der Stadtwerke konnte der Eigenanteil der Antragsteller entlastet werden.

Erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten bestehen vor allem in der Installation weiterer Anlagen. Derzeit liegen zwei Bestellungen für Feldtestanlagen vor (Stadtwerke Chemnitz AG, IMG Nordhausen).

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Der Projektstart fiel zeitlich in die Spätphase einer gewissen „Brennstoffzellen-euphorie“ 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 dieser Entwicklungsschritt nicht so schnell vollzogen werden kann wie ursprünglich angenommen. Die bekannten deutschen Entwickler befinden sich in der Phase der Kleinserie oder der Feldtestanlage. 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 (Vorhabenbeschreibung, Pkt. 4.1). Gleiches gilt die anzusprechenden Nutzergruppen und Zielmärkte sowie für die Umsetzungsstrategien.

In die Anlagen der uns bekannten Wettbewerber 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 Baugruppenhersteller aus den neuen Bundesländern gewonnen und in die Entwicklungsarbeiten einbezogen werden. Ein erster Schritt in diese Richtung ist der Aufbau einer Fertigung/Endmontage am TGZ Riesa – Großenhain im Rahmen eines vom Freistaat Sachsen geförderten Transferprojektes.

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 des o.g. Transferprojektes) daran, diesen zu quantifizieren und die erforderlichen Produktionskapazitäten zu fixieren. Für eine Vorbereitung des Absatzes ist die Vorstellung eines Prototypen auf der Hannovermesse 2005 in Vorbereitung.

3.3 Wissenschaftlich – technische Erfolgsaussichten

In der Vorhabenbeschreibung wurde unter 4.2 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 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“ der DBI-GTI im Auftrage des DVGW;
   - Innovationsforum „Brennstoffzellen in dezentralen Energieversorgungsanlagen“ im TGZ Riesa – Großenhain und eine jährliche Workshopreihe für Produzenten und Anwender;
   - Präsentation auf der Hannover – Messe 2005
   - Präsentationen auf der GAT 2003 und 2004 (größtes Forum der deutschen Gaswirtschaft);
   - Diverse Veröffentlichungen, Posterbeiträge, Fachvorträge etc.;

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Auch hier wurden die in der Vorhabenbeschreibung unter Pkt. 4.3 genannten Prognosen realisiert. Dies ist wiederum eine gute Basis für den künftigen wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Anschluss.

Der wissenschaftliche Anschluss ist dringend erforderlich, um ein marktfähiges Produkt zu entwickeln. 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:

- FuE-Projekt „Verbundprojekt ZIP - Komponentenentwicklung für skalierbare erdgasbetriebene Brennstoffzellen – BHKW (EBBA 3)“
  Laufzeit: 03/2004 – 09/2005, ZIP – Programm des BMWA
- FuE – Projekt „Entwicklung eines integrierten Dampfreformers für erdgasbetriebene Brennstoffzellenheizgeräte“
  Laufzeit: 11/2003 – 04/2006, InnoRegio – Programm des BMBF
- Mitarbeit im Projekt „Kompetenz-, Innovations-, und Netzwerkzentrum Brennstoffzelle im TGZ des Landkreises Riesa – Großenhain“
  Laufzeit: 05/2004 – 10/2006, Technologieförderung des Freistaates Sachsen, Teil „Transferprojekte“

Das Projektergebnis ist auch wirtschaftlich anschlussfähig. Der Anschluss wird erreicht durch die Installation weiterer Anlagen (siehe 3.1, weitere Bestellungen werden derzeit verhandelt). Der Aufbau eines Herstellerunternehmens für die Anlagen ist ein Beleg für das starke Interesse der Projektpartner.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Im Projektantrag war die Entwicklung von Anlagen in einer Art Typenreihe von 4 ... 12kW fixiert. Im Vorhaben konnte dies nur bis 4kW realisiert werden. Dies ist dadurch zu begründen, dass sich die Arbeiten bis zur 4kW-Anlage wesentlich komplizierter gestalteten als im Antrag konzipiert. Schwerpunkt war vor allem, dass

Komponenten, die zugekauft werden sollten am Markt gar nicht vorhanden waren. Die Gründe sind in Protokollen zwischen dem Verbund und dem Konsortium detailliert dargelegt. Die Anlagen bis 12kW sollten kein prinzipielles technisches Problem sein. Sie konnten aber im zeitlichen und finanziellen Limit des Vorhabens nicht entwickelt werden. Ein Anschlussvorhaben für die notwendigen Entwicklungsarbeiten wurde bereits gestartet (s. Abs. III.3.4).

5. Präsentationsmöglichkeiten

Die realisierten und geplanten Möglichkeiten zur Präsentation vor potentiellen Nutzern und zur Verbreitung der Ergebnisse wurden unter 3.3 dargelegt. 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 dazu eine jährliche Workshopreihe für Produzenten und Anwender ins Leben gerufen.

6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

In der ersten Hälfte der Projektlaufzeit konnten die Ausgaben- und Zeitplanung eingehalten werden. Danach kam es zu Verzögerungen im Gefolge des Ausstiegs des Partners KET Wermsdorf. Notwendige Arbeitsanteile von KET mussten durch die verbleibenden Partner ausgeführt werden, wodurch deren Kosten- bzw. Ausgabenlimit überzogen wurde. Im konstruktiven Dialog mit dem Projektträger wurden unbürokratisch Möglichkeiten gefunden, diese Probleme zu lösen. Dies war eine Verlängerung von 02/2004 auf 05/2004 sowie moderate Aufstockungen für die Partner DBI-GTI und s&r (im Rahmen der von KET zurückgegebenen Mittel).