

Verbundvorhaben:

"Entwicklung von PEM- Brennstoffzellensystemen mit
Hochtemperaturmembranen"

Schlussbericht



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

Förderkennzeichen: **0327141J**

Berichtszeitraum: **01.09.2006 – 31.08.2009**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0327141J gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1. Hintergrund des Projekts.....	3
1.1 Aufgabenstellung.....	6
1.2 Voraussetzungen	8
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	13
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand am Projektbeginn	14
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	23
2. Darstellung der erzielten Ergebnisse	24
2.1 Kopplung von Adsorptionskälteanlagen und PEM-Brennstoffzellen (Arbeitspaket 8000)	24
2.1.1 Stand der Technik.....	24
2.1.2 Konzepte.....	26
2.1.3 Fazit / Zusammenfassung.....	30
2.2 Brennersystem (Arbeitspaket 9000)	31
2.2.1 Aufgabenstellung für den Brenner	31
2.2.2 Erwartete Gaszusammensetzung des HT- PEM- BZ- Stacks.....	33
2.2.3 Konstruktive Lösungen zum Brenner	33
2.2.4 Gasversorgung und Sicherheitseinrichtungen	35
2.2.5 Betriebserfahrungen	37
2.3 Abgaswärmeübertragung (Arbeitspaket 9060)	39
2.3.1 Konzept und Aufbau eines Versuchsstandes.....	39
2.3.2 Versuchsergebnisse	42
2.4 Gesamtsystem – Versuchsergebnisse (Arbeitspaket 10000).....	45
3. Literaturverzeichnis	49

1. Hintergrund des Projekts

Im Marktsegment des dezentralen Einsatzes von stationären Brennstoffzellensystemen im einstelligen kW-Bereich haben sich die intensivsten FuE-Arbeiten in der Vergangenheit auf die Brennstoffzellentypen der Niedertemperatur-Brennstoffzelle (Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle, PEFC) und der Hochtemperatur-Brennstoffzelle (Oxidkeramische Brennstoffzelle, SOFC) konzentriert. Wichtige internationale Wegbereiter dieser Technologien im Bereich der Hausenergieversorgung sind Unternehmen wie Ballard (Kanada), Plug Power (USA) und Sulzer Hexis (Schweiz). Diese Firmen haben internationale Allianzen mit traditionellen Energieversorgern gebildet, um die Brennstoffzellentechnologie z. B. auf dem Gebiet der Hausenergieversorgung umzusetzen. Seit einigen Jahren sind auch verstärkt Heizungsbauer (Vaillant, Viessmann, Buderus u. a.) in diese Technologie eingestiegen, um dabei eigene Geräte und Systeme für den dezentralen Einsatz zu entwickeln.

Grundlage für die Aufgaben im vorliegenden Projekt bildet das inhouse4000-System, das zusammen mit den Partnern inhouse engineering (IHE), der TU Bergakademie Freiberg (TUBA-GWA) und der Universität Magdeburg (IESY) in den vorgelagerten Projekten „Verbundprojekt: ZIP - Entwicklung und Feldtest von stationären PEM-Brennstoffzellenanlagen für die dezentrale Energieversorgung im Leistungsbereich bis 12kW“ (Förderkennzeichen: 0327141C) und dem „Verbundprojekt: ZIP - Komponentenentwicklung für skalierbare erdgasbetriebene Brennstoffzellen-BHKW für die dezentrale Energieversorgung“ (Förderkennzeichen: 0327141F), entwickelt wurde.

Aufbauend auf einem bei inhouse entwickelten modularen 4kW PEM-Brennstoffzellenstack wurde im erstgenannten Förderprojekt in Kooperation mit dem DBI-Freiberg (Brennerentwicklung) und der Bergakademie Freiberg (Reformerentwicklung) ein 4 kW-Brennstoffzellen-BHKW für Erdgas entwickelt, dessen skalierbare Komponenten in dem zweiten Projekt wesentlich verbessert und weiterentwickelt worden sind. Innerhalb des ersten Projektes sind mehrere Versuchsanlagen (für Test- und Erprobungszwecke) und Feldtestanlagen (z.B. Stadtwerke Riesa) entstanden, welche die Basis für die Weiterentwicklung, anschließende Fertigung und den Vertrieb bildeten. 2005 wurde zur Hannovermesse eine weiterentwickelte Anlage ausgestellt, die anschließend in den Stadtwerken

Chemnitz installiert und betrieben wurde. Diese Anlage enthielt bereits weiterentwickelte Komponenten aus dem 2. Förderthema und sie ist der Prototyp einer ersten geplanten Musterserie.

Die Vorteile einer stationären Brennstoffzellenanlage für die Hausenergieversorgung liegen darin, dass sowohl Elektroenergie als auch Wärmeenergie direkt am Ort der Nutzung und je nach Bedarf erzeugt werden können. Die Anlagen reagieren dynamischer auf wechselnde Lastanforderungen als konventionelle Kraftwerke und können bei gleichzeitiger Nutzung der beiden Energieformen mit hohen Gesamtwirkungsgraden aufwarten und somit einen wichtigen Beitrag zur Schonung primärer Energiequellen leisten.

Ein wesentlicher Nachteil dieser Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) kann aber bei wärmegeführten Anlagen der unzureichende Bedarf an Wärmeenergie während der Sommermonate sein. Liegt im jeweiligen Objekt kein oder nur ein geringer Bedarf an Wärmeenergie vor, so resultiert dies – zumindest bei angestrebtem wirtschaftlichen Betrieb – letztendlich in einem Stillstand der Anlage. Logischer wie interessanter Nebeneffekt dieser Tatsache ist der stetig ansteigende Bedarf an Klimakälte in den Sommermonaten, welcher unter Nutzung von kommerziellen Kälteanlagen mit einem höheren elektrischen Energiebedarf des jeweiligen Gebäudes zusammenfällt. Um so diffiziler ist die Tatsache zu bewerten, dass die KWK-Anlage eventuell im Stillstand verharrt bzw. nur auf geringer Leistungsstufe betrieben werden kann.

In stationären PEM- Brennstoffzellenanlagen für die Hausenergieversorgung wird in der Regel der PEM- Brennstoffzelle ein wasserstoffreiches Gas mit etwa 70% Wasserstoffanteil zugeführt, welches aus Energieträgern wie Erdgas, Bio-Erdgas, Biogas bzw. aus Flüssigbrennstoffen on-line und bedarfsgerecht mittels Dampfreformierung erzeugt wird. Die Technologie der Dampfreformierung wird in den überwiegenden Fällen der Wasserstofferzeugung in stationären PEM- Brennstoffzellenanlagen eingesetzt. Konträr zum Vorteil der bedarfsgerechten Produktion von wasserstoffreichem Gas steht allerdings der wesentliche Nachteil einer vor- und nachgelagerten Gasreinigung, wobei insbesondere die nachgelagerten Reinigungsstufen als sehr aufwendig und kostenintensiv einzuschätzen sind. Ursächlich für die Notwendigkeit der nachgelagerten Reinigungsstufen, in denen die Kohlenmonoxidkonzentration des Basis-Reformats stark reduziert wird, ist die hohe schädigende Wirkung dieses Begleitgases auf die

PEM-Brennstoffzelle. Trotz größter Bemühungen ist die erforderliche rückstandsfreie Entfernung von Kohlenmonoxid nicht oder nur bedingt möglich, so dass ein permanenter bzw. temporärer Schadgasangriff an Kernkomponenten der Brennstoffzelle erfolgt, der wiederum eine Limitierung der Lebensdauer nach sich ziehen kann.

Die Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle (HT-PEM) stellt hier eine aussichtsreiche neue Technologie dar, welche diesen oben genannten system- und lebensdauerbedingten Nachteilen der Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle (NT-PEM) begegnen kann und gegenüber jenen Brennstoffzellenvertretern in dieser Hinsicht ein deutliches Überlegenheitspotenzial aufweist.

Ähnlich anderen Entwicklern wie Vaillant (Deutschland) oder Plug Power (USA) wird auch von DBI der Hauptvorteil der HT-PEM-Brennstoffzelle im höheren Temperaturniveau (120 - 160°C) gesehen und damit auch die Erschließung neuer innovativer Wärmenutzungsanwendungen. Zu diesen technischen Möglichkeiten gehören beispielsweise die nachgeschaltete Ankopplung von Anlagen für die Klimatisierung bzw. die Kälteerzeugung in der Haus- und Gebäudetechnik. Auch wären technisch gesehen sowohl die Erzeugung von Prozessdampf als auch die Ankopplung eines entsprechenden Kreisprozesses (Organic Rankine Cycle, Kaltdampfprozess usw.) zur ergänzenden Elektroenergieerzeugung denkbar.

Neben den genannten technischen Optionen spielt aber die mögliche Anhebung der Jahres-Nutzungsdauer sowie des Nutzungsgrades durch die Anwendung oben genannter Optionen und/oder das höhere Temperaturniveau der HT-PEM-Brennstoffzelle eine wesentliche Rolle, da besonders in den Sommermonaten eine adäquate Wärmeabfuhr möglich wäre.

Hinsichtlich der Gasreinigung ergeben sich bedeutende Vorteile, da die HT-PEM-Brennstoffzelle aufgrund der höheren Betriebstemperatur eine wesentlich höhere Toleranz gegenüber Kohlenmonoxid und anderen schädigenden Spurengasen im Reformat aufweist. Daher kann die Gasreinigung deutlich einfacher ausfallen als bei NT-PEM-Systemen. Aus dem teilweisen Wegfall der Reinigungsstufen sowie dem Wegfall der kathodenseitigen Gasbefeuchtungsstrecke, könnte ein vereinfachtes Gesamtsystem resultieren, welches die Erreichung der gesetzten Ziele (Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades, Senkung der Produktionskosten, Senkung der Baugröße usw.) in Aussicht stellt.

1.1 Aufgabenstellung

Das strategische Entwicklungsziel des Projektes wurde wie folgt definiert:

„Entwicklung der technischen Grundlagen für eine neue PEM-Brennstoffzellen-Heizgerätegeneration auf der Basis von Hochtemperaturmembranen“.

Die wesentlichen wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele lassen sich den folgenden Bereichen zuordnen: Hochtemperatur-Brennstoffzellenmodul mit Peripherie und Verbindungstechnik, Fuel Processing, Systembrenner, Abgassystem und Kälteerzeugung sowie Systemsteuerung. Die wissenschaftlich technischen Arbeitsziele werden im Folgenden präzisiert.

Hochtemperatur-Brennstoffzellenmodul:

Auf dem Gebiet der Stack- und Modulentwicklung waren grundlegende Untersuchungen zur Bestimmung der Einsatzgrenzen der Hochtemperatur-PEM-MEA innerhalb einer neuen Stackumgebung erforderlich. Neben diesen Grundlagenuntersuchungen bildeten die Auswahl der einzusetzenden Materialien sowie die Neukonzeption der Medienversorgung, der Verbindungs-, der Steuerungs- und Regelungstechnik die wesentlichen Arbeitsschwerpunkte. Mit diesen Arbeiten sollten die folgenden wesentlichen Projektziele erreicht werden:

- thermische und chemische Langzeitstabilität des Stack inkl. der peripheren Systeme (Medienversorgung, Kühlung, Wärmedämmung) für eine Nenntemperatur von 180 °C
- CO-Toleranz der MEA bei Reformatbetrieb kurzzeitig bis 5 % und bei Dauerbeanspruchung bis 1,5% CO
- Sicherstellung eines kondensationsfreien Betriebs insbesondere bei An- und Abfahrvorgängen sowie bei Lastwechseln

Fuel Processing:

Die hohe CO-Toleranz der HT-PEM-MEA bietet die Möglichkeit, die Prozessstufen CO-Feinreinigung innerhalb des Reformers einzusparen und die bis dahin noch mehrstufige CO-Konvertierung einstufig aufzubauen. Dies erfordert jedoch eine

Senkung des CO-Gehaltes sowohl im Reformer als auch in einer neuen Hochleistungs-CO-Konvertierung:

- Senkung des CO-Gehaltes im Reformat bei stationärem Betrieb auf kleiner 1,3% über den gesamten Lastbereich zwischen 25 – 100%
- im dynamischen Betrieb zulässige CO-Spitzen bis max. 3%, die Spitzen müssen nach 1 min auf unter 1,5% abgebaut sein
- Einsparung der CO-Feinreinigung und Zusammenfassung der CO-Konvertierung in einer Stufe, die in das System Verdampfer-Reformer integriert werden kann

Systembrenner:

Durch die Einführung der Hochtemperatur-MEA ändert sich die Gaszusammensetzung des Reformats und des Anodenrestgases. Die wesentlichen Änderungen liegen im höheren CO-Gehalt, der höheren Temperatur sowie der höheren Restfeuchte von Reformat und Brennstoffzellenrestgas. Zielgrößen für den Brenner waren:

- Regelbereich von 20% - 100% Nennleistung bei Erdgasbetrieb und bei Reformat- / Restgasbetrieb
- CO und NO_x-Emissionen im Brennerabgas nach den Grenzwerten „Blauer Engel“
- Sicherstellung eines kondensationsfreien Betriebes des Brenners
- Einhaltung der Rückschlagsicherheit auch bei Restgastemperaturen bis 180 °C

Abgassystem und Kälteerzeugung:

Im Projekt sollte die Kopplung eines HT-BZ-Systems mit einer Adsorptionskältemaschine untersucht werden. Ziel war es, die beim Betrieb der Anlage anfallende Abwärme aus dem Abgas bzw. dem Kühlkreis des Stack als Wärmequelle für eine Adsorptionskältemaschine in Betracht zu ziehen und damit die Klimatisierung eines Gebäudes zu realisieren. Gleichzeitig sollte aber sichergestellt bleiben, dass die Kondensationswärme der Abgase weiter genutzt wird.

- Erstellung eines Konzeptes zur Einbindung von Adsorptionskältemaschinen,
- Einhaltung einer Abgastemperatur kleiner 90 °C

Systemsteuerung:

Durch die Veränderungen der Systemstruktur sowie den neuen Anforderungen an den dynamischen Betrieb des Gesamtsystems ist eine Umstellung des vorherigen Steuerkonzeptes erforderlich. Gleichzeitig müssen die Kosten und der Platzbedarf für die Steuerung gesenkt werden. Die daraus abgeleiteten Ziele waren:

- Entwicklung einer verteilten und vernetzten Intelligenz inkl. Kommunikation
- Entwicklung von Zustandsreglern für vernetzte Strukturen
- Entwicklung eines Online-Diagnosesystems für BZ-Systeme

Gesamtsystem:

Die Umsetzung der vorgenannten Innovationen muss zu einer Verbesserung der Gesamtperformance des Systems führen, die sich in den folgenden Parametern ausdrückt:

- die Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades auf 38%
- die Senkung der Produktionskosten um 35%
- die Senkung der Baugröße um 25%
- bei Beibehaltung der bisher erreichten Lebensdauer der Komponenten.

1.2 Voraussetzungen

Die am Projekt beteiligten Firmen und Institute werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Technische Universität Bergakademie Freiberg

Seit dem Jahr 2000 ist die TUBAF in verschiedenen Projekten an der Entwicklung der inhouse5000 beteiligt. Im Oktober 2007 wurde der Lehrstuhl Hochtemperaturanlagen in den Lehrstuhl Gas- und Wärmetechnische Anlagen (GWA) am Institut für

Wärmetechnik und Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg (TUBAF) eingegliedert.

Der Lehrstuhl GWA ist Mitglied der Brennstoffzellen Initiative Sachsen e.V. (BZS) und ist neben nationalen Projekten auch in mehreren EU-Vorhaben im Bereich der Brennstoffzellentechnologie aktiv:

- FlameSOFC ist ein Forschungsprojekt mit dem Ziel der Entwicklung eines innovativen Mikro-BHKW auf Basis der SOFC-Technologie mit einer elektrischen Leistung von 2 kW. Dieses System soll alle Anforderungen des europäischen Marktes erfüllen und für den Betrieb mit verschiedenen Brennstoffen (Erdgas, Flüssiggas, Heizöl) geeignet sein.
- MC-WAP behandelt den Einsatz von Schmelzkarbonatbrennstoffzellen für die Stromversorgung großer Schiffe.
- FC-Chain ist ein interdisziplinäres Austauschprogramm zur Überwindung technischer, sozialer und marktspezifischer Fragestellungen bei der Kommerzialisierung SOFC-basierter Energiesysteme.

Besonderes Know-how liegt in der Reformierentwicklung, der wärmetechnischen Auskopplung und der Porenbrennertechnologie. Durch umfangreiche Untersuchungen bezüglich thermodynamischer Zusammenhänge, heterogener Katalyse und komplexer Verbrennungsvorgänge verschiedener Brenngase ist die TUBAF in der Lage, den Dampfreformierungsprozess zu optimieren. Außerdem verfügt die TUBAF über einen Teststand zur Bewertung von Katalysatoren, die eine wesentliche Komponente der Wasserstofferzeugung darstellen. Neuentwicklungen auf dem Katalysatormarkt können damit auf ihre Leistungsfähigkeit und Effizienz unter Prozessbedingungen getestet werden, wodurch ihre Eignung für die praktische Verwendung festgestellt werden kann.

Damit liegt umfangreiches Fachwissen in Bezug auf die Brenngasaufbereitung und den Aufbau von Brennstoffzellensystemen vor.

DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH

Die DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH (DBI-GUT) ist *das* ostdeutsche Kompetenzzentrum zu allen gasfachlichen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben, auch für Entwicklung von Brennern für Spezialanwendungen. Seit über 10 Jahren werden am

DBI verschiedene Arbeitsfelder auf dem Gebiet Brennstoffzelle insbesondere für stationäre Hausenergieversorgung bearbeitet. Zu diesen Themenkomplexen existiert eine langjährige sehr intensive Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern.

Wesentliche Projekte der DBI-GUT im Bereich Brennstoffzellentechnik sind:

- Gasfachliche und energetische Betreuung der Brennstoffzelle ONSI PC 25C im Verwaltungsgebäude der GSA GmbH in Gröbers, Auftraggeber: GSA GmbH, Laufzeit: 1996 - 2001
- Rational supply of power, heat and cooling in buildings demonstrated by the MALTESER-hospital at Kamenz, Zuwendungsgeber: EU, Laufzeit: 1997 - 2001
- „Optimiertes Betriebsmanagement von Brennstoffzellen“, Projektträger: BMW/AiF, Laufzeit: 2000 – 2003
- „Erdgasbetriebene Brennstoffzellenanlage zur dezentralen Energieversorgung“, Projektträger: SMWA/SAB, Laufzeit: 01/2000 – 05/2003
- "Erarbeitung von Grundlagen für die europäische Normung von Brennstoffzellen-Heizanlagen", Projektträger: BMW/PTJ, Laufzeit: 2001 – 2003
- "Entwicklung der Komponenten Vorreformierung und Reformerbrenner für eine SOFC-Anlage", Auftraggeber: Entwicklungs- und Vertriebsgesellschaft Brennstoffzelle mbH Dresden, Laufzeit: 2001 – 2003
- „Entwicklung und Feldtest von stationären Brennstoffzellenanlagen für die dezentrale Energieversorgung im Leistungsbereich bis 12 kW“, Projektträger: BMW/PTJ, Laufzeit: 09/2001-08/2003
- „Felderprobung kleiner Brennstoffzellen zur Gewinnung von Betriebserfahrungen in technischer und kommerzieller Hinsicht“, Auftraggeber: VNG-Verbundnetz Gas AG, Laufzeit: 11/2001 – 12/2006
- „Entwicklung eines integrierten Dampfreformers für erdgasbetriebene Brennstoffzellenheizgeräte“, Projektträger: BMBF, Laufzeit: 11/2003 – 04/2006

Projektrelevante Arbeitsgebiete sind:

- Erstellung eines Konzeptes zur Kopplung einer HT- PEM- BZ- Anlage mit einer Adsorptionskälteanlage,

- Entwicklung eines schadstoffarmen Brenners zur Reformerbeheizung mit unterschiedlichen Gaszusammensetzungen einschließlich der material-technischen Optimierung thermisch hoch belasteter Bauteile,
- Analyse der Prozessgas- und Abgaszusammensetzung,
- Sicherheitstechnische Analyse des Anlagenbetriebes.

Durch die angeschlossene Prüfstelle DVGW-Prüflaboratorium Energie können sicherheitsrelevante Probleme begleitend zu Neuentwicklungen geprüft und gelöst werden, sodass die Kriterien für eine spätere Zertifizierung bereits in die Entwicklungsarbeiten einfließen.

inhouse engineering GmbH

Die Firma inhouse engineering GmbH wurde am 26.09.2006 gegründet und hat zum 01.01.2008 den relevanten Geschäftsbetrieb mit den beiden Geschäftsfeldern Brennstoffzellensysteme und Effiziente Energiesysteme aufgenommen, wobei die seit 1995 laufenden Brennstoffzellenaktivitäten der Schalt- und Regelungstechnik GmbH von inhouse engineering GmbH übernommen und in vollem Umfang fortgesetzt wurden. Mit ihren 22 Mitarbeitern ist inhouse engineering der Gruppe der Klein- und Mittelständischen Unternehmen zuzurechnen.

Das Hauptgeschäftsfeld *Effiziente Energiesysteme* umfasst im Wesentlichen die intelligente Gebäudeautomatisierung, insbesondere die Steuerung, Regelung und Überwachung von Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystemen in Wohn- und Geschäftsgebäuden. inhouse engineering sorgt bei der Umsetzung für ein problemloses und kostengünstiges Zusammenwirken der verschiedenen Gewerke und installiert perfekt abgestimmte Steuerungs- und Regelungstechnik, welche exakt auf die individuellen Anforderungen des Kunden sowie die örtlichen Gegebenheiten ausgelegt und projiziert wird. Neben der Programmierung und Inbetriebnahme von SPS-Steuerungen und -Regelungen verfügt inhouse engineering auch über eine eigene Schaltschrankprojektion sowie den daran angeschlossenen Schaltschrankbau.

Der 2. Geschäftsbereich *Brennstoffzellensysteme* beinhaltet schwerpunktmäßig die Entwicklung, die Fertigung sowie den Betrieb von reformatbetriebenen PEM-Brennstoffzellensystemen für die stationäre Energieversorgung (Kraft-Wärme-

Kopplung) im Leistungsbereich bis 5kW_{el} . Neben der Entwicklung von Brennstoffzellenstacks und Brennstoffzellensystemen werden von inhouse engineering auf eigens entwickelten Testständen Untersuchungen durchgeführt, die hinsichtlich Stackperformance, Stacklebensdauer sowie optimaler Betriebsstrategien Aufschluss geben. Parallel dazu werden auch Materialuntersuchungen und die Erprobung von peripheren Systemkomponenten durchgeführt. inhouse verbindet somit die umfangreichen Erfahrungen von Test und Anwendung von Brennstoffzellensystemen mit dem Know-how an Steuerungs- und Regelungstechnologie und schließt dabei stets auch die aktuellsten Ergebnisse der internationalen Brennstoffzellenforschung ein.

Die Firma inhouse engineering ist Mitglied des sächsischen Konsortiums PEM-Brennstoffzelle (siehe auch www.PEM-Brennstoffzelle-Sachsen.de) und ist Mitbegründer der Firma Riesaer Brennstoffzellentechnik GmbH, bei der die Brennstoffzellengeräte und Anlagen der Generation inhouse5000 gefertigt werden.

Otto-von Guericke-Universität Magdeburg (IESY / LENA)

Der Lehrstuhl für elektrische Netze und alternative Elektroenergiequellen (LENA) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg forscht im Bereich regenerativer und alternativer Elektroenergiequellen in Verbindung mit der Integration in elektrischen Energieversorgungsnetzen unter Berücksichtigung struktureller Veränderungen im Bereich der Energieversorgung. Neben der Modellierung, Simulation und Planung von elektrischen Netzen ist die optimierte Betriebsführung,- und -überwachung von stationären netzgekoppelten und autonomen inselfähigen PEM Brennstoffzellensystemen ein Schwerpunkt des Forschungsbereichs.

Die Arbeiten zur optimierten Betriebsführung und –überwachung konzentrieren sich primär auf die Realisierung von intelligenten Diagnosegeräten sowie der Untersuchung von Teilsystemen hinsichtlich Steuerung und Monitoring. Die Beschreibung und Bewertung der Gesamtsysteme erfolgen durch die Modellierung der Teilsysteme und der gesamten energetischen Wandlungskette.

Die Ergebnisse der kontinuierlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind in mehreren Brennstoffzellenprojekten dokumentiert. Die Teilergebnisse der Projekte sind zum einen direkt für die Weiterentwicklung der inhouse5000-Anlage genutzt und

zum anderen für innovative und Kosten reduzierende Teillösungen umgesetzt worden.

Die seit 10 Jahren laufenden Forschungs- und Lehraktivitäten an Niedertemperatur PEM-Brennstoffzellensystemen am LENA und der damit verbundenen wissenschaftlichen Ausbildung von Doktoranden und Diplomanden führten zu einem fundierten Wissensstand auf dem Gebiet der NT-PEM Brennstoffzelle und dessen komplexem Gesamtsystem. Neben der Modellierung und Simulation von BZ-Systemen bietet die mit Mitteln aus dem HBMG-Fonds aufgebaute Laborausstattung eine Verknüpfung von theoretischen Untersuchungen mit begleitenden praktischen Messungen. Die Erfahrungen und entwickelten Kompetenzen für NT-PEM Systeme, speziell für die stationäre, dezentrale Energieversorgung mit den Forschungsschwerpunkten Betriebsführung, -überwachung, intelligentes Steuerungssystem, Wirkungsgradoptimierung und Diagnose sind die Voraussetzung für eine erfolgreiche Anknüpfung an die HT-PEM Technologie im Bereich der Forschung. Dadurch können Synergien gut genutzt werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde am 01.09.2006 gestartet und am 31.08.2009 beendet. Der ursprünglich beantragte Projektzeitrahmen wurde aufgrund unvorhersehbarer technischer und zeitlicher Verzögerungen bei allen Partnern um 6 Monate auf insgesamt 36 Monate kostenneutral verlängert. Es fanden halbjährlich Projekttreffen mit allen Projektpartnern abwechselnd bei einem der Partner statt. Darüber hinaus haben sich bei Bedarf ein Teil der Projektbearbeiter im Rahmen von Arbeitstreffen für die Abstimmung von Teilaufgaben getroffen. Als Projektkoordinator fungierte die inhouse engineering GmbH.

In folgender Abbildung 1 ist die Arbeitspaketstruktur graphisch anhand einer Gesamtsystemzeichnung dargestellt.

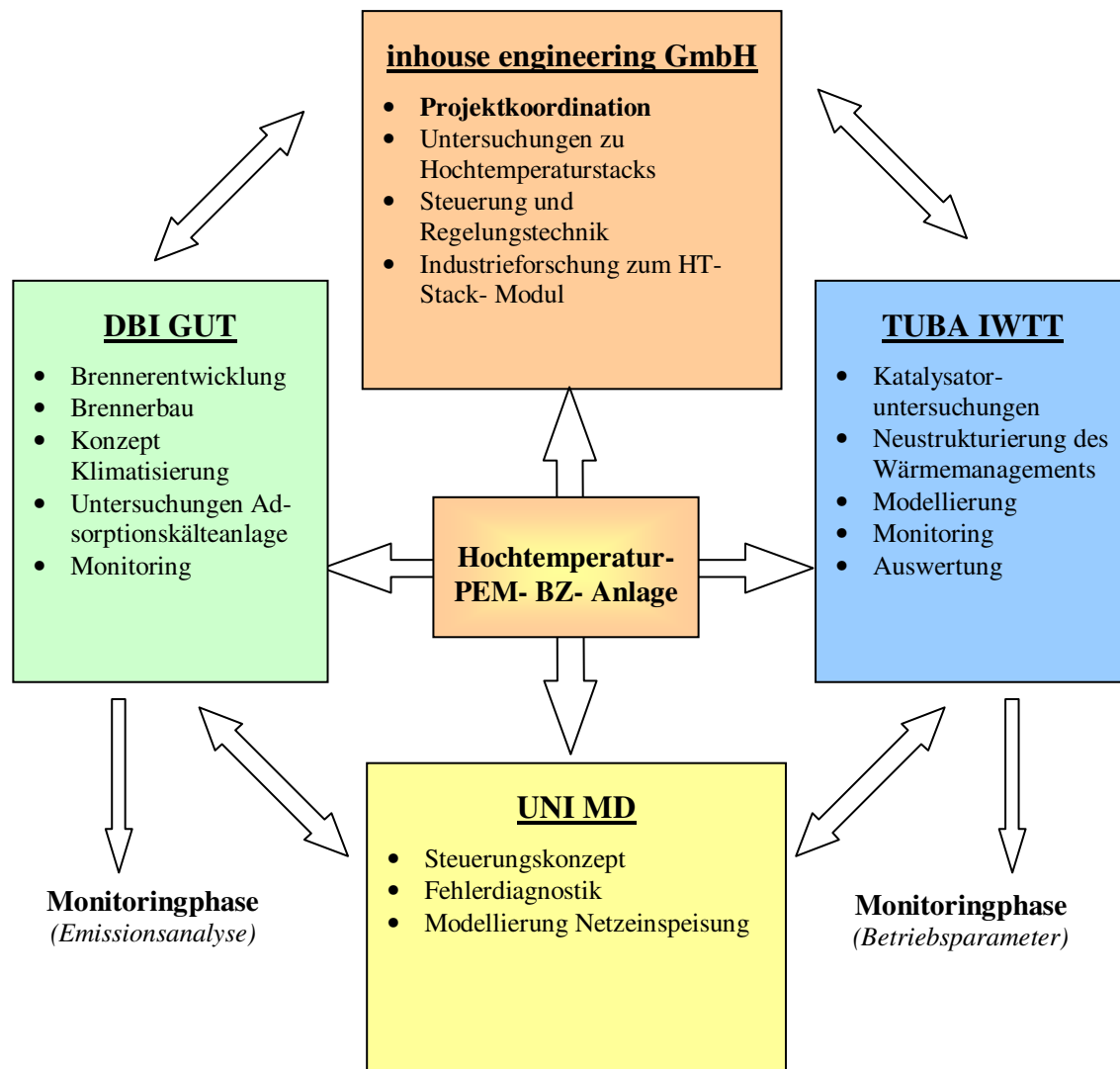


Abbildung 1: Arbeitsteilung zwischen den Projektpartnern

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand am Projektbeginn

Die Arbeiten für das vorliegende Projekt stellen eine konsequente Fortführung der erfolgreich abgeschlossenen Projekte „Entwicklung und Feldtest von stationären PEM-Brennstoffzellen für die dezentrale Energieversorgung im Leistungsbereich bis 12 kW“ (Förderkennzeichen 0327141A-D) und „Komponentenentwicklung für skalierbare erdgasbetriebene Brennstoffzellen- BHKW für die dezentrale Energieversorgung“ (Förderkennzeichen 0327141E-G) dar. In diesen genannten Förderprojekten ist es mit Unterstützung des BMWA im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogrammes ZIP gelungen, die Entwicklungen bis zu einem Brennstoffzellenvorseriengerät voranzutreiben und dieses erfolgreich in Feldtests zu erproben.

Nachfolgend wird auf die Ausgangspunkte der verschiedenen Arbeitsfelder zum Zeitpunkt des Projektbeginns eingegangen.

Entwicklungswege bei Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Membranen

Im kleinen Leistungsbereich unter 50 kW elektrisch werden Brennstoffzellen-Heizgeräte vorrangig mit Polymer-Elektrolyt-Membranen (PEM) realisiert. Standardmäßig kommen dabei perfluorierte Polysulfonsäure-Membranen, wie zum Beispiel Primea von Gore oder Nafion von DuPont zum Einsatz. Diese Membranen sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet [1]:

- hohe Leitfähigkeit im befeuchteten Zustand,
- hohe chemische Stabilität,
- mechanische Stabilität durch Verstärkung mit PTFE-Einlagerungen (Gore),
- Betriebstemperatur bis 80 °C.

Die Hauptnachteile dieser Membranen für den Einsatz in Brennstoffzellenheizgeräten ergeben sich aus folgenden Merkmalen:

- Notwendigkeit einer komplizierten Befeuchtungsregelung,
- zur Zeit zu hoher Preis und zu geringe Lebensdauer für Endkunden,
- Zerstörung oder Degradation durch Austrocknung möglich,
- zu niedrige Ausgangskühltemperatur für eine effektive Wärme-Kältekopplung,
- schwierige Recyclebarkeit der perfluorierten Polymermembranmaterialien,
- starke CO-Empfindlichkeit.

Insbesondere wegen dieser Nachteile sind weltweit viele Forschungsarbeiten initiiert worden, um alternative Materialien zu entwickeln, die diese Nachteile nicht aufweisen. Dazu gehören Arbeiten, die die Verbesserung der Membraneigenschaften durch besondere Behandlungen des Polymers im Herstellungsprozess betreffen, Versuche mit anorganischen Füllstoffen und die Entwicklung ganz neuer Membranen.

Einer der erfolgversprechendsten Wege ist dabei mit der Entwicklung spezieller Polybenzimidazol-Komplexmembranen (PBI) beschritten worden (z.B. H₃PO₄). Die

gegenwärtig verfügbaren PBI-Membranen zeichnen sich durch folgende Alleinstellungsmerkmale aus [2] [3]:

- sehr gute Thermostabilität,
- sehr hohe Leitfähigkeit,
- hohe Leistungsdichten bei $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- Langzeitstabilität von 14.000 h mit weniger als $6\text{ }\mu\text{V/h}$ Degradation,
- keine Befeuchtung (Wasserkreislauf) erforderlich,
- sehr gute CO-Verträglichkeit bis ca. 50.000 ppm bei $180\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Betriebstemperatur bis $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ermöglicht gute Wärme- und Kältekopplung.

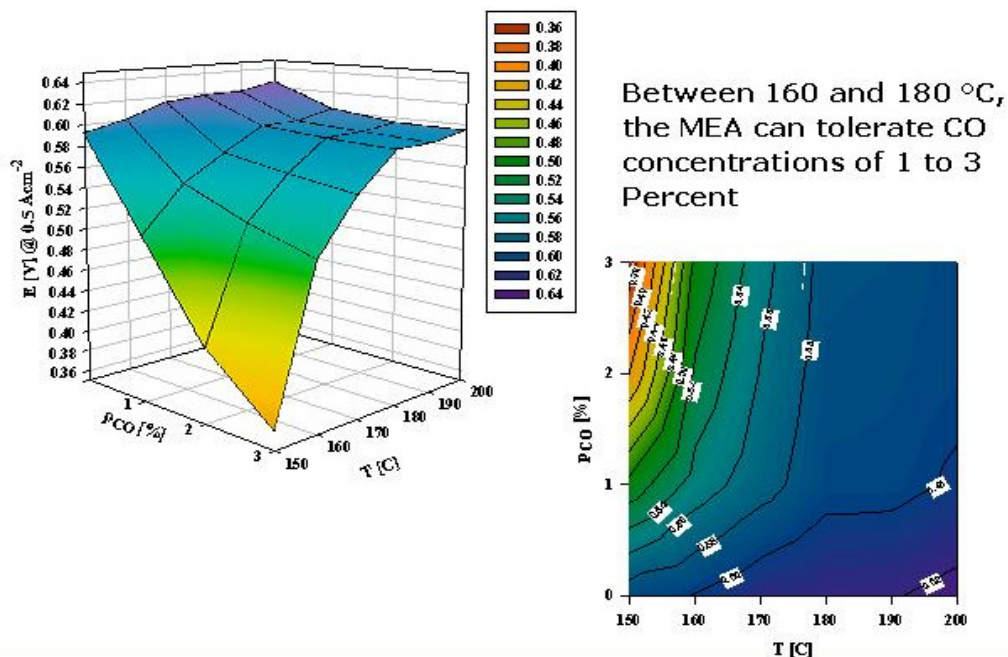


Abbildung 2: CO-Toleranz der CELTEC-P MEA von PEMEAS für Einzelzellen [3]

Wegen dieser Merkmale ergeben sich insbesondere hervorragende Möglichkeiten für den Einsatz der PBI-Membranen in stationären Brennstoffzellenanlagen, die z.B. mit Erdgas oder Biogas als Brennstoff betrieben werden, weil ganze Funktionsgruppen für die Befeuchtung und Gasreinigung wegfallen können. Weltmarktführer bei den PBI-Membranen ist die Firma BASF (früher PEMEAS).

Im Bereich der Forschung und Entwicklung von Brennstoffzellenstacks und Reformern für stationäre Anlagen in Verbindung mit Hochtemperaturmembranen auf

Polymerbasis nimmt die Firma Plug Power (USA) die Spitzenposition ein. Plug Power forscht und entwickelt seit mehreren Jahren in diesem Bereich. In Europa haben mehrere Unternehmen die Integration der HT-PEM-Membranen in ihre Systeme in Angriff genommen.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind folgende Probleme, die im vorliegenden Projekt bearbeitet wurden:

- Analysen von Hochtemperatur PEM MEAs,
- Industrieforschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Stack und zum Reformer,
- Systementwicklung.

Die Hauptziele dieser Arbeiten sind:

- ein Hochtemperaturstack für den Bereich von 160 – 180 °C,
- Steigerung der Brennstoff- und der elektrischen Effizienz,
- Vereinfachung des Reformers unter Nutzung der hohen CO-Toleranz der MEAs,
- Wegfall des Wassermanagements,
- Systemvereinfachung und Kostensenkung auf 4 bis 2 K€ pro kW ab 2010.

Unabhängig davon forschen weltweit viele Institutionen und Firmen an dieser Problematik (z.B.: Toyota, ZBT in Düsseldorf).

Das große Interesse an dieser innovativen Technologie resultiert vor allem daraus, dass die PBI-Membranen die Vorteile der höheren Temperaturen (hohe Schadstoffresistenz) mit den Vorteilen einer relativ einfachen Handhabung und unkomplizierter Peripherie miteinander verbinden. Abbildung 3 zeigt exemplarisch, welche Komponenten heutiger PEM-Brennstoffzellengeräte in der neuen Technologie entfallen können.

Stand der Technik auf dem Gebiet der Reformertechnologie

Reformersystementwicklung: Die Entwicklungsarbeiten in der Reformertechnologie konzentrieren sich auf zwei technologische Richtungen: die Partielle Oxidation und die Autotherme bzw. die Dampfreformierung. Schwerpunkt der Forschungen sind einerseits die Miniaturisierung von Katalysatorträgerstrukturen sowie andererseits die

Einbeziehung von alternativen Energieträgern wie Bio-Ethanol und Methanol [4]. Das technologische Schema bezieht sich nach wie vor auf die typischen Prozessstufen Reformierung, CO-Konvertierung und CO-Feinreinigung in unterschiedlicher energetischer Kopplung. Es sind den Antragstellern keine veröffentlichten Entwicklungsergebnisse von Reformerentwicklungen für PEMFC bekannt, die gezielt auf die Bedingungen von HT-PEM-Brennstoffzellen ausgerichtet sind. Lediglich die Gruppe um Plug Power hat sich öffentlich zu dieser System-Entwicklung bekannt.

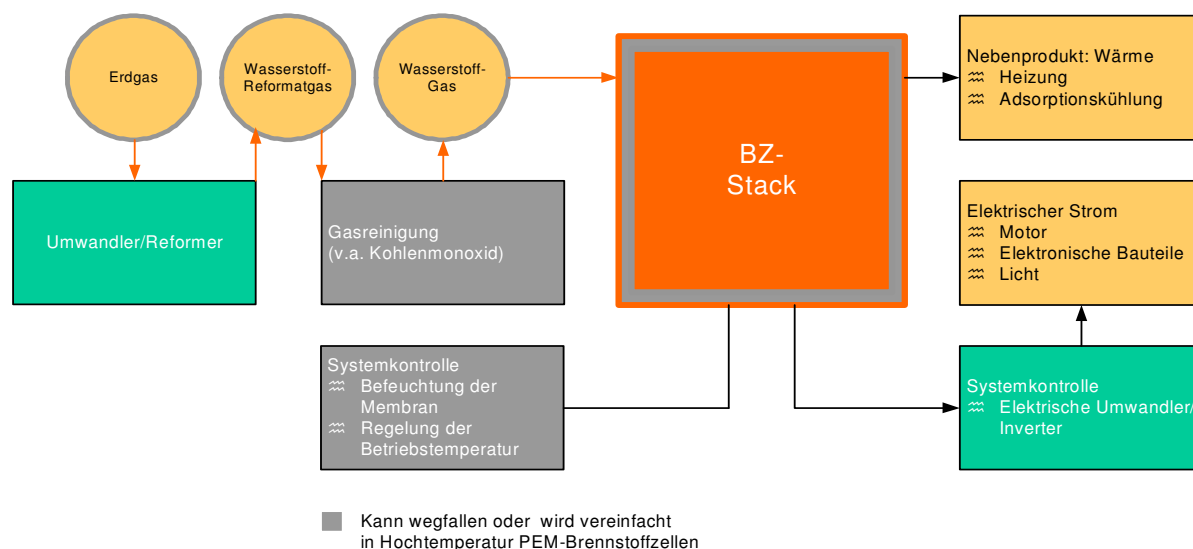


Abbildung 3: System-Vereinfachung durch HT-PEM-Brennstoffzellen

Katalysatorentwicklung: Aus eigenen Untersuchungen (TUBAF) ist bekannt, dass die meisten industriell verfügbaren Katalysatoren für die Methan-Reformierung im relevanten Temperaturbereich sehr hohe kinetische Aktivitäten besitzen. In realen Systemen werden diese Aktivitäten begrenzt durch einen unzureichenden Wärmetransport. Dies trifft besonders für Systeme mit einer Dampfreformierung zu, da die Reaktion durch ihre Endothermie selbst begrenzt wird. Aber auch innerhalb der CO-Konvertierung (exotherm) tritt eine Senkung des Umsatzes ein, da sich das thermodynamische Gleichgewicht bei höheren Temperaturen in Richtung CO verschiebt. Damit kommt den Trägerstrukturen des Katalysators eine sehr große Bedeutung zu. Eine interessante Entwicklung wurde bisher durch das Institut für Mikrotechnik Mainz (MIM) verfolgt. Es wurden Wärmeübertrager mit extrem kleinen Kanalstrukturen im Submillimeterbereich und einer katalytischen Beschichtung entwickelt [4]. Vorteil sind hohe Wärmeübertragungsraten und damit hohe Raumgeschwindigkeiten im Katalysator sowie kleine Baugrößen. Nachteilig wirken sich die sehr hohen Fertigungskosten und die teilweise hohen Druckverluste aus.

Beim Projektpartner TUBAF wurden die großen Fertigungsaufwendungen bisher umgangen, indem Standard-Wärmeübertrager mit einer katalytischen Beschichtung versehen wurden [5]. Vorteil sind kostengünstige Fertigungsverfahren bei gleichzeitig hoher Wärmeübertragung. Gegenstand im Projekt [5] waren die Entwicklung einer Beschichtungstechnologie und die Ermittlung der Umsatzraten in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen. Im Rahmen der Untersuchungen wurden bisher CO-Restgehalte von ca. 2,5 – 3% erreicht. Damit wird immer noch eine Niedertemperatur-Shift-Stufe notwendig. Begrenzt wurde der Umsatz durch die hohen Temperaturen, die sich im Systemverbund durch die Integration in den Reformier ergaben.

Steuerungs- und Regelungstechnik

Im Bereich der Steuerungs- und Regelungstechnik von Brennstoffzellensystemen werden derzeit vorrangig Arbeiten für Brennstoffzellen-BHKW im mittleren Leistungsbereich veröffentlicht (200 kW, MCFC). Gegenwärtige Entwicklungstrends sehen Reglerstrukturen mit Beobachtermodellen vor, um komplexe Zusammenhänge in messtechnisch schwer zugänglichen Systemen (z. B. BZ-Stacks) zu ermitteln und für die Führungsgrößenbildung von Einzelreglern bereitzustellen. Für kleine Brennstoffzellensysteme (Hausenergieversorgung) scheiterte diese Vorgehensweise, weil die dafür notwendige Rechenkapazität nicht ohne erhebliche Kosten auf üblichen Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) bereitgestellt werden kann. Alternativ wurden durch den Partner TUBAF Untersuchungen zu einem Mehrgrößenreglerkonzept zunächst für das Reformiersystem durchgeführt [6].

Grundsätzlich stoßen aber alle Konzepte auf Kapazitätsgrenzen der bisher verwendeten SPS, die nur durch erhebliche Kosten kompensiert werden können. Neue Entwicklungen auf der Seite der Steuerungshardware sehen eine verteilte Intelligenz aus Netzwerken von schnellen Hochleistungsmikrokontrollern vor. Dabei handelt es sich um moderne voll ausgestattete Prozessoren inkl. ihrer Peripherie (RAM, Kommunikationskontroller usw.) mit den für SPS üblichen analogen und digitalen IO-Bausteinen. Sie sind universell einsetzbar und können deshalb zu niedrigen Kosten bei hohen Stückzahlen produziert werden. Eine erste Anwendung stellt die bisher verwendete Einzelzellspannungsmessung für den Brennstoffzellenstack dar [7]. Der Einsatz dieser kostengünstigen Hardware setzt

aber voraus, dass neben den Steueralgorithmen auch die Reglerstrukturen, Führungsgrößengeneratoren oder Beobachter für diese verteilten Systeme geschaffen werden. Eine besondere Herausforderung ist die Entwicklung von Mehrgrößenreglern bzw. Zustandsreglern für eine verteilte Intelligenz, wie sie im Falle verkoppelter Regelkreise notwendig sein kann [6].

Stand der Technik bei Technologien zur Kälteerzeugung und Klimatisierung

Neben dem zunehmenden Klimatisierungs- und Kühlungsbedarf im industriellen und gewerblichen Bereich gewinnt auch die Klimatisierung im privaten Bereich an Bedeutung. Für den steigenden Bedarf können vor allem folgende Gründe hervorgehoben werden:

- Trend zur Glasarchitektur und damit höhere Wärmebelastung der Innenräume durch Sonneneinstrahlung,
- Klimatisierung von ausgebauten Dachgeschossen, die aufgrund ihrer Wärmedämmung und Dichtheit (verschärfte Wärmeschutzanforderungen durch EnEV) die Wärme im Sommer schlecht abgeben,
- Wachsende Komfortansprüche in öffentlichen Einrichtungen,
- Steigende innere Wärmebelastung durch elektronische Geräte,

Der sich abzeichnende Klimawandel (vermehrt heiße Sommer in unseren Breiten) führt zur Einführung der Klimatisierung als Standard.

Die weitere Verbreitung von Klimatisierungs- und Kälteanlagen erfordert den Einsatz umweltverträglicher Verfahren und Geräte. Bisher kommen zur Raumklimatisierung und Kälteerzeugung vor allem elektromotorisch betriebene Anlagen zum Einsatz. Gründe dafür bestehen in deren Einfachheit und der kostengünstigen Verfügbarkeit. Der Betrieb dieser Kompressionsanlagen führt zu einer Erhöhung der Stromkosten. Das Klimatisieren und Kühlen durch Nutzen von Abwärme stellt eine interessante Alternative dar.

Tabelle 1: Anhaltswerte für spezifische Kühllasten [W/m²]

Last	Tagungsraum vollklimatisiert [2 m ² /Person]	Büro vollklimatisiert [10 m ² /Person]	Büro teilklimatisiert [10 m ² /Person]	Wohnungen teilklimatisiert [10 m ² /Person]
Personen (trocken + feucht)	55	10	7	7
Beleuchtung	15	9	9	6
Maschinen / Geräte	5	10	10	5
Kühlung Außenluft (Wärmerückgewinnung)	35	7	3	3
Entfeuchtung Außenluft	27	6	-	-
Sonnenlast 10 13 13 13	10	13	13	13
Außenlast / Transmission	5	6	6	6
Gesamt	152	61	48	40

Technologien zur Kälteerzeugung und Klimatisierung, die auf Basis von Anfallwärme betrieben werden, können in folgende Verfahren unterschieden werden:

- Absorptionskältemaschinen,
- Adsorptionskältemaschinen,
- Dampfstrahlkältemaschinen,
- DEC – Verfahren.

Die Adsorptionskältemaschinen (AdKM) sind thermisch angetriebene Kälteanlagen und gehören zur Gruppe der periodisch arbeitenden Sorptionswärmepumpen. Sie wurden speziell für die Nutzung von Niedertemperatur- Abwärme entwickelt und können Kaltwasser (>5°C) für Klimatisierung und Kühlung mit einem optimalen Wirkungsgrad erzeugen.

Adsorptionskältemaschinen mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser – Silicagel können Antriebstemperaturen zwischen 55 und 95°C nutzen, wodurch sie beispielsweise für den Betrieb mit Abwärme von erdgasbetriebenen Brennstoffzellen- BHKW's eingesetzt werden können.

Eine in Abbildung 4 schematisch dargestellte Adsorptionskältemaschine besteht im Wesentlichen aus zwei mit Sorptionsmittel gefüllten Arbeitskammern (Adsorber) sowie einem Kondensator und einem Verdampfer. Als Sorptionsmittel wird Silicagel und als Kältemittel Wasser eingesetzt.

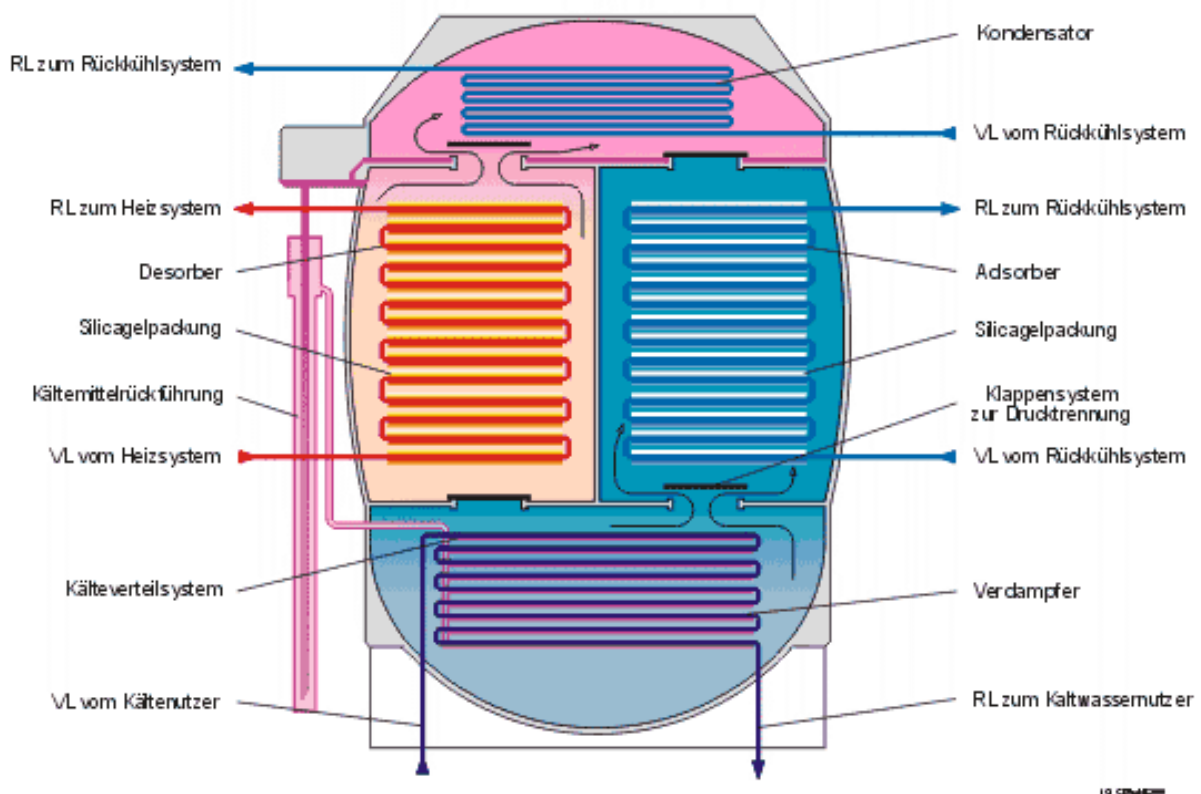


Abbildung 4: Prinzipdarstellung einer Adsorptionskältemaschine

Der Prozess ist diskontinuierlich und geschlossen. In einer Adsorptionskältemaschine laufen ständig zwei Prozesspaare gleichzeitig ab. Das erste Prozesspaar ist die Verdampfung des Kältemittels und Adsorption des entstehenden Kältemitteldampfes durch das Adsorptionsmittel. Das zweite Prozesspaar wird durch die Desorption des im Adsorptionsmittel gebundenen Kältemittels und nachfolgender Kondensation des entstehenden Dampfes gebildet. Trotz der Sättigungscharakteristik beider Prozesse ist ein quasikontinuierlicher Betrieb möglich, indem die Adsorber wechselseitig in die Prozesspaare geschaltet werden. Das erfolgt durch ein Umlenken des Heiz- und Kühlkreislaufs zwischen den beiden Kammern. Bei der Umschaltung der Maschine wird zur Vermeidung größerer Wärmeverluste das Heißwasser aus dem einen in den anderen Wärmeübertrager geleitet. Die prozessbedingt schwankende Temperatur des Kaltwasservorlaufes wird über einen entsprechend dimensionierten Speicher im Kaltwasserkreislauf ausgeglichen. Die Steuerung der Betriebszyklen der AdKM erfolgt rein hydraulisch mit Hilfe einer SPS.

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Möglichkeiten der Kopplung eines Hochtemperatur-PEM-Systems mit einer AdKM untersucht werden. Ziel ist es, die beim BZ-Betrieb anfallende Abwärme insbesondere in den Sommermonaten zur Klimatisierung zu nutzen. Dazu müssen die Leistungsgrößen (Leistung, Temperaturniveau, Volumenstrom) der AdKM so ausgelegt werden, dass eine optimale Kopplung mit der HT-PEM-Brennstoffzelle als Wärmequelle realisiert werden kann.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Regelmäßige Treffen mit den Projektpartnern gewährleisteten die Abstimmung der einzelnen funktionsübergreifenden Arbeitsetappen und den notwendigen Informationsaustausch. Daraus wurden die weiteren Arbeitsschritte der einzelnen Projektpartner im Gesamtsystem erörtert und festgelegt. Dies drückt sich in den entsprechenden Zwischenberichten aus.

Während des Projekts entstanden enge Zusammenarbeiten mit Zulieferfirmen wie beispielsweise Behr Industries (Herstellung Konditionierer), Umicore (Wärmeübertrager-Beschichtung und Katalysatoren), BASF (Katalysatoren und HT-PEM-MEAs) und NRC (Elastomere).

Durch Veröffentlichungen in Form von Vorträgen, Postern und sonstigen Fachbeiträgen werden gewonnene Erkenntnisse den einschlägigen wissenschaftlichen Netzwerken zugänglich gemacht. Hervorzuheben ist der jährliche Riesaer Brennstoffzellentechnik Workshop, auf dem neuste Erkenntnisse der Projektgruppe und anderer Entwicklungsgruppen vorgestellt werden. Durch die regelmäßige aktive Teilnahme an brennstoffzellenspezifischen Workshops sowie in Ausschüssen, beispielsweise initiiert von der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), vom Industriennetzwerk der VDMA Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzelle sowie vom VDI/VDE, beeinflussen die Projektpartner durch ihr Engagement auf ihrem jeweiligen Forschungsfeld den allgemeinen Entwicklungsstand und geben wichtige richtungweisende Impulse an Zulieferer, sowie andere Forschungseinrichtungen und leisten dadurch ihren Beitrag zum zügigen Markteintritt der Brennstoffzellentechnologie.

2. Darstellung der erzielten Ergebnisse

2.1 Kopplung von Adsorptionskälteanlagen und PEM-Brennstoffzellen (Arbeitspaket 8000)

Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) werden dazu verwendet, Primärenergie in thermische und elektrische Energie zu wandeln. Während die elektrische Energie in das öffentliche Stromnetz eingespeist oder für den Eigenbedarf verwendet wird, nutzt man die Wärme zur Raumbeheizung und Warmwasserbereitung. In den Sommermonaten ist im Allgemeinen der Heizbedarf gering bzw. nicht vorhanden. Der Warmwasserverbrauch reicht in der Regel nicht aus, um die produzierte Wärmemenge abzuführen. Deshalb wird untersucht, welche Möglichkeiten es gibt, die Abwärme einer HT-PEM-Brennstoffzellenanlage zur Raumklimatisierung zu nutzen. Der Vorteil, der sich von dieser Kraft-Wärme-Kälte Kopplungsanlage (KWKK) erhofft wird, ist eine effizientere Energieausnutzung sowie die Einsparung hochwertiger Elektroenergie. Ist die Kopplung von Kälteanlage und Brennstoffzelle erfolgreich, könnte dies zu einem erhöhten Interesse an dieser innovativen Technologie bei potenziellen Investoren führen, auch wenn die Investitionskosten für ein solches Vorhaben über denen für eine konventionelle Raumklimatisierung liegen.

2.1.1 Stand der Technik

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine umfangreiche Recherche auf dem Kältemaschinenmarkt durchgeführt. Da der Fokus auf Geräten liegt, die Kälte mit Hilfe von Abwärme erzeugen können, wurden Kompressionskältemaschinen nicht näher untersucht. Die Randbedingung für die Kältemaschinen war, dass sie eine maximale Kälteleistung von 10 kW besitzen. Der Grund dafür ist, dass das Brennstoffzellensystem nur eine begrenzte thermische Leistung zur Verfügung stellt. Die Erfahrung zeigt, dass entsprechende Kälteanlagen (Ab- bzw. Adsorptionskältemaschinen) einen COP von etwa 0,7 besitzen. Das bedeutet, dass für die gewünschte Kälteleistung von 10 kW eine Heizleistung von etwa 15 kW bereitgestellt werden muss. Diese Wärmeleistung kann von der konzipierten HT-PEM Brennstoffzellenanlage bereitgestellt werden.

Durch diese Einschränkung begrenzte sich die Anzahl relevanter Anbieter, da die marktbeherrschenden Anbieter wie York (Johnson Controls), Trane oder Carrier in

erster Linie Geräte in einem sehr hohem Leistungsbereich anbieten. Diese konnten daher keine Berücksichtigung finden.

Es verblieben fünf Hersteller von Absorptionskältemaschinen sowie zwei Hersteller von Adsorptionskältemaschinen, welche in nachstehender Tabelle 2 mit Kälteleistung, Richtpreis und Status der Serienreife dargestellt sind.

Tabelle 2: Überblick über verfügbare Kältemaschinen im kleinen Leistungsbereich bis 15 kW

Anbieter	Status	Kälteleistung	Preis
Absorptionskältemaschinen			
EAW Energieanlagenbau	Serienfertigung	15	22.000 €
Sonnenklima	Kleinserie	10	25.000 €
Rotarica	Kleinserie	4,5	10.000 €
ClimateWell	Kleinserie	10	k.A.
Hochschule für Technik Stuttgart	Prototyp	2,5	k.A.
Adsorptionskältemaschinen			
Sortech AG	Prototyp	5,5	k.A.
InvenSor	Entwicklung	10-20	k.A.

Für die Erstellung des Konzeptes wurden die Anlagendaten einer Absorptionskälteanlage vom Typ WEGRACAL SE 15 des Herstellers Energieanlagenbau Westenfeld (EAW) verwendet, da diese Anlage sich bereits im Status einer serienreifen Anlage befindet.

Abbildung 5 zeigt ein Foto des Prototyps dieser Anlage mit den beiden typischen runden Druckbehältern für die unterschiedlichen Druckstufen von Austreiber und Absorber.



Abbildung 5: Absorptionskälteanlage vom Typ WEGRACAL SE 15

2.1.2 Konzepte

Ziel des Konzeptes ist es, das Zusammenwirken zwischen Kältemaschine und Brennstoffzelle (sowohl HT-PEM- Brennstoffzellenanlagen als auch NT-PEM- Brennstoffzellenanlagen) zu optimieren. Die Brennstoffzelle wird dabei als eine Black Box angenommen. Das bedeutet, dass lediglich die für die Kältemaschine relevanten Parameter beachtet werden. Dabei handelt es sich um die Ein- bzw. Ausgangstemperaturen des Kühlfluides.

Das Kühlfluid von HT-PEM-BZ- Anlagen besitzt eine Temperatur von ca. 160°C und liegt als Thermoöl vor. Im Gegensatz dazu befinden sich bei NT-PEM-BZ- Anlagen die Arbeitstemperaturen auf einem Niveau von ca. 60°C. Dies erschwert die Verwendung als Heizmedium für eine Absorptionskältemaschine, da deren Heiztemperatur in der Regel bei 80°C liegt. Eine zuverlässige Funktion der Kältemaschine kann damit nicht mehr gewährleistet werden. Um eine NT-PEM- Brennstoffzelle sinnvoll mit einer Absorptionskältemaschine zu betreiben, muss das Abgas des Reformers mit einem Temperaturniveau von ca. 250 °C genutzt werden um die Kühlmitteltemperatur auf über 80 °C anzuheben. Dazu ist ein entsprechender

Wärmeübertrager vorzusehen. Die Analyse der NT-PEM-Abwärme wurde innerhalb des Projektes zum Vergleich aufgenommen.

Bei der Erstellung der Konzepte und der Berechnung der Medientemperaturen und Volumenströme wurde als Absorptionskältemaschine die Anlage Wegracal SE 15 angenommen, welche mit dem Arbeitsmedium Wasser und Lithiumbromid betrieben wird.

Wie aus Abbildung 6 deutlich wird, beinhaltet das Konzept die folgenden Hauptelemente:

1. Brennstoffzellenheizgerät,
2. Kälteanlage,
3. Pufferspeicher,
4. Kälteverbraucher,
5. Kühler.

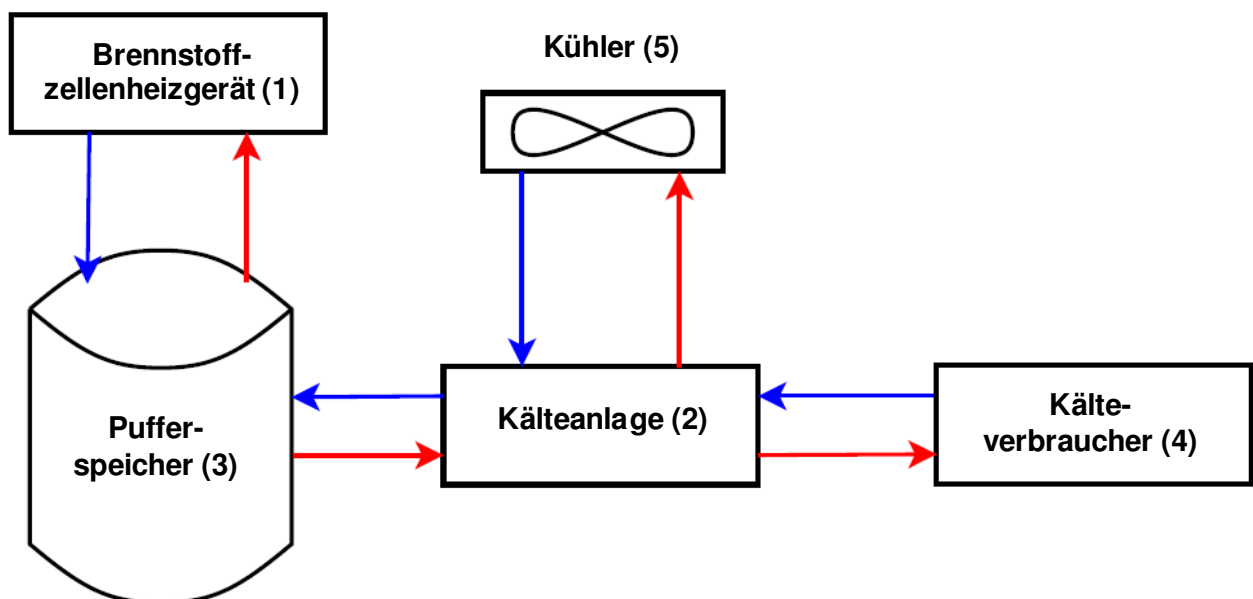


Abbildung 6: Einbindung der Kältemaschine mit einem Pufferspeicher

Bei dem System handelt es sich um geschlossene Kreisläufe, die zum Ausgleich von schwankendem Wärme- und Kältebedarf eine Medium (Warmwasser/Thermoöl) dient zur Beheizung des Pufferspeichers. Die Kälteanlage entnimmt bei Bedarf dem Pufferspeicher das heiße Medium und treibt damit die Absorptionskältemaschine an.

Abbildung 7 zeigt das Einbindekonzept für eine HT-PEM-Brennstoffzellenanlage. Die Komponenten der Absorptionskältemaschine sind dabei hellblau hinterlegt. Innerhalb

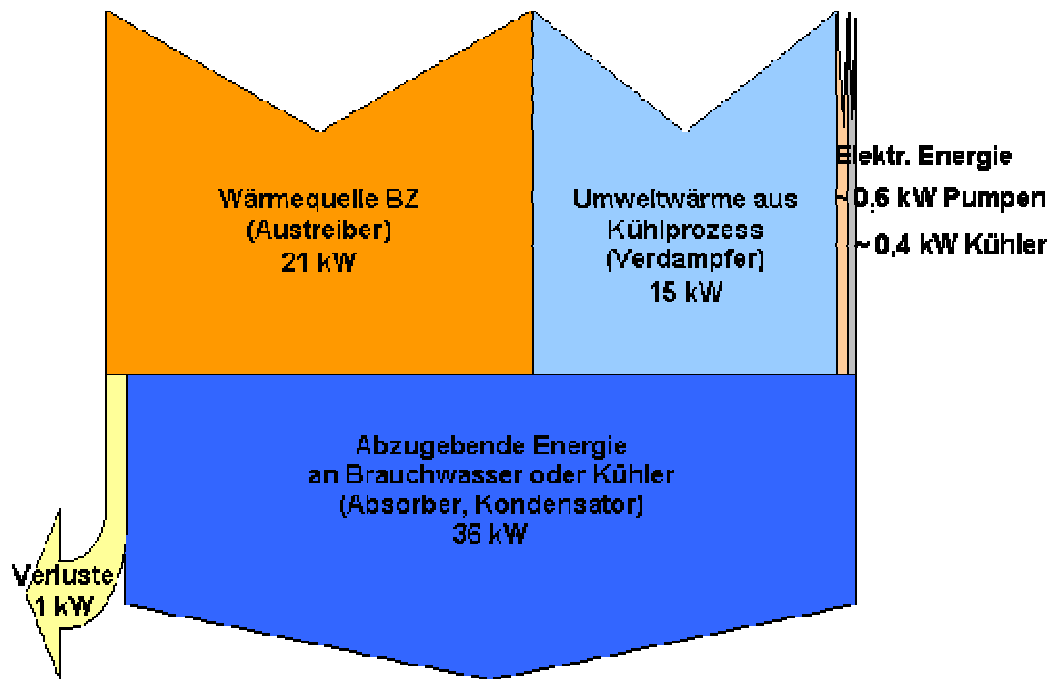


Abbildung 8: Energiebilanz für die Absorptionskältemaschine Wegracal SE15

Um den Energiefluss des Gesamtsystems besser darstellen zu können, wurde ein Sankey-Diagramm mit der Energiebilanz erstellt (Abbildung 8). Es verdeutlicht, dass in das System 21 kW Heizleistung aus der Brennstoffzelle eingebracht werden, die für den Austreiber benötigt werden. Zusätzlich werden 15 kW Kälteleistung, also die Wärme die dem zu kühlenden Raum entzogen wird, eingebracht. Die Gesamtenergie 36 kW können zur Brauchwassererwärmung genutzt werden oder müssen über einen Kühler an die Umgebung abgegeben werden. Der Aufwand an elektrischer Energie wird mit 1 kW veranschlagt. Dabei werden 600 W für den Antrieb der Pumpen sowie 400 W für den Ventilator des Kühlers aufgewendet.

Für ein solches Kühlsystem wurde eine grobe Kostenschätzung aufgestellt. Die Kosten, siehe Tabelle 3, für die beschriebenen Komponenten belaufen sich auf ca. 29.000 €. Der überwiegende Anteil dieser Kosten ist der Investitionsbedarf für die Kältemaschine.

Tabelle 3: Kostenaufstellung zur Kopplung einer Kälteanlage mit einer Brennstoffzelle

Pos.	Bezeichnung	Hersteller	Typ	Anz.	Stückpreis	Gesamtpreis (ohne MwSt.)
1	Kältemaschine	EAW	Wegracal SE15	1	22.000,00 €	22.000,00 €
2	Schichtenspeicher	Sailer GmbH	KDO PS 1000-E	1	1.820,00 €	1.820,00 €
3	Kühlturm	Axima	EWK 036/06	1	3.000,00 €	3.000,00 €
4	Pumpen	Wilo	Stratos ECO-Z 25/1-5	4	300,00 €	1.200,00 €
5	Wärmeübertrager	Funke	GPL 4-20	1	159,00 €	159,00 €
6	Rohrmaterial			1	500,00 €	500,00 €
					Summe	28.679,00 €
					inkl. MwSt.	34.128,01 €

Zu beachten ist, dass die Kosten für ein System zur Kälteverteilung, was mit klimatechnischen Komponenten wie z.B. Gebläsekonvektoren oder Kühldecken erfolgt, noch nicht berücksichtigt wurden. Eine pauschale Abschätzung dieser Kosten ist schwierig, da diese von vielen Parametern am jeweiligen Standort abhängig sind. Das Wärme- und Kälteverteilungs-system ist damit nicht Gegenstand der Untersuchungen.

2.1.3 Fazit / Zusammenfassung

Es wurde im Rahmen dieser Arbeit die Nutzung der Abwärme einer HT-PEM-Brennstoffzelle zur Raumklimatisierung untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass es bisher kein veröffentlichtes Konzept zur Kopplung einer Brennstoffzelle mit einer Absorptionskältemaschine gibt. Die Recherche nach kommerziell erhältlichen Kältemaschinen, die auf Abwärmebasis arbeiten, war quantitativ erfolgreich. Dominierend in diesem Bereich sind geschlossene Systeme, wobei sich in diesem Bereich besonders Absorptionskältemaschinen durchgesetzt haben.

Praxiserprobte Absorber konnten in der definierten Leistungsklasse nicht eruiert werden. Nur die Firma Energieanlagenbau Westenfeld hatte derzeit mit einer Absorptionskälteanlage vom Typ WEGRACAL SE 15 eine qualitativ geeignete Anlage im Portfolio. Für den Anschluss an das in diesem Projekt vorgesehene Brennstoffzellensystem mit ca. 10 kW Heizleistung wären in jedem Fall Anpassungen notwendig. Nach dem in Abbildung 7 dargestellten Konzept könnte so eine Kälteleistung von ca. 7 kW und zur Brauchwassererwärmung max. 17 kW bereitgestellt werden.

Energetisch betrachtet ist es anzustreben, ein möglichst hohes Temperaturniveau für den Austreiber der Absorptionskältemaschine bereitzustellen. Da die beiden anderen

Temperaturniveaus, nämlich die des Kühlsystems und die des Kaltwassers, von der Heiztemperatur abhängen, könnte dadurch eine Verbesserung im Bereich der Kühlung der Anlage erzielt werden. Indem man die Temperatur erhöht, steigt auch das Temperaturniveau des Rückkühlers. Dieser kann dann als Trockenkühler ausgeführt werden und arbeitet dann auch an heißen Tagen zuverlässig. Durch die Entschärfung der Kühlproblematik kann die Gesamtperformance der Anlage verbessert werden, was die Attraktivität bei möglichen Interessenten erhöht. Da Kenntnisse im Bereich von 150°C für den Austreiber einer Absorptionskältemaschine bisher in ausreichendem Maße nicht existieren, ist hier ein entsprechender Forschungsbedarf zu definieren.

2.2 Brennersystem (Arbeitspaket 9000)

2.2.1 Aufgabenstellung für den Brenner

Gemäß dem erstellten Brennerkonzept sollen alle während des Anlagenbetriebes anfallenden Gase (Reformatgas und Anodenrestgas) im Reformerbrenner genutzt werden. Ziel war es, alle Gase direkt zur Reformerbeheizung zu nutzen, um somit den Erdgasverbrauch der Anlage zu reduzieren und dadurch den elektrischen Wirkungsgrad des Brennstoffzellen-BHKW deutlich zu erhöhen.

Während des Betriebes der Anlage treten mehrere unterschiedliche Gasarten und Gemische auf.

1. Erdgas:

Aus dem Kaltzustand wird der Reformier mit dem Verdampfer zunächst mit Erdgas auf Betriebstemperatur gebracht. Während dieser Zeit wird kein Erdgas reformiert.

2. Reformatgas:

Haben Reformier und Verdampfer eine Mindesttemperatur erreicht, kann Erdgas und Wasserdampf in den Reformier eingeleitet und reformiert werden. Das so erzeugte Reformatgas besitzt nicht sofort die erforderliche Qualität für den Brennstoffzellenstack. Bis zum Erreichen der korrekten Qualität wird ausschließlich das anfallende Reformatgas (ca. 70 % H₂) dem Brenner zugeführt und die nachgeschalteten Gasreinigungsstufen auf Betriebs-

temperatur gebracht. Dadurch wird der Erdgasbedarf für die Reformerbeheizung während des Aufheizprozesses deutlich reduziert.

3. Restgas und Restgas + Erdgas:

Wenn alle Baugruppen ihre Betriebstemperatur und das Reformatgas die notwendige Gasqualität erreicht haben, kann die Brennstoffzelle zugeschaltet und Strom ins Netz eingespeist werden. Jetzt wird das Restgas der Brennstoffzelle mit einem Wasserstoffanteil um 30 % zur Reformerbeheizung genutzt, zusätzlich wird Erdgas als Regelenergie verwendet.

Die wesentlichen Parameter zum Betrieb des Brenners wurden folgendermaßen definiert:

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

Eine wesentliche Herausforderung an den Brenner ist die Realisierung einer stabilen Verbrennung verschiedener Gasarten. Die unterschiedlichen Gase müssen bei allen Betriebspunkten der BZ- Anlage zuverlässig und emissionsarm verbrannt werden.

Tabelle 4: Brenngasarten in Abhängigkeit vom BZ- Betriebspunkt

Betriebspunkt Brennstoffzellenanlage	anstehende Gasart
Kaltstart	Erdgas
Reformer- Aufheizbetrieb	Reformatgas
Reformer- Warmhaltebetrieb	Reformatgas
Brennstoffzellenregelbetrieb	Anodenrestgas & Erdgas

2.2.2 Erwartete Gaszusammensetzung des HT- PEM- BZ- Stacks

In der folgenden Tabelle 5 sind die wesentlichen brenntechnischen Kennwerte der zum Einsatz kommenden Gas aufgelistet.

Tabelle 5: Brenntechnische Kennwerte der zu verbrennenden Gasqualitäten

Gasart		Erdgas	Reformatgas	Anodenrestgas
Gaszusammensetzung		Erdgas H	H ₂ : 77% CO ₂ : 20% CH ₄ : 2% CO: 1%	H ₂ : 27% CO ₂ : 65% CH ₄ : 5,5% CO: 2,5%
Normdichte:	kg/m ³	0,78	0,49	1,38
Dichteverhältnis:		0,60	0,38	1,07
Brennwert:	Wh/m ³	11.449	2.982	1.652
Heizwert:	Wh/m ³	10.337	2.541	1.445
oberer Wobbe-Index:	Wh/m ³	14.714	4.838	1.599
unterer Wobbe-Index:	Wh/m ³	13.264	4.122	1.399
Mindestluftbedarf:	m ³ /m ³	9,90	2,05	1,23
Flammengeschwindigkeit:	cm/s	43	143	51,7

Die in Tabelle 5 dargestellten Kennwerte sind zumindest für das Reformatgas und das Anodenrestgas Richtwerte auf dem Basis die folgenden Untersuchungen durchgeführt wurden. Unter realen Bedingungen ändert sich die Reformatgaszusammensetzung in Abhängigkeit von Reformertemperatur, S/C- Verhältnis und Katalysatorzustand. Die Anodenrestgaszusammensetzung wird im Wesentlichen durch die Änderung der Brennstoffzellenstöchiometrie beeinflusst. Bei höherer Brennstoffüberströmung des Stacks steigt der Wasserstoffgehalt im Restgas.

2.2.3 Konstruktive Lösungen zum Brenner

Wie bereits im Vorgängerprojekt wurde auf das Prinzip eines Oberflächenbrenners gesetzt. Oberflächenbrenner haben den Vorteil, dass sie durch eine flächige Flamengestaltung eine vergleichsweise niedrige Leistungsdichte und geringe

Flammentemperatur besitzen. Die Brennoberfläche hat typischer Weise eine Temperatur oberhalb der Entzündungstemperatur der Brenngase. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen haben Oberflächenbrenner sehr geringe Schadstoffemissionen. Gleichzeitig ist eine hohe Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion gegeben. Nachteil der Oberflächenbrenner ist ihre Empfindlichkeit gegenüber Rückschlag insbesondere bei Gasen mit hoher Flammgeschwindigkeit wie bei Reformatgas (s. Tabelle 5).

Aufgrund der sich sehr stark ändernden verbrennungstechnischen Eigenschaften der verschiedenen Gase, siehe Tabelle 5, wurde der Brenner in verschiedene Sektoren unterteilt. Im ersten Sektor wird ein vorgemischtes Erdgas-Luft-Gemisch durch die Brennerplatte in den Brennraum geleitet und verbrannt. Im zweiten Sektor erfolgt die Verbrennung von Reformatgas bzw. Restgas nach dem Mündungsmischprinzip – getrennte Zuleitung der Gase durch die Brennerplatte und Mischung erst im Brennraum. Damit wird zuverlässig das Rückschlagen der Wasserstoffflamme verhindert. Dieses Konzept wurde an einem Brennermodell am Versuchsstand hinsichtlich der Eignung als Reformerbrenner untersucht. In der folgenden Abbildung 9 sind die beiden Sektoren gut zu erkennen. Hierbei wurde der Brenner am Versuchsstand im Freibrand betrieben und im äußeren Bereich das vorgemischte Erdgas und im inneren Bereich Anodenrestgas verbrannt.

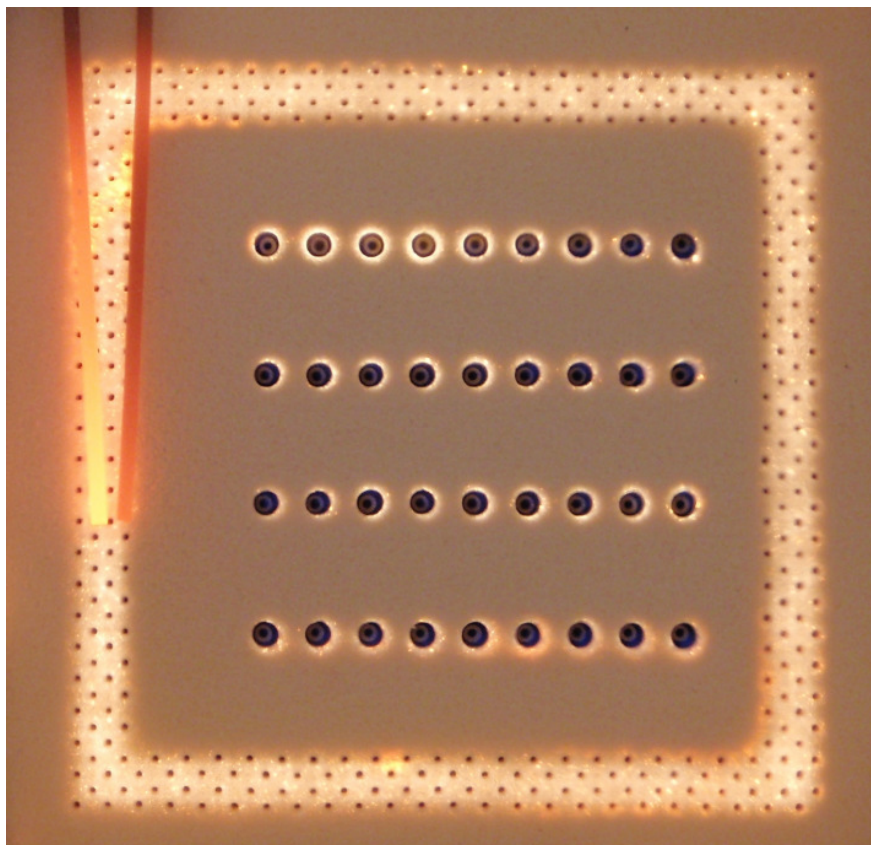


Abbildung 9: Betrieb des Brenners mit Erdgas und Anodenrestgas am Versuchsstand

2.2.4 Gasversorgung und Sicherheitseinrichtungen

Bei der Realisierung der Gasregelstrecke wurde einmal mehr deutlich, dass bei der Zulieferindustrie nicht alle benötigten Komponenten zur Verfügung stehen. Die am Markt verfügbaren konventionellen Gasarmaturen sind nicht für den angestrebten Modulationsbereich des Brenners geeignet. Insbesondere im unteren Leistungsbereich des Brenners war eine stabile Gemischbildung zunächst nicht möglich. Erst durch den Einsatz eines kleineren Lüfters und Modifikation der Gasarmatur konnte der gewünschte Regelbereich des Brenners auf 25 % der Nennleistung realisiert werden.

Im Laufe dieser Entwicklung wurden verschiedene Kombinationen von Lüftern und Gasarmaturen unterschiedlicher Hersteller am Versuchsstand getestet. Außerdem wurden unsere Anforderungen an die Komponenten mit den Zulieferfirmen diskutiert, mit dem Ergebnis, dass auch dort an der Verbesserung dieser Bauteile gearbeitet wird.

Ein besonderes Problem bei der Verbrennung von wasserstoffhaltigem Gas ist die zuverlässige Überwachung der Flamme, gerade bei wechselnden Gaszusammen-

setzungen. Die DIN EN 746 Teil 2 schreibt für industrielle Thermoprozessanlagen zwingend eine Abschaltung von Brennern im Falle eines Ausfalls der Flamme vor. Dazu werden in den Normen DIN EN 125 und DIN EN 298 die Anforderungen an den Bau und die Funktion, an Prüfverfahren und die Kennzeichnung von Feuerungsautomaten sowie Steuergeräten und den zugehörigen Flammenwächtern festgelegt.

Eine Flammenüberwachung bei der Verbrennung von wasserstoffhaltigen Gasen im industriellen Maßstab wird in der Regel über eine Temperaturmessung im Brennraum realisiert. Diese Art der Flammenüberwachung ist jedoch träge und für geschlossene Verbrennungsräume ungeeignet. Insbesondere dann, wenn im Verbrennungsraum grundsätzlich hohe Temperaturen herrschen und durch Einbauten auch nach dem Flammenausfall hohe Temperaturen längere Zeit bestehen bleiben. Dies führt zu Verzögerungen bei der Unterbrechung der Gaszufuhr durch Flammenausfall und ist ein Sicherheitsrisiko.

Die für viele andere Brennersysteme weit verbreitete Ionisationsüberwachung ist ein relativ einfaches, kostengünstiges und bewährtes Verfahren, welches die elektrische Leitfähigkeit von Flammen ausnutzt. Bei der Überwachung wird die Gleichrichterwirkung der Flamme ausgenutzt. Eine Wechselspannung wird an ein Elektrodenpaar gelegt, und die Flamme stellt die elektrische Verbindung her. Die Stromstärke ist abhängig von der Höhe der angelegten Spannung, von der geometrischen Form von Kathode und Anode, deren Abstand zueinander sowie von dem eingesetzten Brennstoff.

Die Ionisationsstromüberwachung weist gerade im Falle von wasserstoffhaltigen Gasen Schwächen auf, weil die Konzentration der in der Flamme befindlichen Ionen sehr klein ist. Bei den üblichen Elektrodengeometrien liegt der Ionisationsstrom bei der Verbrennung von wasserstoffhaltigen Gasen mit den verfügbaren Messsystemen unterhalb der Nachweisgrenze.

Am Versuchsstand wurden die verschiedenen Überwachungssysteme hinsichtlich Ihrer Eignung für den Reformerbrenner untersucht. Hinsichtlich Zuverlässigkeit und Kosten wurde für den Reformerbrenner eine kombinierte Zünd- und Überwachungseinrichtung favorisiert. In der Zone des Erdgasvormischbrenners wird der Brenner gezündet und mittels Ionisationsstrommessung überwacht. Die wasserstoffhaltigen Gase fallen erst an, wenn der Reformier bereits seine Betriebstemperatur erreicht hat, werden dann dem Brenner zugeführt und entzündet

sich am Erdgasbrenner. Für den Betrieb des Reformers mit Reformat oder Restgas wurde eine zusätzlich Temperaturüberwachung in der Brennkammer integriert. Dies ist möglich, da die Betriebstemperatur in der gesamten Brennkammer über der Zündtemperatur liegt.

Neben der Flammenüberwachung ist der Brenner mit einer thermischen Rückschlag-sicherung ausgerüstet.

2.2.5 Betriebserfahrungen

Der Brenner wurde erfolgreich mit unterschiedlichen Gaszusammensetzungen im gesamten Leistungsbereich von 2 bis 10 kW getestet. In Tabelle 6 ist das Versuchsprogramm für das Brennersystem zusammengestellt.

Tabelle 6: Versuchsprogramm Brennerprüfung

Brennerleistung	2 kW		5 kW		10 kW	
	24 h	500 h	24 h	500 h	24 h	500 h
Erdgas (100% CH ₄)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Anodenrestgas (30% H ₂)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Reformatgas (70% H ₂)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

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.

Nach der Erprobungsphase am Brennersversuchsstand wurde der Brenner am Prüfstand nach DIN EN 437 mit den für eine Zertifizierung vorgeschriebenen Grenzgasen getestet und die Emissionswerte ermittelt. Die Ergebnisse sind in

Tabelle 7 dargestellt.

Das entwickelte Brennkonzzept funktioniert in allen Betriebszuständen zuverlässig und gewährleistet eine sichere Fahrweise des Reformers. Die Abgasemissionen liegen deutlich unterhalb der Grenzwerte des Prüfsiegels „Blauer Engel“ und sind auch für die zukünftig zu erwartenden Reduzierungen der Emissionsgrenzwerte ausreichend.

Tabelle 7: 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} [Vol. %]
G 20	Kleinbrand	20	7,79	20,7	20,6	1,57	2,3	7,3	7,2
Hs=11,060 kWh/m ³	Großbrand	20	7,62	20,7	20,5	1,52	3,2	8,1	7,4
p _{Atmosphäre} =994 mbar		25	7,51	20,7	20,5	1,49	3,4	8,0	7,5
		17	7,76	20,7	20,6	1,55	3,3	8,4	7,3
G 231	Kleinbrand	20	9,21	20,7	20,7	1,72	1,7	3,3	6,4
Hs=9,400 kWh/m ³	Zünden im warmen und kalten Zustand i.O., kein Abheben der Flamme								
p _{Atmosphäre} =994 mbar	Großbrand	20	10,01	20,7	20,7	1,84	1,6	2,8	6,1
G 222	Kleinbrand	20	7,98	20,7	20,7	1,52	1,9	5,3	6,8
Hs=9,330 kWh/m ³	kein Rückschlagen der Flamme im warmen und kalten Zustand								
p _{Atmosphäre} =994 mbar	Großbrand	20	8,09	20,7	20,7	1,61	3,6	8,3	6,6
G 21	Kleinbrand	20	6,33	19,9	19,8	1,40	4,9	13,7	8,4
Hs=13,300 kWh/m ³		25	6,21	19,9	19,8	1,33	6,1	15,1	8,5
p _{Atmosphäre} =994 mbar	Großbrand	20	6,41	20,0	19,8	1,39	5,9	14,6	8,3

2.3 Abgaswärmeübertragung (Arbeitspaket 9060)

2.3.1 Konzept und Aufbau eines Versuchsstandes

Da die HT-PEM- Brennstoffzelle im Temperaturbereich bis zu 200 °C arbeitet, kann zur Kühlung kein Wasser wie bei NT-PEM- Brennstoffzellen verwendet werden. Daher musste untersucht werden, welche Alternativen zur Kühlung des Stacks realisierbar sind. Es wurde ein Konzept zur Kühlung der HT-PEM- Brennstoffzelle mittels Thermoöl entwickelt. Um belastbare Ergebnisse zu erhalten wurde ein in Abbildung 10 als Fließschema dargestellter Versuchsstand konzipiert und aufgebaut, an dem Thermoöl als Kühlmittel getestet werden konnte.

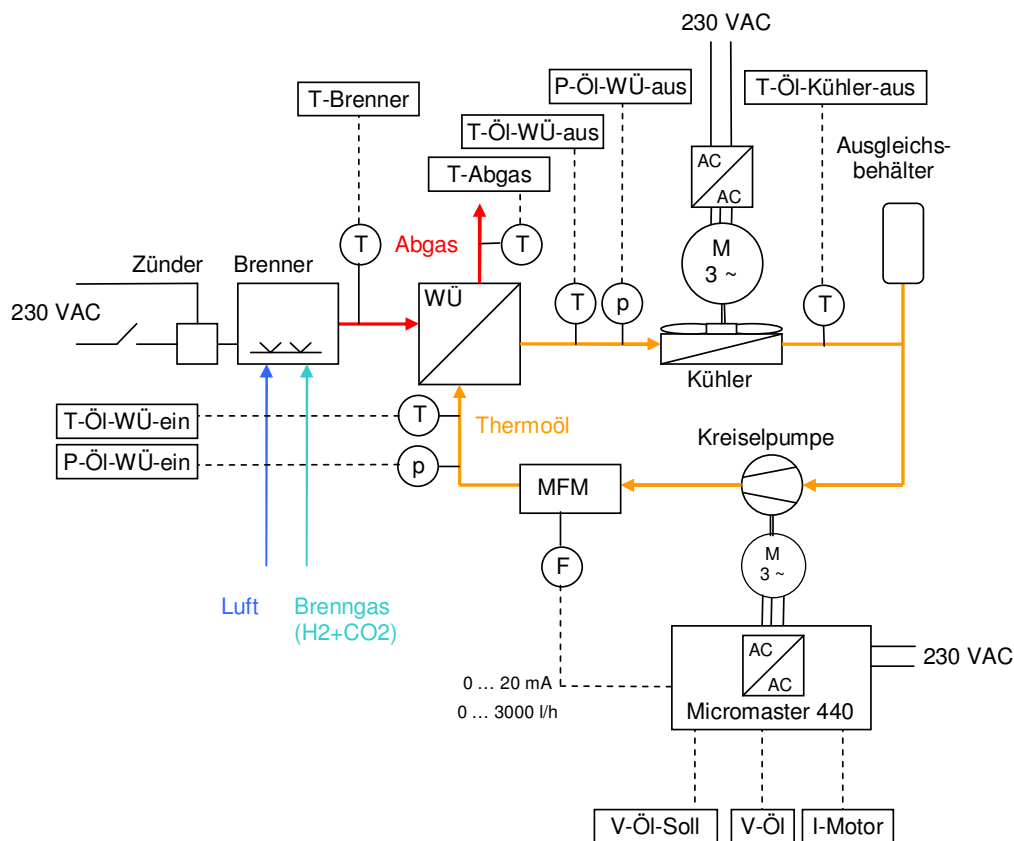


Abbildung 10: Fließschema Thermoölprüfstand

Das Thermoöl wird beginnend, bei der Kreiselpumpe zuerst durch den Durchflussmesser und nachfolgend durch den Wärmeübertrager gefördert. Im Wärmeübertrager ist ein regelbarer Brenner integriert, in dem das aus dem Stack anfallende Anodenrestgas zur Erwärmung des Thermoöls genutzt wird. Danach gelangt das Thermoöl in einen Kühler, wo es heruntergekühlt und anschließend

wieder der Kreislampe zugeführt wird. Durch das angeschlossene Ausgleichsgefäß ist sicher gestellt, dass sich das Öl beim Erwärmen ausdehnen kann, was nötig ist, da es pro 100K 10% an Volumen zunimmt.

Ziel der Versuche war es, neben der Untersuchung eines geeigneten Thermoöls auch die Komponenten zu testen, welche zum Betrieb dieses Kühlkreislaufes benötigt werden. Im Unterschied zu einem herkömmlichen Wasserkühlkreis müssen alle Komponenten für einen Temperaturbereich bis 200 °C ausgelegt sein. Die regelbare Kreislampe der Firma Speck Pumpen kann bis zu einer Grenztemperatur von 350 °C mit Thermoöl betrieben werden. Ein limitierender Faktor am Versuchsstand war der Ringkolbenzähler „Contoil VZF 25 FI“ der Firma „aqua metro“, der Durchflüsse bis 2000 l/h viskositätsunabhängig messen kann. Dessen Grenztemperatur ist mit 180 °C angegeben, was die maximale Vorlauftemperatur des Thermoöls am Versuchsstand definiert.

Die nachfolgenden Abbildung 11 zeigt den Versuchsstand mit seinen Einzelkomponenten und sowie eine Schnittdarstellung des Abgaswärmeübertrager.

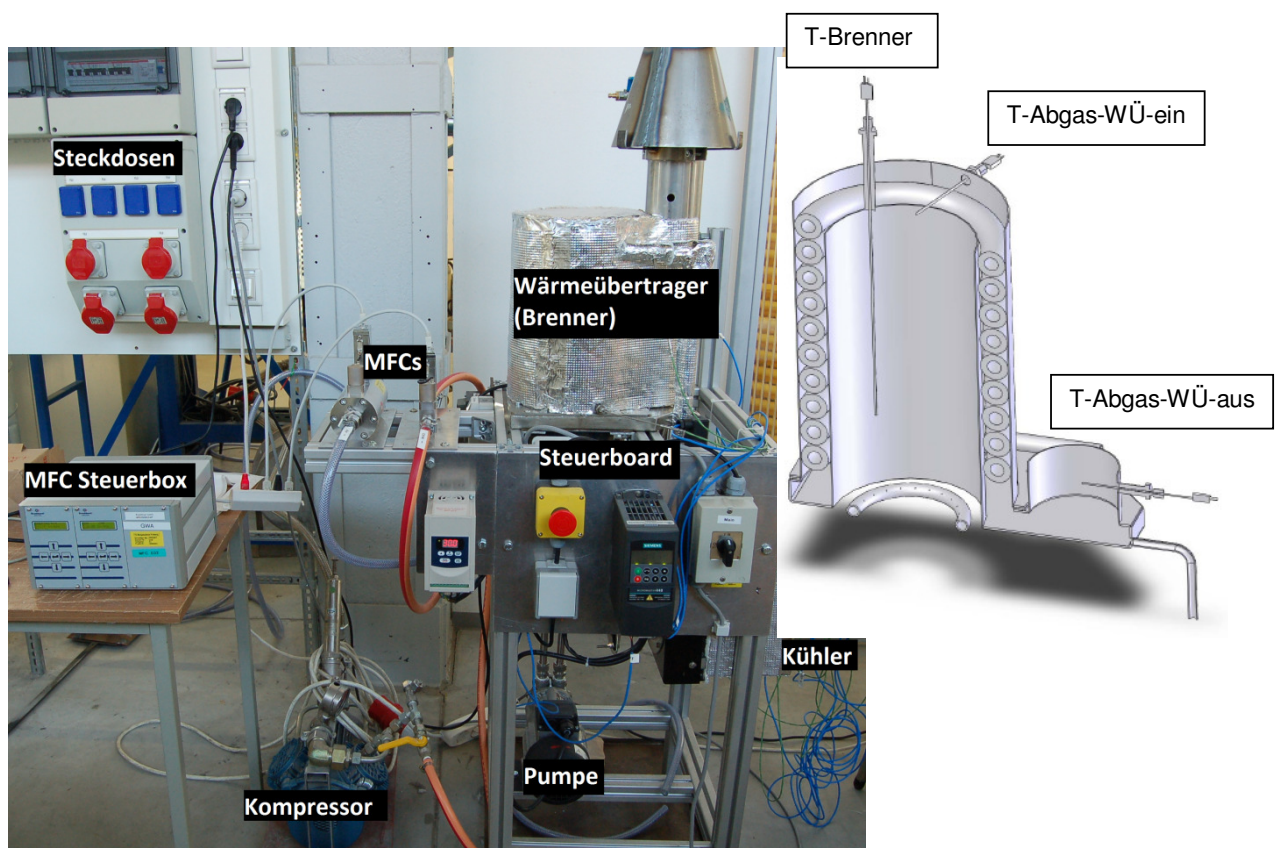


Abbildung 11: Thermoölversuchsstand mit Schnittdarstellung der Wärmeübertragereinheit

Das Thermoöl hat auf das Volumen bezogen ziemlich genau die halbe Wärmespeicherfähigkeit von Wasser. Da aber die Temperatureinsatzgrenzen viel höher liegen, kann das oft durch eine höhere Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf ausgeglichen werden. Jedoch können Thermoöle durch Überhitzung durchaus zerstört werden. Preisgünstige Öle auf Mineralölbasis erlauben aber bereits Betriebstemperaturen bis etwa 300 °C bei Standzeiten von 10 Jahren und mehr. Hochwertige synthetische Öle erlauben Betriebstemperaturen bis 400 °C.

Für den Versuchsstand wurde das Thermoöl UCOTHERM® S-15-A der Firma Fragol ausgewählt, da dies nach Angaben des Partners inhouse engineering für den Einsatz im Stack geeignet ist. Dieses Thermoöl kann im Temperaturbereich (Vorlauftemperatur) von -20 bis 205 °C eingesetzt werden und besitzt über diesen Temperaturbereich eine nahezu konstante Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,159 W/mK. Die besonders im Temperaturbereich von -20 bis 20 °C stark temperaturabhängige dynamische Viskosität ist in Abbildung 12 dargestellt.

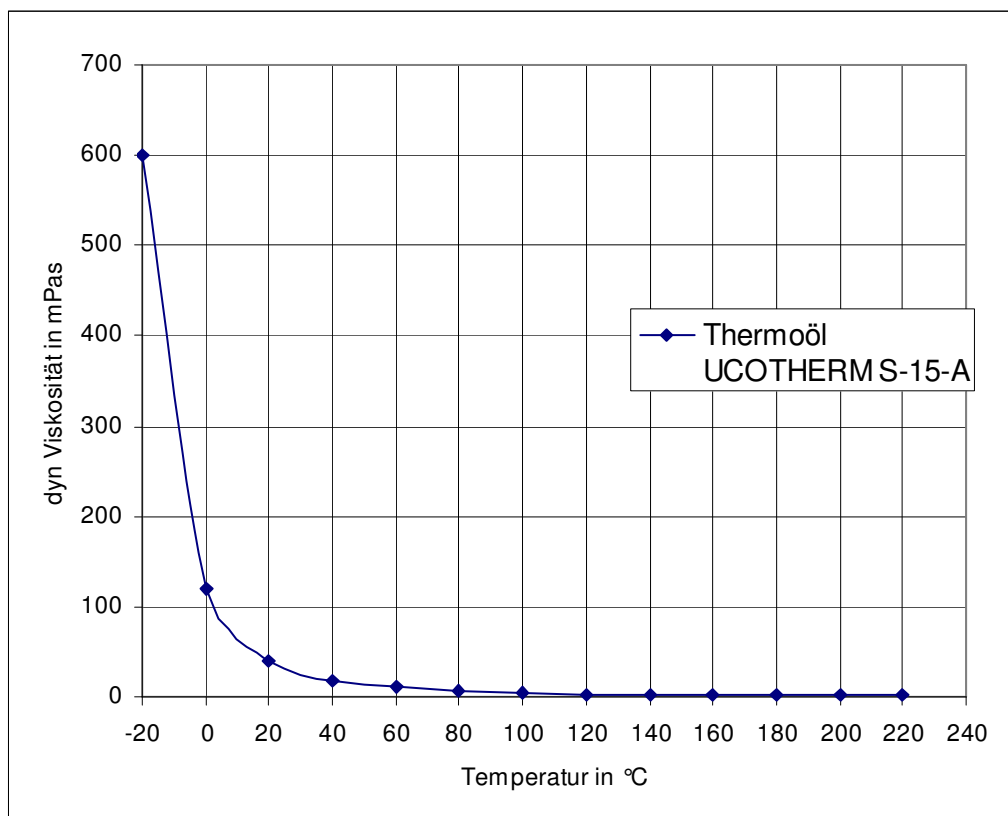


Abbildung 12: dynamische Viskosität des Thermoöl UCOTHERM S-15-A

Die Versuchsanlage wurde mit 2,2 kg Thermoöl über den Ausgleichsbehälter befüllt und dieser dicht verschlossen.

Die Steuerung und Messwerterfassung wurde über das Programm DASYLAB realisiert.

2.3.2 Versuchsergebnisse

Gemäß dem aufgestellten Versuchsplan wurden folgende Parameter am Versuchsstand variiert:

- Heizleistung Brenner von 1 – 3 kW
- Temperatur Thermoöl von 50 bis 150 °C
- Volumenstrom Thermoöl von 250 bis 750 l/h

Untersucht wurden dabei neben den Temperaturen auch der ölseitige Druckverlust des konzipierten Wärmeübertragers und die benötigte Motorleistung der Ölpumpe bei unterschiedlichen Volumenströmen. Abbildung 13 zeigt den Druckverlust über den Wärmeübertrager bei Öltemperaturen von ca. 50 bis 150 °C und einem Öldurchsatz von 250, 500 und 750 l/h. Erwartungsgemäß sinkt der Druckverlust und auch die benötigte Antriebsleistung der Ölpumpe mit steigender Temperatur aufgrund der Verringerung der Viskosität des Öls. Bei einem moderaten Öldurchsatz von 250 l/h ist der Druckverlust selbst bei kaltem Öl kleiner 100 mbar. Die Pumpe benötigt bei diesem Durchsatz eine Motorleistung zwischen 30 und 50 Watt. Bei hohem Öldurchsatz von 750 l/h steigt der Leistungsbedarf auf bis zu 210 W bei kaltem Öl.

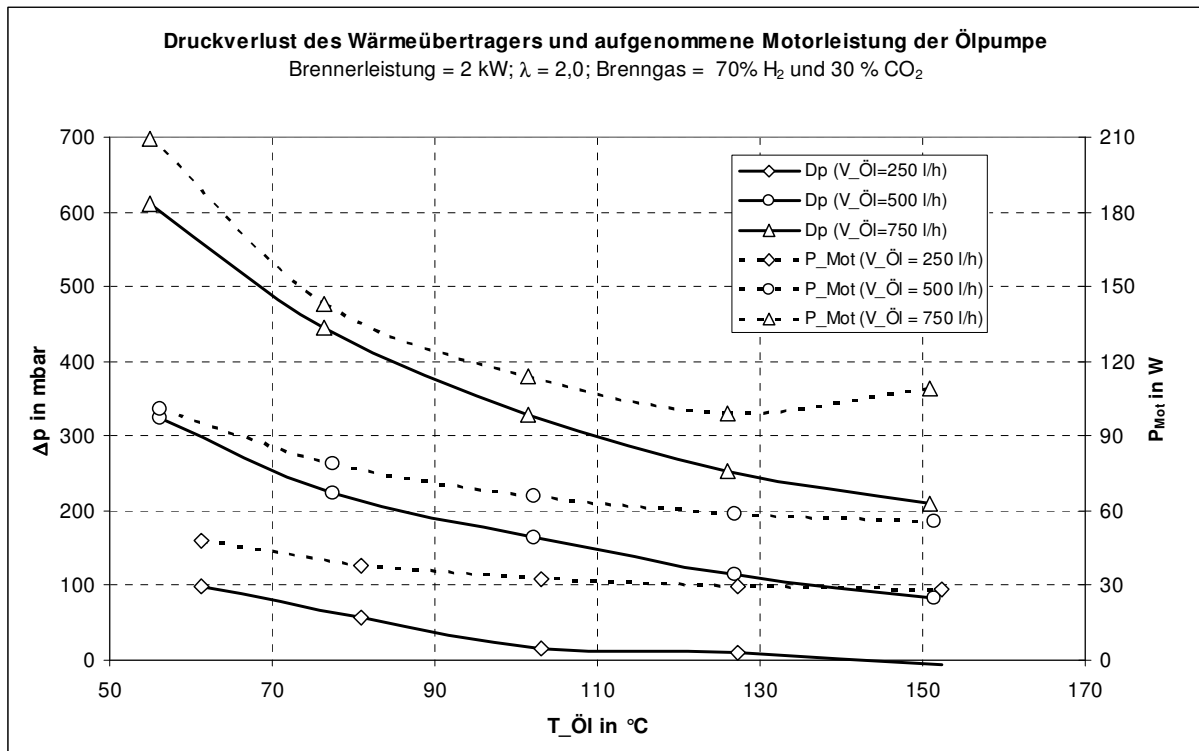


Abbildung 13: Druckverlust des Wärmeübertragers und aufgenommene Motorleistung der Ölpumpe

In Abbildung 14 ist die Abgastemperatur über der Ölaustrittstemperatur für verschiedene Volumenströme im stationären Zustand dargestellt. Da der Wärmeübertrager im Gegenstromprinzip arbeitet, ist die Abgastemperatur zum Teil unterhalb der Ölaustrittstemperatur. Die sehr geringen Temperaturunterschiede für das Abgas und die Ölaustrittstemperatur bei Steigerung des Durchflusses weisen darauf hin, dass bereits bei geringem Durchfluss die Wärme in ausreichendem Maß vom Thermoöl aufgenommen wird. Zur Minimierung von Druckverlust und Energieverbrauch der Ölpumpe sollte die Anlage mit einer Durchflussmenge von 250 l/h betrieben werden.

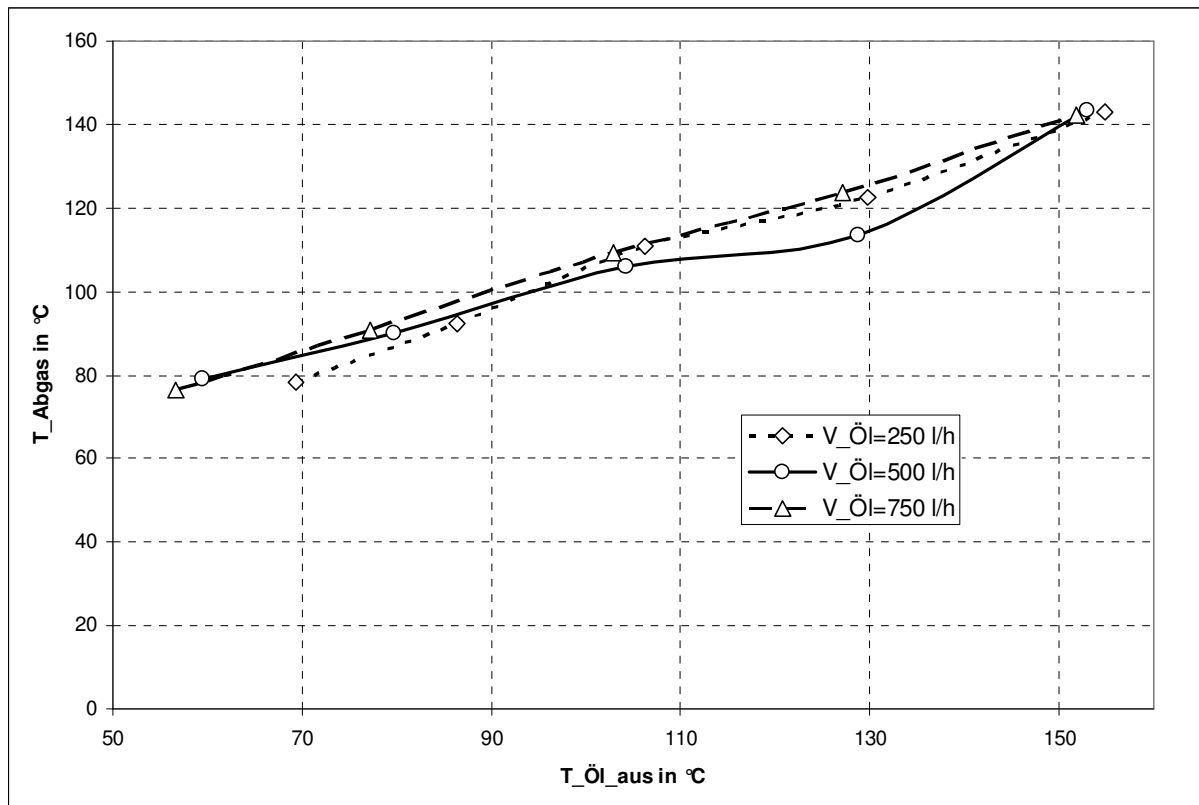


Abbildung 14: Abgas und Öltemperatur bei unterschiedlichem Volumenstrom

Bei einer Öltemperatur größer 90 °C steigt die Abgastemperatur über 100 °C. Um den Brennwerteffekt zu nutzen muss das Abgas anschließend an einem Kühlwasserwärmeübertrager kondensieren.

Eine Materialunverträglichkeit zwischen dem verwendeten Thermoöl und den einzelnen Komponenten der Anlage wurde nicht festgestellt. Weder ein Farbumschlag noch Geruchsveränderungen waren nach den Versuchen am Öl erkennbar. Allerdings konnten im Rahmen des Projektes keine Langzeiterfahrungen mit dem Öl gewonnen werden.

Aus den Erfahrungen des Versuchsstandes lassen sich folgende Aussagen für den Betrieb der HT-PEM- Brennstoffzellenanlage ableiten:

- Das verwendete Thermoöl UCOTHERM D-15-A ist für den Einsatz im HT-PEM-Brennstoffzellensystem geeignet. Es ist darauf zu achten, dass das Thermoöl nicht mit Sauerstoff in Kontakt kommt, da es dann sehr schnell altert. In dem geschlossenen Kreislauf ist ein ausreichend dimensioniertes Ausdehnungsgefäß notwendig, damit kein unzulässiger Überdruck entsteht.

- Die verwendete Thermoölpumpe arbeitet zuverlässig und kann dank Drehzahlregelung stufenlos den gewünschten Volumenstrom fördern. Aufgrund des hohen Anschaffungspreises ist allerdings eine Marktrecherche nach einer preiswerteren Alternative sinnvoll.

2.4 Gesamtsystem – Versuchsergebnisse (Arbeitspaket 10000)

Gemeinsam mit dem Projektpartner TU Bergakademie Freiberg wurde ein Reformerkonzept für eine HT-PEM- Brennstoffzellenanlage erstellt, sowie dessen Aufbau und Betrieb realisiert. Grundlagen für dieses Reformerkonzept waren die nachfolgend aufgeführten Anforderungen des HT-PEM- Brennstoffzellenstacks, die vom Projektpartner inhouse engineering definiert wurden:

- Elektrische Leistung: ca. 2 kW
- Betriebstemperatur des Stacks: 160 – 170 °C
- Aufheiztemperatur: 130 °C
- Reformatstöchiometrie: 1,2
- Max. Temperaturdifferenz im Stackkühlkreis: 5 °C
- Reformatqualität: CO: 0,5 – max. 1,0%
CH₄: <2%
H₂: >70%

Der Reformer für die HT-PEM- Brennstoffzellenanlage, in Abbildung 15 im Betrieb am Versuchsstand, wurde einem umfangreichen Testprogramm unterzogen.

Alle Parameter, die die Gasqualität des Reformats beeinflussen, können am Reformer über die SPS verändert werden. Im Wesentlichen sind das:

- Durchfluss von Erdgas und Wasser, sowie deren Verhältnis (S/C)
- Temperaturen der Prozessstufen (Reformer, HT-Shift, TT-Shift)

Alle Messwerte des Reformers, sowie die angeschlossene Gasanalyse (H₂, CO, CO₂, CH₄) werden durch die SPS erfasst und gespeichert.

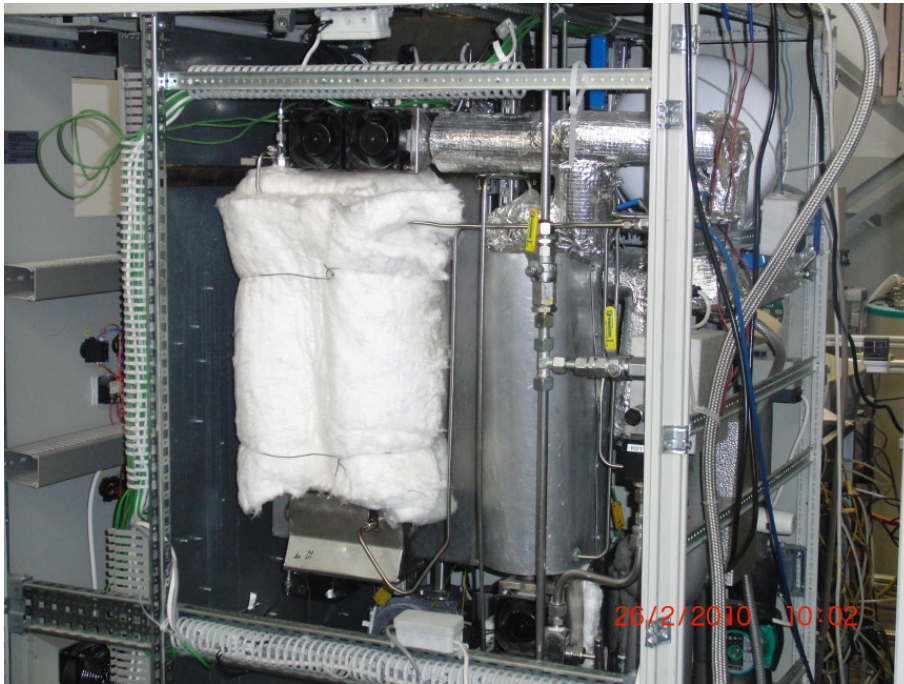


Abbildung 15: Reformer am Versuchsstand

In Abbildung 16 ist exemplarisch eine Versuchsreihe des Reformers aufgezeichnet. Dabei wurde am Reformer bei konstanten Bedingungen (Durchfluss 7 l/min; S/C: 4,2) die Temperatur der TT-Shiftstufe variiert (von 280 °C bis 220 °C). Neben der Temperatur der Shiftstufen sind die Reformertemperaturen sowie der H₂- und der CO- Gehalt dargestellt.

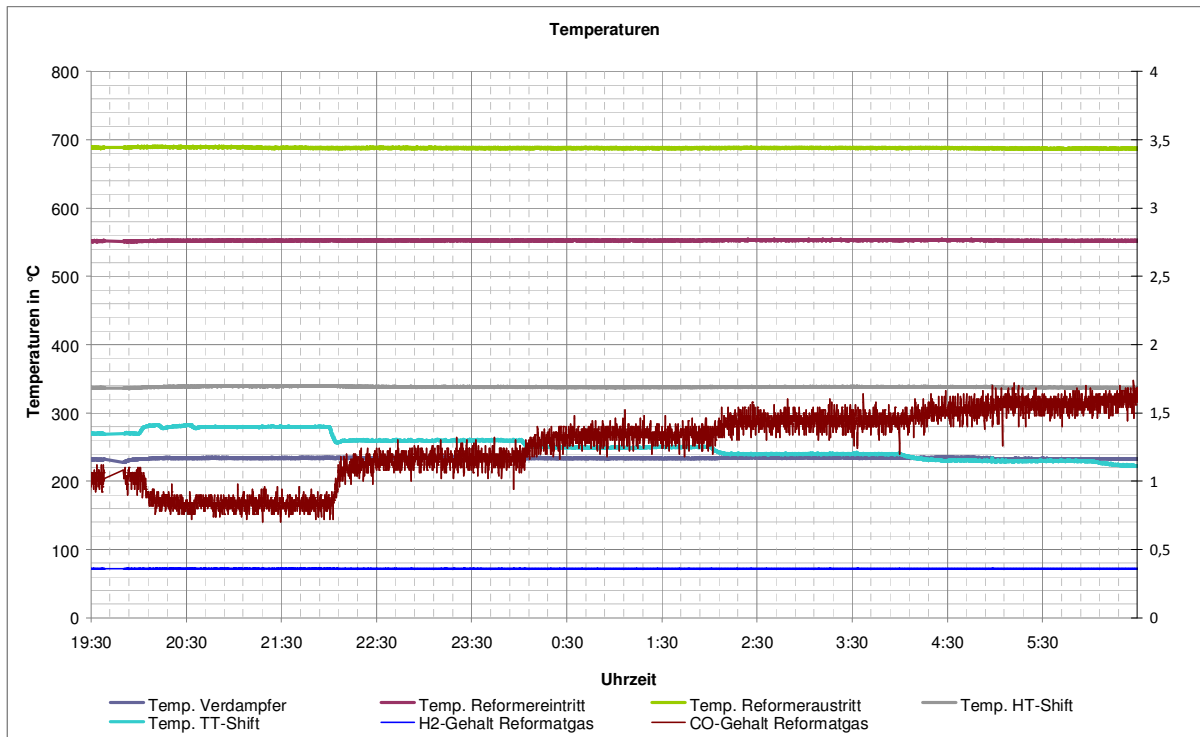


Abbildung 16: Betriebsergebnisse des Reformers

Gut zu erkennen ist der Zusammenhang zwischen der Temperatur der TT-Shiftstufe und dem CO- Gehalt im Reformat. Mit sinkender Shifttemperatur steigt der CO- Gehalt im Reformat signifikant an. Ab einer Shifttemperatur von 280 °C schwankt der CO-Gehalt im Bereich von 0,8 Vol-%, liegt aber in allen Lastzuständen unterhalb von 1 Vol-%. Um den Grenzwert von 1 Vol% CO im Reformat sicher auch bei Lastwechseln zu unterschreiten wurde für den Reformerbetrieb die Regeltemperatur für die TT-Shiftstufe auf 300 °C gesetzt.

Zur weiteren Optimierung des Betriebsverhaltens des Reformers wurden zur Feststellung von Schwachstellen in der Dämmung und zum Auffinden von Hot-Spots Infrarotaufnahmen mittels Thermographiekamera während des Betriebs bei verschiedenen Lastzuständen aufgenommen. Die Infrarotaufnahme in Abbildung 17 zeigt Temperaturspitzen im unteren Bereich der HT- Shiftkühlung und oberen Bereich des Verdampfers.

Im Ergebnis dieser Aufnahmen wurde die Dämmung an verschiedenen Stellen des Reformers optimiert.

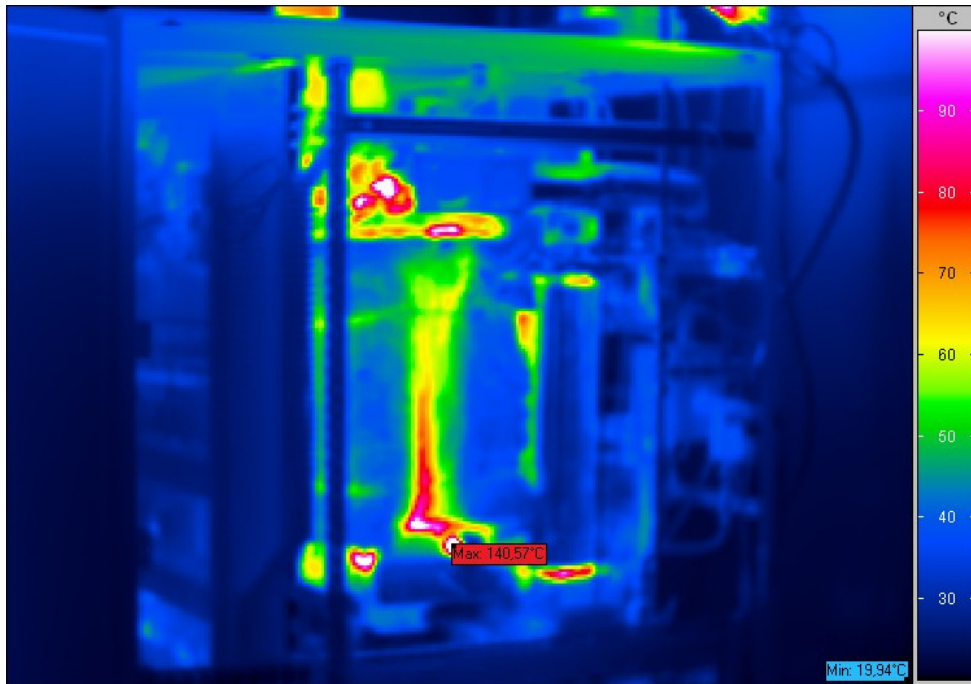


Abbildung 17: Infrarotaufnahme des Reformers

Durch Optimierungen am Reformer und Anpassung der Fahrweise (Solltemperatur der Prozessstufen, S/C- Verhältnis) konnten die geforderten Reformatgasqualität über den gesamten Leistungsbereich des Reformers erreicht werden. Der CO-Gehalt, das Kriterium für die Lebensdauer des Stacks, liegt im Regelbereich des Reformers immer unter 0,5 Vol% und überschreitet den maximal zulässigen Wert von 1 Vol% auch bei Lastwechseln nicht.

Der Reformer wurde automatisiert über mehrere Wochen in Dauerversuchen getestet und arbeitete zuverlässig und störungsfrei.

3. Literaturverzeichnis

- [1] Teller, O.: Challenges to Gore as a manufacturer of membrane electrode assemblies. Proceedings: f-cell 2005, Stuttgart 26.-27.09.2005
- [2] Henschel, C.: High-temperature PEM Fuel Cells: On the way to a competitive CHP system. Proceedings: f-cell 2005, Stuttgart 26.-27.09.2005
- [3] <http://www.basf-fuelcell.com/de>
- [4] Kolb, G.: Reforming Ethanol and Methanol to provide Hydrogen for fuel cells in small, compact systems. Proceedings: f-cell 2005, Stuttgart 26.-27.09.2005
- [5] Krause, H.; Giesel, S.; Schilling, M.: Entwicklung eines integrierten Dampf-reformers für erdgasbetriebene Brennstoffzellenheizgeräte, gefördert durch BMBF, FKZ: 03I0306D, Abschlußbericht, 2006
- [6] Steinbrück, R.: Entwicklung und Validierung eines dynamischen Simulationsmodells für die Identifizierung von Dampfreformern. Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg, 2004
- [7] Heideck, G.; Purmann, M.; Styczynski, Z.A.: Multi channel voltage control for fuel cells, Journal of Power Sources; Elsevier B.V. 2005
- [8] Kempkes, V.: Reduktion der Kohlenmonoxidbildung in einem Steamreformer für Brennstoffzellenheizgeräte, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Diplomarbeit, 2008
- [9] Anger, S.: Untersuchungen zur energetischen Kopplung von Gasaufbereitungssystemen für Hoch- und Niedertemperatur PEM-Brennstoffzellen, TU Bergakademie Freiberg, Studiengang Umwelt- Engineering, Diplomarbeit, 2008
- [10] Reiche, T.: Entwicklung eines Konzepts zur Einbindung von Kälteerzeugungssystemen in die Abwärmenutzung einer Hochtemperatur- PEM Brennstoffzellenanlage, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Diplomarbeit, 2007
- [11] Bokor, P.: Einbindung des Kühlkreises von HT-PEM Brennstoffzellen in das Reformersystem, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Studienarbeit, 2008