

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16561 N**

Entwicklung eines wirkungsgradoptimierten Reformersystems für

HT-PEM-Brennstoffzellenheizgeräte

(Bewilligungszeitraum: 01.09.2010 bis 28.02.2013)

der AiF-Forschungsvereinigung

IUTA

Duisburg, 24.05.2013

Ort, Datum

Oliver Pasdag

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung der erzielten Forschungsergebnisse	2
2	Verwendung der Zuwendung.....	4
2.1	Gegenüberstellung der angestrebten Ziele und der erzielten Ergebnisse.....	4
2.2	Einsatz von wissenschaftlichem Personal	5
2.3	Geräteanschaffung über 2500 Euro und Leistungen Dritter	5
2.4	Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	5
3	Beschreibung der geleisteten Arbeiten	6
3.1	Arbeitspaket 1a: Simulation der Prozesskette	6
3.2	Arbeitspaket 1b: Gesamtsystem-Simulationen und Wirkungsgradbetrachtung.....	10
3.3	Arbeitspaket 2a: Aufbau eines kompakten Dampfreformersystems.....	14
3.4	Arbeitspaket 2b: Konstruktion der Vorwärmer/Brenner-Einheit.....	14
3.5	Arbeitspaket 3: Vermessung des Reformersystems	18
3.5.1	Zusammenhänge zur Wirkungsgradberechnung	19
3.5.2	Wirkungsgradbestimmung und die zentrale Rolle der Gasanalytik	20
3.6	Arbeitspaket 4: Technologische Bewertung der Hardwarelösung in der Praxis	24
3.6.1	Anfahrprozedere.....	24
3.6.2	Teillastbetrieb bei 50 % Last.....	25
3.6.3	Messergebnisse im Vergleich zur Simulation	25
4	Plan zum Ergebnistransfer	27
5	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse	28
5.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen.....	28
5.2	Nutzen für Fachgebiete und Wirtschaftszweige.....	28
6	Durchführende Forschungsstelle.....	29
7	Förderhinweis	29

1 Zusammenfassung der erzielten Forschungsergebnisse

Als Hauptziel wurde in dem Forschungsvorhaben die Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrads und damit der Stromkennzahl bei Brennstoffzellenheizgeräten angestrebt. Dies sollte durch Optimierung des Wärmemanagements der beiden Hauptkomponenten, dem Dampfreformersystem und der HT-PEM-Brennstoffzelle (BZ) realisiert werden. Daher bestand der Fokus der Arbeiten in der Untersuchung, inwiefern Wärmeleistung aus dem Kühlkreislauf der HT-PEM-BZ im Dampfreformersystem genutzt werden kann.

Zu Beginn der Untersuchungen wurde eine Simulation der gesamten Prozesskette durchgeführt, welche die durch notwendige Abkühlprozesse vorhandenen und die noch zusätzlich benötigten Wärmequellen deutlich machte. Mit diesen Informationen wurde ein \dot{Q} -T Diagramm erstellt, so dass mittels einer Pinchanalyse alle Wärmebedarfe und Wärmequellen auch unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Temperaturniveaus dargestellt werden konnten. Auf diese Weise ergaben sich exakte Angaben über die noch benötigten Leistungen und Temperaturniveaus von externen Wärmequellen.

Die zur Verfügung stehenden externen Quellen, wie der Systembrenner und das HT-PEM-BZ Kühlmedium (z.B. Thermoöl) konnten in einem weiteren Schritt in die Simulation miteinbezogen werden. Es wurde postuliert, dass der Systembrenner als reiner ARG- (Anodenrestgas) Brenner ohne zusätzliche Erdgasdosierung ausgeführt wird, wodurch die Brennerleistung unmittelbar vom H_2 -Umsatzgrad der Brennstoffzelle abhängig wird. Aufgrund der systematischen Betrachtung bei der Simulation wurde die Notwendigkeit einer rekuperativen Brennereduktvorwärmung gegen das Rauchgas aufgezeigt. Diese garantiert dem aus der Brennkammer abströmenden Rauchgas ein ausreichend hohes Temperaturniveau.

Als Ergebnis der Simulationen stellten sich zwei sinnvoll umsetzbare Lösungswege heraus: Zum einen musste Wärmeleistung aus dem Thermoöl der HT-PEM-BZ für die Prozesswasservorwärmung, -verdampfung und -überhitzung nutzbar gemacht werden. Zum anderen galt es eine Brenner/Vorwärmer-Einheit zu konstruieren, die neben einem störungsfreien Brennerbetrieb die rekuperative Brennereduktvorheizung in einem gemeinsamen Bauteil vereint.

Diese Bauteilentwicklung wurde in der ZBT-eigenen Werkstatt umgesetzt. Nach iterativ durchgeführten Änderungen konnte das Gesamtsystem bestehend aus Reformierreaktor/Brennkammer, Brenner/Vorwärmer, Shiftreaktor und Wärmetauschern in der Isolationshülle montiert werden.

Bei der Vermessung des Reformersystems rückte die exakte Analyse der Produktgaszusammensetzung in den Fokus. Hintergrund sind die nicht fehlerfrei erfassbaren

Produktgasmengenanteile, welche einerseits die Berechnungsgrundlage für den Wirkungsgrad bilden und andererseits über die ARG-Berechnung großen Einfluss auf die aktuelle Prozessführung haben. Diese Zusammenhänge werden im Rahmen des Projektes genauer untersucht.

Der geringste im Projekt gemessene Reformersystem-Wirkungsgrad im Vollastbetrieb betrug 75,6 %. Bei Unterstellung eines elektrischen Wirkungsgrads der HT-PEM-BZ von 50 % konnte für diesen Fall der elektrische Wirkungsgrad des Gesamtsystems von 40,8 % berechnet werden. Dies ist etwas höher als theoretisch maximal möglich wäre, wenn das Reformersystem keine HT-PEM-BZ Thermoölnutzung und keine rekuperative Brennereduktvorwärmung aufweisen würde. Die obere Grenze des laut Simulation unter idealen Bedingungen ohne Wärmeverluste sowie mit HT-PEM-BZ Thermoölnutzung und rekuperativer Brennereduktvorwärmung erreichbaren elektrischen Wirkungsgrads liegt bei 46,7 %. Auffällig ist die Tatsache, dass bei Teillast von 50 % der schlechteste Reformersystem-Wirkungsgrad mit etwa 78 % signifikant höher lag. Der elektrische Wirkungsgrad erzielte in diesem Betriebspunkt mit ca. 43 % ebenfalls deutlich höhere Werte. Dies gibt Anlass zur Vermutung, dass mit einer baulichen Modifikation des Reformersystems auch im Nennlastbereich höhere Wirkungsgrade zu erreichen sind. Das heißt, es existiert noch für höhere Laststufen und damit für höhere Raumgeschwindigkeiten im Reformersystemkatalysator Verbesserungspotential in Form von Geometrieoptimierungen, um auch bei der neuartigen Rauchgasführung noch genug Wärme in den Reaktor einbinden zu können.

Das Forschungsvorhaben konnte erfolgreich abgeschlossen werden, da der reale elektrische Wirkungsgrad des Systems auch bei Vollast trotz deutlicher Wärmeverluste immer noch höher ausfällt als der theoretisch maximal mögliche Wirkungsgrad der klassischen Verschaltungsvariante. Weiterhin wurde aufgezeigt, dass gerade im Bereich der Wärmedämmung und -einbindung noch nutzbares Potential für zusätzliche Wirkungsgraderhöhungen liegt. Des Weiteren wurden innerhalb des Projektes Wärmeübertrager mit so guten Übertragungseigenschaften entwickelt, dass diese Werte nahezu den idealisiert gerechneten Simulationsergebnisse entsprechen.

2 Verwendung der Zuwendung

2.1 Gegenüberstellung der angestrebten Ziele und der erzielten Ergebnisse

Die nachfolgende Tabelle erläutert die angestrebten Ziele in der Gegenüberstellung zu den erzielten Ergebnissen.

<u>Angestrebte Ziele</u>	<u>Erzielte Ergebnisse</u>
Arbeitspaket 1	
Simulation der Reformierungsprozesskette	Es wurden umfangreiche Simulationen durchgeführt und ein Q-T Diagramm erstellt.
Anwendung der Pinch-Point Methode zur Erschließung von Wärmetauschpotentialen	Die Pinch-Analyse wurde durchgeführt und Wärmeerschaltungsmöglichkeiten aufgezeigt.
Arbeitspaket 2	
Aufbau eines kompakten Dampfreformersystems im Leistungsbereich 4 kW; Basiskomponenten: Reformier- und Shiftstufe	Das Dampfreformersystem wurde aufgebaut, der Nennlastbetrieb jedoch auf 3 kW reduziert.
Realisierung der HT-PEM-BZ Wärmenutzung im Reformierungsprozess (z.B. zur Prozesswassererhitzung)	Die HT-PEM-BZ Wärmenutzung konnte durch die Anbindung eines Wärmethermostats zur Prozesswasserverdampfung simuliert werden.
Konstruktion und hardwareseitige Umsetzung einer rekuperativen Rauchgas-Brenneredukt-Vorwärmer-Einheit	Die Wärmeübertrager für die rekuperative Brennereduktvorwärmung wurden berechnet und konstruiert. Es wurde eine Hardwarelösung umgesetzt, welche den ARG-Brenner und die Wärmetauscher kombiniert.
Arbeitspaket 3	
Vermessung der neuen Hardware zur Effizienzbestimmung	Das Reformersystem samt neuer Brenner-Vorwärmer Einheit wurde im 100 % und 50 % Lastpunkt erfolgreich mit Methan vermessen, und die Wirkungsgrade des Systems bestimmt. Die im Antrag vorgesehene Vermessung mit Erdgas erschien im Projektverlauf aufgrund der für die Wirkungsgradbestimmung notwendigen, aber sehr aufwändig bestimmbareren Erdgaszusammensetzung als nicht zielführend. Ergänzend wurde dafür sehr detailliert auf die wichtige Notwendigkeit der exakten Analyse der Produktgaszusammensetzung eingegangen.
Arbeitspaket 4	
Technologische Bewertung der Hardwarelösung; Aufzeigen der Praxistauglichkeit	Die Praxistauglichkeit wurde durch Start-Up und stationären Teil- und Vollastbetrieb hinsichtlich Gasqualität und Stabilität nachgewiesen und dokumentiert. Es wurden weitere Herausforderungen beschrieben und ein Ausblick auf weitere Optimierungen gegeben.

2.2 Einsatz von wissenschaftlichem Personal

Der für die Forschungsstelle (ZBT) bewilligte wissenschaftliche Mitarbeiter wurde im Berichtszeitraum planmäßig zu 100 % für das Vorhaben eingesetzt und führte folgende Tätigkeiten in Zusammenhang mit den oben genannten Arbeitspaketen aus:

Entwicklung und Konstruktion, Fertigungsüberwachung, Teststandplanung und Inbetriebnahme, Detailauswertung, Analyse, Dokumentationen, Computersimulationen, PA-Vorbereitungen, Außenkontakte und –darstellung.

2.3 Geräteanschaffung über 2500 Euro und Leistungen Dritter

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden keine Geräte über 2500 Euro angeschafft.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

2.4 Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

3 Beschreibung der geleisteten Arbeiten

Nachfolgend werden in den einzelnen Unterkapiteln die Arbeitsinhalte und die Bearbeitung der Arbeitspakete vorgestellt.

3.1 Arbeitspaket 1a: Simulation der Prozesskette

Arbeitspaket 1 beinhaltet die prozesstechnische Simulation eines für die Kopplung mit einer HT-PEM Brennstoffzelle optimierten Dampfreformersystems. Als Werkzeug wurde die am ZBT zur Verfügung stehende prozesstechnische Simulationssoftware ApenPlus® verwendet.

Zu Beginn sollte die reine Prozesskette zur Wasserstoffherstellung simulativ betrachtet werden, siehe Abbildung 1. Sie besteht hauptsächlich aus dem Reformierreaktor, dem Shiftreaktor und mehreren Wärmetauschern.

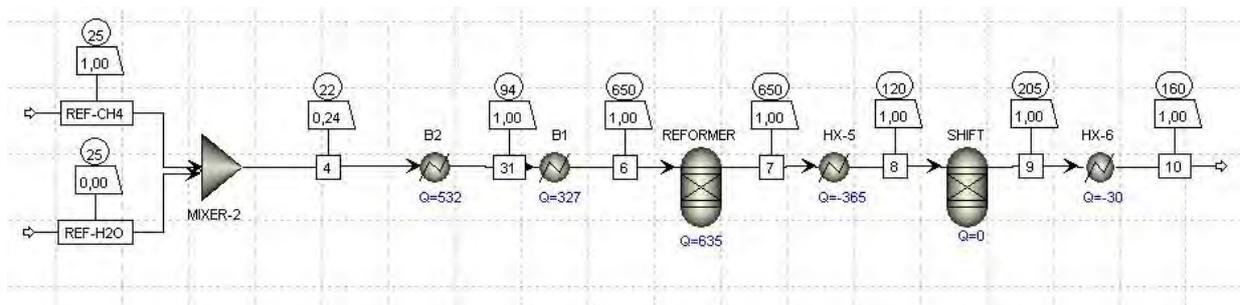


Abbildung 1: Prozesskette von den Edukten CH₄ und H₂O (links) zum Reformatgas (rechts)

Die für diese Simulation notwendigen Randbedingungen wurden wie folgt vorgegeben:

- Wasserstoffleistung im Produktgas: $PH_2 = 3 \text{ kW}_{th}$
- Edukte Reformersystem: Volumenstrom $CH_4 = 4,5 \text{ l}_N/\text{min}$; $S/C = 3,25$
- Betriebstemperatur der gekoppelten HT-PEM-BZ = $160 \text{ }^\circ\text{C}$
- Isotherme Prozessführung der endothermen Reformierungsreaktion = $650 \text{ }^\circ\text{C}$
- Gaseintrittstemperatur in den adiabat geführten einstufigen Shiftreaktor = $120 \text{ }^\circ\text{C}$

Die Wasserstoffleistung von 3 kW_{th} entspricht nicht der im Antrag formulierten Leistung von 4 kW_{th} . Diese Änderung wurde im Projektverlauf erforderlich, als aufgrund von Hardwaremodifikationen die angestrebte Leistungsklasse zur Wirkungsgradreduzierung führte. Durch bauliche Veränderungen musste die Katalysatorfüllmenge des Reformierreaktors reduziert werden, so dass die Raumgeschwindigkeit des Reformierungsprozesses nur noch

für eine geringere Leistungsklasse gegeben war. Für eine schlüssige Berichterstattung werden daher von Beginn an die im Projektverlauf iterativ angepassten Simulationen für ein 3 kW System beschrieben.

Die Simulation der Reformierungsprozesskette machte die bereits durch notwendige Abkühlprozesse vorhandenen und die noch zusätzlich benötigten Wärmequellen deutlich. Mit diesen Informationen konnte zunächst ein \dot{Q} -T Diagramm erstellt werden (siehe Abbildung 2).

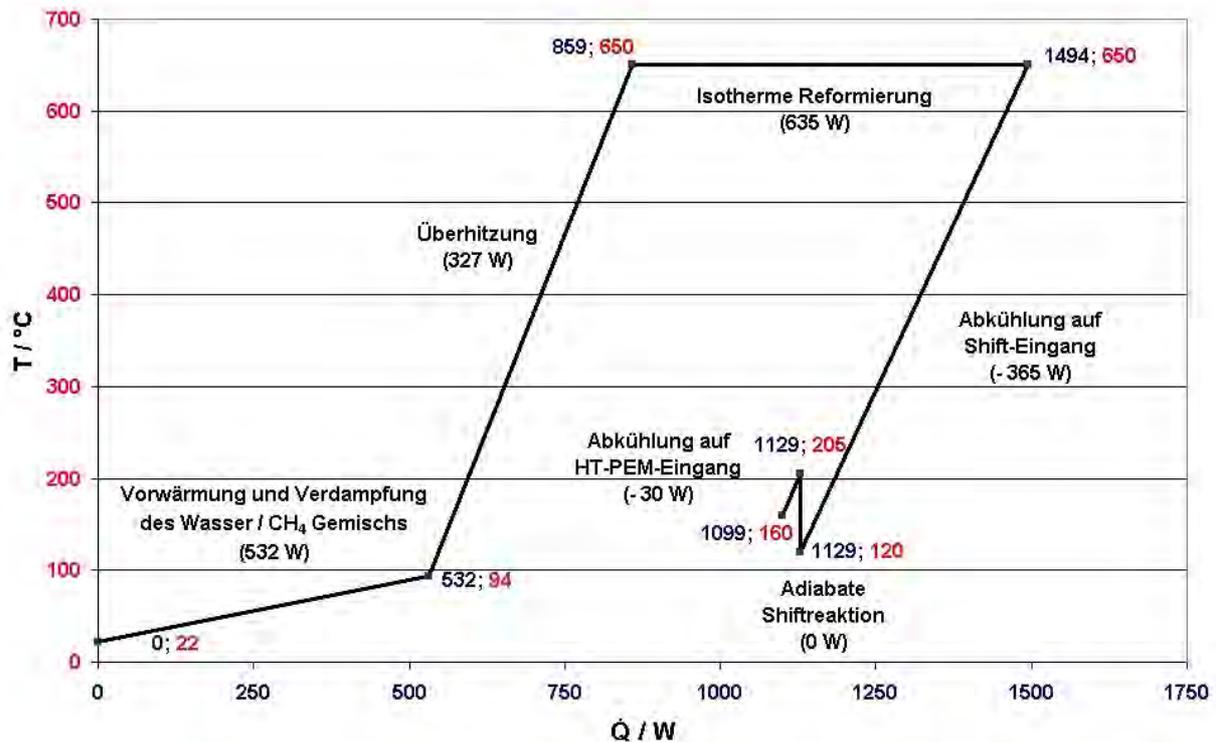


Abbildung 2: \dot{Q} -T Diagramm des Dampfreformersystems

Der Prozessverlauf ist von links nach rechts nachzuvollziehen: Das Reformereduktgemisch (CH_4 und Wasser) wird vorgewärmt, verdampft und auf die Reformereintrittstemperatur von 650 °C überhitzt. Bis zur vollständigen Verdampfung des Gemischs muss die erforderliche Wärmeleistung hauptsächlich dem Prozesswasser zugeführt werden. Im Reformierreaktor findet bei 650 °C die endotherme Reformierungsreaktion statt. Das heiße Produktgas muss im weiteren Verlauf vor Eintritt in den Shiftreaktor auf 120 °C abgekühlt werden und stellt somit eine interne Wärmequelle dar. Die exotherme Shiftreaktion wird adiabat betrieben, was zu einer Temperaturerhöhung des Shiftproduktgases führt. Daher ist im Anschluss erneut eine Abkühlung auf das HT-PEM-BZ Temperaturniveau von 160 °C erforderlich, was die zweite interne Wärmequelle darstellt.

Um die auf diese Weise sichtbar gemachten Wärmebedarfe und Wärmequellen nicht nur bezüglich der reinen Wärmeströme, sondern auch der entsprechenden Temperaturniveaus

miteinander verrechnen zu können, bietet sich das Instrument der Pinchanalyse an. In der Pinchanalyse werden alle Wärmequellen und –senken jeweils zu einer Quellen- und Senkenkurve addiert und parallel zur Abszisse bis zu ihrem Berührungspunkt (Pinch-Point) verschoben.

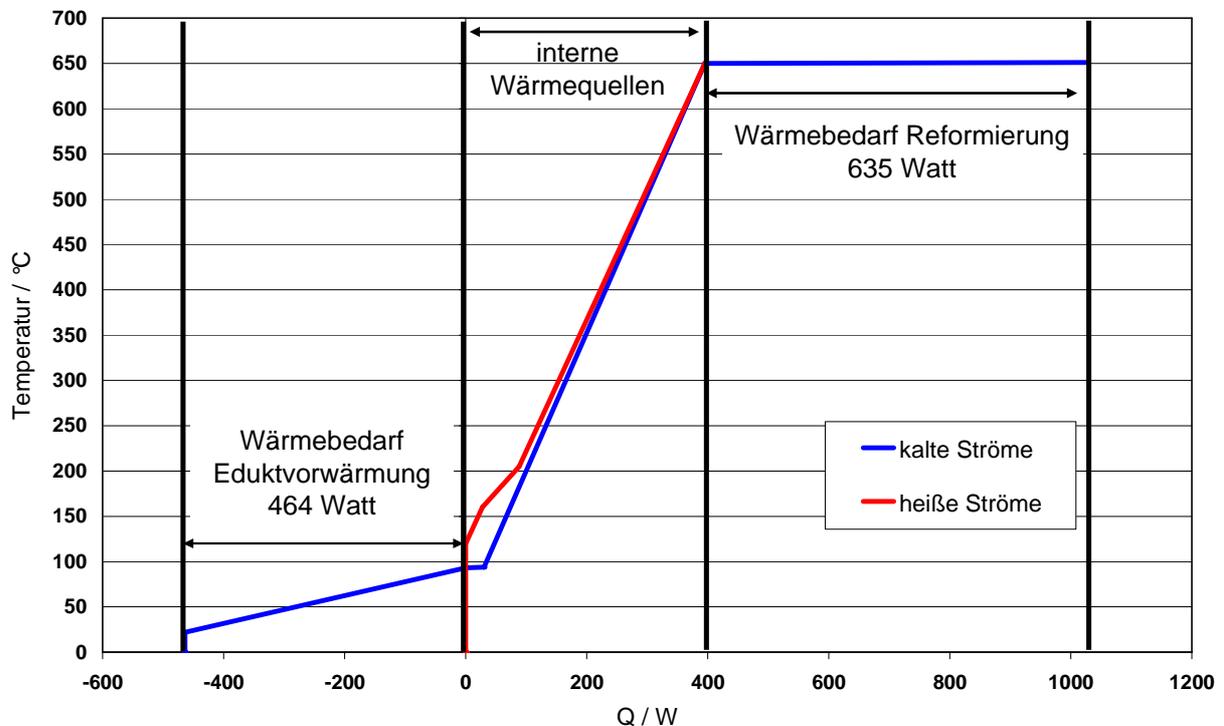


Abbildung 3: Pinchanalyse des Dampfreformersystems

Als Ergebnis wird sichtbar, in welchen Temperaturbereichen die Kurve der kumulierten heißen Ströme über der Kurve der Wärmebedarfe liegt und wo dies nicht der Fall ist. In letzteren Bereichen werden externe Wärmequellen bei einem ausreichend hohen Temperaturniveau zur Bedarfsdeckung benötigt. Das vorliegende Diagramm (siehe Abbildung 3) zeigt anschaulich den Bedarf externer Quellen für einen Temperaturbereich bis etwa 93 °C (464 Watt für die Prozesswasservorwärmung und –verdampfung) und für einen Temperaturbereich bei 650 °C (635 Watt für die Reformierungsreaktion). Im mittleren Teil können für die Überhitzung der Reformeredukte die internen, in der Prozesskette vorhandenen Quellen genutzt werden. Die Reihenfolge der Nutzung ist durch die entsprechenden Temperaturniveaus vorgegeben.

Die zur Verfügung stehenden externen Quellen, wie der Systembrenner und das HT-PEM-BZ Kühlmedium (z.B. Thermoöl) konnten nun in einem weiteren Schritt in die Simulation miteinbezogen werden. Es wurde postuliert, dass der Systembrenner als reiner ARG-Brenner ohne zusätzliche Erdgasdosierung ausgeführt wird, wodurch die Brennerleistung unmittelbar

vom H_2 -Umsatzgrad der Brennstoffzelle abhängig wird. Ausgehend von den Temperaturniveaus liegt es auf der Hand, dass die Reformierungsreaktion nur mit Hilfe der Rauchgase aus der ARG Verbrennung aufrecht erhalten werden kann und dass sich die Nutzung des Thermoöls für die Prozesswasserverdampfung anbietet.

Aufgrund der systematischen Betrachtung bei der Simulation wurde die Notwendigkeit einer rekuperativen Brennereduktvorwärmung gegen das Rauchgas aufgezeigt. Diese garantiert dem aus der Brennkammer abströmenden Rauchgas ein ausreichend hohes Temperaturniveau.

Das Fließschema der Prozesskette wird daher nun die Wärmequelle „ARG-Brenner“ und „Thermoölnutzung“ erweitert. Da diese Quellen nur mit Hilfe der HT-PEM-BZ realisiert und berechnet werden können, findet nun auch diese Eingang in die Simulation (siehe Abbildung 4).

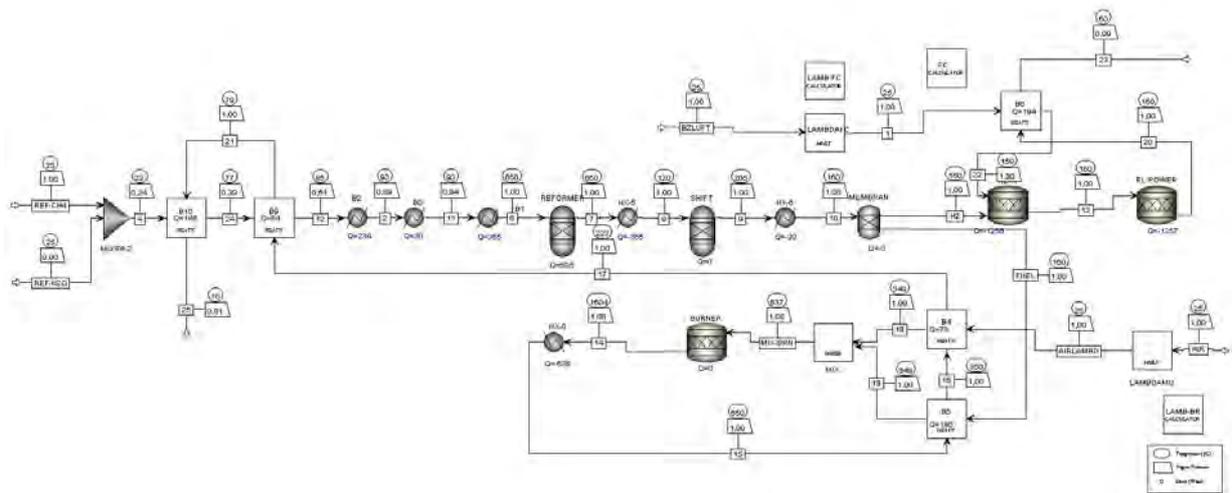


Abbildung 4: Übersicht über die Simulation des Gesamtsystems

Der ARG-Brenner wird mit der rekuperativen Vorheizung im unteren Teil der Abbildung dargestellt. Die Modellierung der HT-PEM-BZ ist im oberen rechten Teil zu erkennen. Der parametrierbare Umsatzgrad wurde als Membran modelliert und gewährleistet die Aufspaltung der Gasströme für das ARG und die BZ. Im linken Teil der Darstellung wird das Rauchgas des Brenners zusätzlich noch in zwei Stufen zur Eduktvorheizung bis zur Kondensation des Wassers im ARG und darüber hinaus im Brennwertbetrieb genutzt.

3.2 Arbeitspaket 1b: Gesamtsystem-Simulationen und Wirkungsgradbetrachtung

Die im Arbeitspaket 1a ermittelten Simulationsergebnisse zeigen mit dem rekuperativen Brennerbetrieb und der Thermoölnutzung zwei Möglichkeiten auf, die eine deutliche Effizienzsteigerung eines auf Dampfreformierung basierenden HT-PEM-BZ Systems versprechen. Als Vergleich zu diesen Möglichkeiten ist noch die klassische Verschaltungsvariante genannt, so dass insgesamt drei Optionen simulativ (im Methanbetrieb) zu vergleichen waren:

- Option 1: klassische Verschaltung
 - o Rauchgasnutzung: Reformierungsprozess, Reformereduktvorwärmung (Prozesswasser) → sehr geringer Brennwertbetrieb möglich (Abgastemperatur am Taupunkt bei ca. 77 °C)
 - o Thermoölnutzung: keine Einbindung
- Option 2: rekuperative Brennereduktvorheizung und geringe Thermoölnutzung
 - o Rauchgasnutzung: Reformierungsprozess, Brennereduktvorheizung und Reformereduktvorwärmung (Prozesswasser) → Brennwertbetrieb möglich (Abgastemperatur unter Taupunkt bei ca. 70 °C)
 - o Thermoölnutzung: ergänzende Einbindung zur Prozesswasserverdampfung
- Option 3: rekuperative Brennereduktvorheizung und hohe Thermoölnutzung
 - o Rauchgasnutzung: Reformierungsprozess, Brennereduktvorheizung → kein Brennwertbetrieb möglich (Abgastemperatur > 220 °C)
 - o Thermoölnutzung: vollständige Prozesswasservorwärmung und –verdampfung

Die Wärmeerschaltungsversionen der Optionen 1 bis 3 zeigen sowohl Abbildung 5 als auch Tabelle 1. Die grünen Pfeile symbolisieren die Möglichkeit der rekuperativen Brennereduktvorwärmung durch das Rauchgas und die Option der Reformereduktvorwärmung durch HT-PEM-BZ-Wärme. Der hellblaue Pfeil kennzeichnet die mögliche Vorheizung der Reformeredukte durch das Rauchgas. Alle orangenen Pfeile kennzeichnen notwendige Wärmeerschaltungen in jeder Variante.

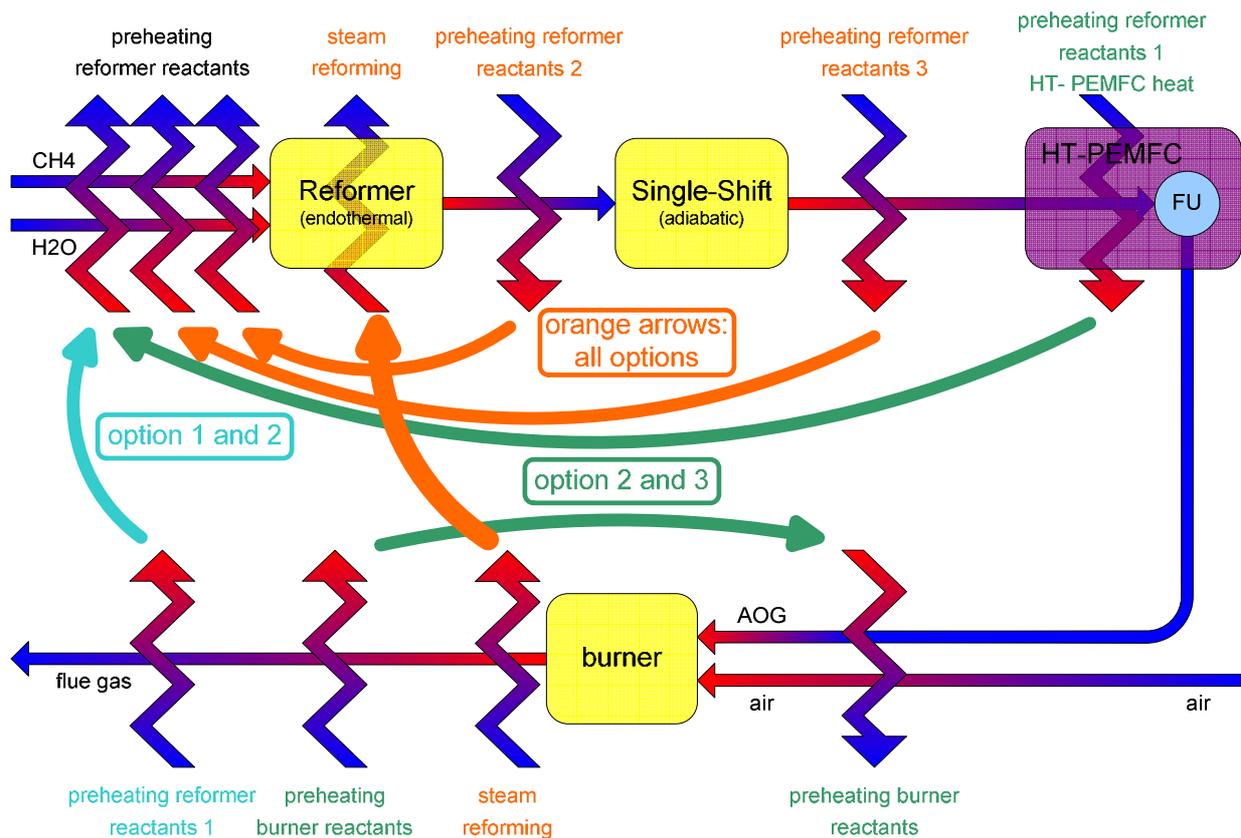


Abbildung 5: Möglichkeiten der Wärmeverschtaltung im Gesamtsystem

Tabelle 1: Optionen der Wärmeverschtaltungen

Wärmeverschtaltung	Reformerduktvorheizung durch Rauchgas	Reformerduktvorheizung durch Thermoöl	Brennerduktvorheizung
Option 1	ja, hoch	nein	nein
Option 2	ja, mittel	ja, gering	ja, hoch
Option 3	nein	ja, hoch	ja, hoch

Um alle Optionen hinsichtlich ihrer maximal erreichbaren Wirkungsgrade miteinander zu vergleichen, gilt es zunächst mit Hilfe der Simulation zu ermitteln, bis zu welcher Grenze die Brennerleistung theoretisch abgesenkt, bzw. der Umsatzgrad (UG) erhöht werden kann, um trotzdem

- noch die erforderliche Wärmeleistung (635 W) und das notwendige Temperaturniveau (650 °C) für die Reformierung zu gewährleisten und
- die benötigte Leistung und Temperatur zur Eduktaufheizung bereitzustellen, sofern das durch das Rauchgas angestrebt wird

Als weitere Randbedingungen werden für die Simulation ein minimaler Pinch-Point von 1 K für die Wärmeübertrager und ein Brennerlambda von 1,1 festgelegt. Die Simulationsergebnisse

lassen sich am besten in einer vergleichenden Übersicht veranschaulichen (siehe Tabelle 2). Der rot umrandete Bereich kennzeichnet die für alle Optionen gültigen Parameter wie die Reformeredukte (4,5 l/min CH₄, S/C = 3,25), die im Dampfreformersystem generierte thermische Wasserstoffleistung (3 kW), der elektrische Wirkungsgrad der HT-PEM-BZ (50 %) und der CH₄ Anteil im ARG (209 W). Die drei Varianten der Wärmeversaltungen unterscheiden sich hinsichtlich des maximal erreichbaren Umsatzgrades und der Thermoölnutzung. Je höher der UG gewählt werden kann, desto höher ist der Wirkungsgrad, weil die in der Brennstoffzelle genutzte Wasserstoffleistung steigt und die dafür benötigte Brennerleistung sinkt.

Tabelle 2: Simulationsergebnisse für die drei Optionen der Wärmeversaltung

P_AOG CH4		P_Reformer_ein CH4		P_H2_aus Gasprozess	
CH4 [mol/s]	0,000260800	Reformer CH4 [l/min]	4,5	H2 [mol/s]	1,23E-02
CH4 [W]	209,25	Reformer CH4 [mol/min]	0,2013	H2 [W]	2999
AOG ohne H2 [W]	209	Reformer CH4 [W]	2691	S/C	HT-PEM-BZ η el [%]
				3,25	50

Leistungen ein	Option 1	Wirkungsgrade [%]	
Reformer CH4 [W]	UG max [%]	eta Reformersys.	80,05
AOG ohne H2 [W]	71,8	eta el. Gesamtsys. [%]	40,00
AOG H2 [W]	Leistungen BZ		
AOG gesamt [W]	H2 [W]		
Thermoölnutzung [W]	P el [W]		
0	P heat [W]		
	2153		
	1077		
	1077		

keine TÖ, kein RB, RGGPW, T Rauchgas = 77 °C

Leistungen ein	Option 2	Wirkungsgrade [%]	
Reformer CH4 [W]	UG max [%]	eta Reformersys.	88,55
AOG ohne H2 [W]	83,8	eta el. Gesamtsys. [%]	46,69
AOG H2 [W]	Leistungen BZ		
AOG gesamt [W]	H2 [W]		
Thermoölnutzung [W]	P el [W]		
234	P heat [W]		
	2513		
	1256		
	1022		

TÖ, RB, RGGPW, T Rauchgas = 70 °C

Leistungen ein	Option 3	Wirkungsgrade [%]	
Reformer CH4 [W]	UG max [%]	eta Reformersys.	88,55
AOG ohne H2 [W]	83,8	eta el. Gesamtsys. [%]	46,69
AOG H2 [W]	Leistungen BZ		
AOG gesamt [W]	H2 [W]		
Thermoölnutzung [W]	P el [W]		
464	P heat [W]		
	2513		
	1256		
	792		

TÖ, RB, kein RGGPW, T Rauchgas = 223 °C

TÖ Thermoölnutzung
 RB rekuperativer Brennerbetrieb
 RGGPW Rauchgas gegen Prozesswasser

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Thermoölnutzung und der rekuperative Brennerbetrieb einen um 12 Prozentpunkte höheren Umsatzgrad in der HT-PEM-BZ zulassen, als ohne diese Maßnahmen (Option 1) möglich wäre. Daraus ergibt sich eine Steigerung des

Reformersystem-Wirkungsgrads um ca 8,5 Prozentpunkte auf 88,5 % und für den elektrischen Gesamtwirkungsgrad um ca. 6,7 Prozentpunkte auf 46,7 %. In der folgenden Abbildung 6 sind die Zusammenhänge zwischen Umsatzgrad, ARG-Leistung und elektrischem Wirkungsgrad dargestellt:

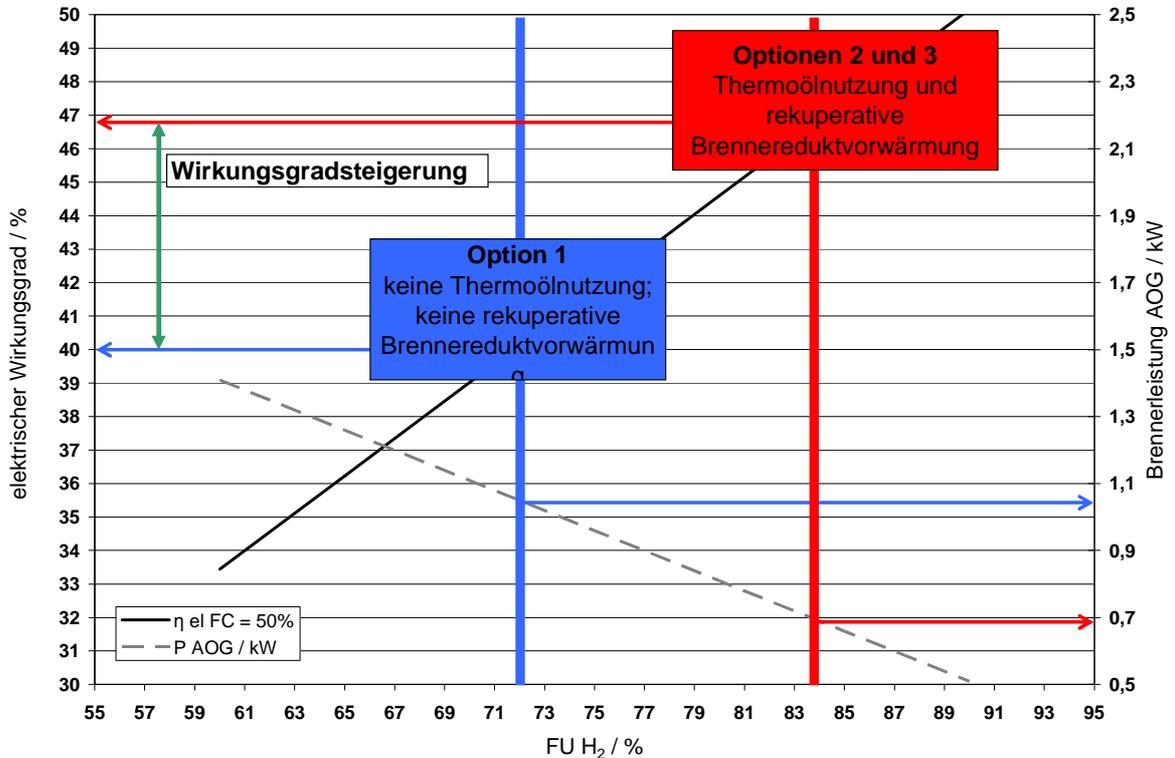


Abbildung 6: Wirkungsgradpotential bei Thermoölnutzung und rekuperativem Brennerbetrieb

Als Ergebnis der Simulationen stellten sich zwei sinnvoll umsetzbare Lösungswege heraus: Zum einen musste Wärmeleistung aus dem Thermoöl der HT-PEM-BZ für die Prozesswasservorwärmung, -verdampfung und -überhitzung nutzbar gemacht werden. Zum anderen galt es eine Brenner/Vorwärmer-Einheit zu konstruieren, die neben einem störungsfreien Brennerbetrieb die rekuperative Brennereduktvorheizung in einem gemeinsamen Bauteil vereint.

3.3 Arbeitspaket 2a: Aufbau eines kompakten Dampfreformersystems

Aufgrund mehrerer Gründe wurde für die experimentelle Überprüfung der Simulationsergebnisse die Option 3 gewählt: Generell ergibt sich eine einfachere Systemverschaltung, wenn auf einen Rauchgas-Prozesswasser-Wärmeübertrager verzichtet werden kann. Des Weiteren hätte in Verbindung mit Option 2 dieser Wärmeübertrager sicherstellen müssen, dass zusätzlich sowohl in allen stationären Lastpunkten als auch in der dynamischen Betriebsweise ein Teil der Kondensationsenthalpie des Rauchgases genutzt wird. Kann dies nicht zuverlässig gewährleistet werden, ist ein stabiler Systembetrieb nicht möglich. Zusätzlich ist die Exergie des in Option 3 mit > 220 °C ausströmenden Rauchgases deutlich höher als bei Option 2, so dass hier die weitere Einkopplung in einen (Brauchwasser-) Wärmespeicher deutlich effektiver ausgeführt werden könnte.

Die Wasserverdampfung erfolgte in der umgesetzten Lösung in einem Wärmethermostaten mit Thermoöl, stellvertretend für einen Wärmetauscher im HT-PEM-BZ Kühlmedium. Der übrige Gasprozess wurde auf Basis der am ZBT etablierten Dampfreformertechnik angefertigt. Wie im Arbeitspaket 2b beschrieben wird, musste der Reformierreaktor gering modifiziert werden, damit die neu entwickelte Vorwärmer/Brenner-Einheit angeschlossen werden konnte. Der Shiftreaktor entspricht einem von unten nach oben durchströmten Zylinder und das Herunterkühlen des Reformierproduktgases auf das Temperaturniveau des Shifteduktgases wird durch einen Doppelrohr-Wärmeübertrager realisiert, der im Gegenstrom zum Reformiereduktgas arbeitet.

3.4 Arbeitspaket 2b: Konstruktion der Vorwärmer/Brenner-Einheit

Da es sich bei der Vorwärmer/Brenner-Einheit um eine Neukonstruktion mit vielfältigen Anforderungen (Zündung, Flammüberwachung, Gemischbildung bei Multigas-Fähigkeit, Lastvariation usw ...) handelt, wurde entschieden, dieses Bauteil mit einer bewährten Reformierreaktor-Brennkammer-Kombination zu koppeln, um das Risiko der Betriebsunfähigkeit zu minimieren.

Bei der Konstruktion der Rauchgaswärmeübertrager gaben mehrere Aspekte den Ausschlag für ein Ringspalt-Rohrwendel-Konzept. Ausgehend von der bereits existierenden Reaktor-brennkammer musste zunächst eine Lösung für die Kanalisierung des Rauchgases beim Abströmen aus dieser Brennkammer gefunden werden. Dies erschien in Form eines Ringspalts, nicht zuletzt auch wegen des geringen Druckverlusts, am besten durchführbar. Für den erforderlichen Wärmetausch mit den Brenneredukten, d.h. Brennerluft und ARG, wurde die Verwendung von Rohrwendeln in dem rauchgasdurchströmten Ringspalt gewählt. Die Länge und Wicklungszahl dieser Rohrwendeln wurde mit Hilfe des VDI Wärmeatlas unter

Berücksichtigung der simulierten Temperaturen, Stoffströme, Gaszusammensetzungen und diverser strömungstechnischer und geometrischer Randbedingungen berechnet.

Zusammenfassend wird im Folgenden aufgeführt, welche Anforderungen bei der Konstruktion berücksichtigt werden mussten, um die Funktionssicherheit zu gewährleisten:

1. Es muss eine Anbindung an die bewährte Reformertechnik möglich sein, um dem System neben den Unwägbarkeiten der komplexen neuen Wärmeverschalung der Brenneinheit ein gewisses Maß an erprobter Stabilität zu verleihen. Werden zeitgleich zu viele Parameter verändert, so steigt das Risiko, dass das System nicht mehr betreibbar ist, die Neuerungen nicht getestet werden können oder die sich einstellende Veränderung im Betriebsverhalten nicht mehr eindeutig auf einen Parameter rückführbar ist.
2. Der Brenner muss extern gezündet werden können und über eine Flammüberwachung verfügen, die einen sicheren Betrieb des Brenners gewährleistet.
3. Die vorgewärmten Brenneredukte dürfen erst unmittelbar vor der Flammzone zu einem zündfähigen Gemisch zusammengeführt werden, da es sonst zu einer unkontrollierten Selbstzündung kommen kann.
4. Bei Nutzung der Kondensationsenthalpie des Rauchgases muss das kondensierte Wasser ungehindert abströmen können ohne im System als mögliche Störgröße zu verbleiben.
5. Das Modell muss fertigungstechnisch umsetzbar sein. Die Konstruktion sollte derart gestaltet werden, dass Halbzeuge verfügbar, Baugruppen und Komponenten herstellbar und montierbar sind.

Abbildung 7 verdeutlicht anhand einer Prinzipskizze die ersten Überlegungen zur Umsetzung der Anforderungen.

Der nachfolgend in Abbildung 8 dargestellte Schnitt des 3D-CAD-Modells verdeutlicht die ausgeführte Konstruktion. Oben ist die Flanschplatte zu erkennen, durch welche die neu entwickelte Brenneinheit an die Brennkammer des Reformierreaktors angeflanscht wird. In der Mitte der Flanschplatte befindet sich der Brennerkörper, der im Wesentlichen der Luft- und Gaszuführung Richtung Brennerrohr dient. Im Zentrum des Brennerkörpers kann von unten eine Zündkerze und von oben das koaxial ausgeführte Brennerrohr eingeschraubt werden. Die Zündkerze dient neben der Zündung auch der Ionenstromüberwachung während des Brennerbetriebs. Nach Verlassen der Brennkammer strömt das Rauchgas abwärts durch die ovalen Durchtritte der Flanschplatte in den Rauchgasringspalt der Wärmeübertrager hinab, welcher der Reihe nach zunächst von der Rohrwendel der Brennerluft und dann von der Rohrwendel des ARG durchzogen ist.

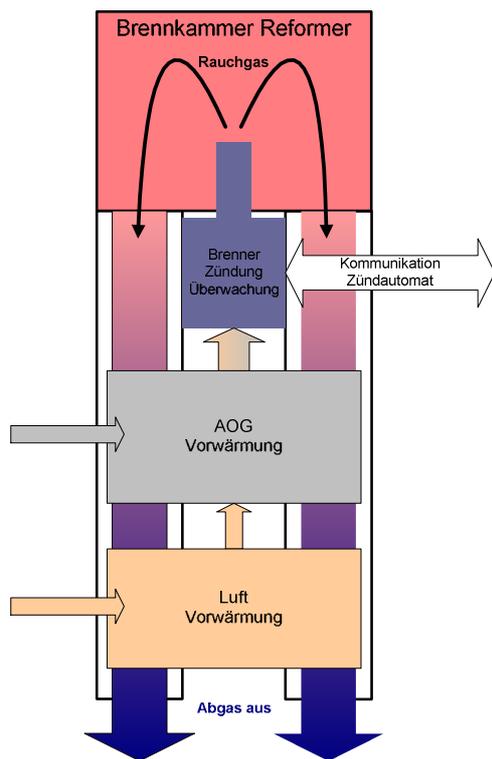


Abbildung 7: Prinzipskizze der Vorwärmer/Brenner-Einheit mit Reformerbrennkammer

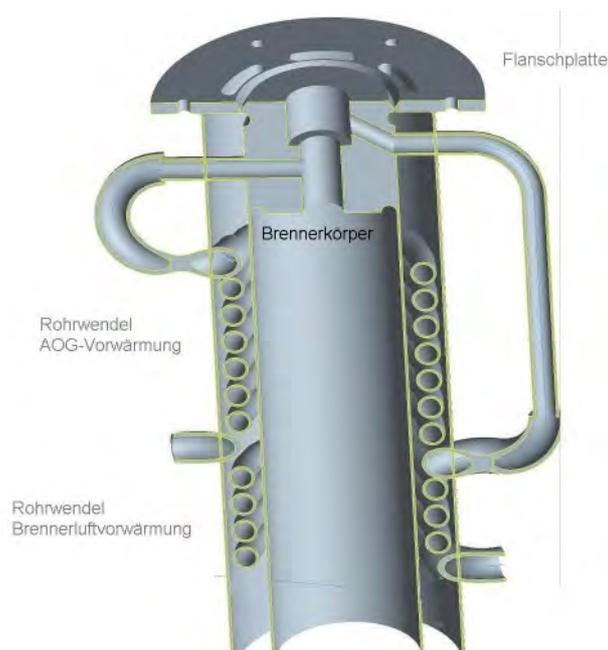


Abbildung 8: Pro/Engineer® Schnittmodell der Vorwärmer/Brenner-Einheit

Nach verschiedenen Freibrandtests und iterativ durchgeführten Änderungen an der neuen Brenner/Vorwärmer-Einheit konnte das Reformersystem abschließend montiert werden.

Aufgrund des geänderten Rauchgasweges wurde nun eine Schüttungsisolation möglich. Zusätzlich zu den simulativ optimierten Wärmeübertragungen konnten auf diese Weise auch die Wärmeverluste über die Systemhülle minimiert werden.

Die Abbildung 9 zeigt die Vorwärmer/Brenner-Einheit im Zusammenbau, den komplett montierten Gasprozess vor Einbringung in die Isolationshülle und das Reformersystem auf dem Teststand.



Abbildung 9: Brenner/Vorwärmer-Einheit vor dem Zusammenbau (o. links); Brenner /Vorwärmer-Einheit montiert im Gasprozess außerhalb der Isolationshülle (o. rechts); Reformersystem in der Isolationshülle (u. links); Reformersystem mit Teststandsperipherie (u. rechts)

3.5 Arbeitspaket 3: Vermessung des Reformersystems

Um das Reformersystem exakt vermessen zu können, ist eine umfangreiche Teststandsperipherie erforderlich. Neben der Eduktdosierung für den Gasprozess selbst muss auch die Dosierung des synthetischen ARG realisiert sein. Dazu gehört auch die Berechnung und Temperierung des ARG. Die Berechnung ist abhängig vom gewählten Umsatzgrad der simulierten BZ und der tatsächlich erfassten Produktgaszusammensetzung. Mit Hilfe der Steuerungssoftware LabView® werden die Eingangsdaten aus der online-Gasanalytik erfasst, der Produktgasvolumenstrom berechnet und Medienströme für das ARG gezielt mit Hilfe von Mass-Flow-Controllern (MFC) in das System dosiert.

Das Reformersystem wurde zunächst im Volllastpunkt auf seine Betriebsfähigkeit untersucht, was nicht unmittelbar gegeben war. Bei ersten Tests stellte sich heraus, dass der verwendete Doppelrohr-Wärmeübertrager für den benötigten Wärmetransfer aus dem Reformierreaktor-Produktgas in das zu überhitzende Reformierreaktor-Eduktgas zu kurz ausgelegt war. Dadurch war eine Überhitzung des Shiftreaktors möglich. Erst nach Optimierung des Systems konnte ein stabiler, stationärer Betrieb erreicht werden. Neben dem stabilen Betrieb ist weiterhin eine geeignete Gasqualität die Voraussetzung für die Kopplung des Reformersystems mit einer Brennstoffzelle. Abbildung 10 zeigt einen Ausschnitt aus dem stationären Methanbetrieb im Nennlastpunkt hinsichtlich der Gasqualität und der gewählten Betriebsparameter.

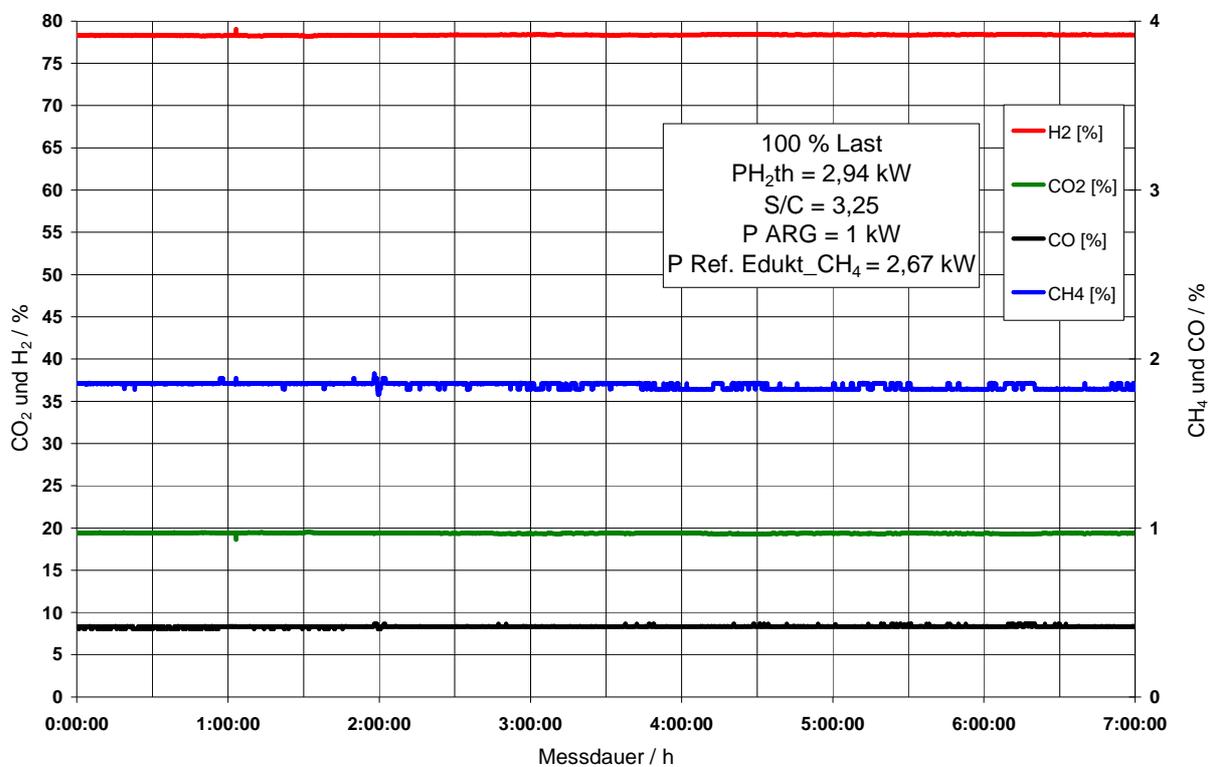


Abbildung 10: Gasqualität und Betriebsparameter im Nennlastpunkt

3.5.1 Zusammenhänge zur Wirkungsgradberechnung

Für die Durchführung der Simulationen war es sinnvoll, von einem reinen Methanbetrieb auszugehen, anstatt den praxisnäheren Erdgasbetrieb mit mehreren Kohlenwasserstoff-Komponenten zu berücksichtigen. Es wurde beschlossen, bei den Labortests ebenfalls nur mit reinem CH₄ zu arbeiten, um eine Grundvermessung unabhängig von schwankender Erdgasqualität zu realisieren.

Die bei der Wirkungsgradermittlung zu berücksichtigenden einzelnen Leistungen und Systemgrenzen werden in Abbildung 11 dargestellt. Bei Betrachtung der jeweiligen Wirkungsgrade müssen die entsprechenden Systemgrenzen mit ihren Medienströmen berücksichtigt werden. Bei Untersuchung des elektrischen Wirkungsgrads des Gesamtsystems spielt z.B. das ARG keine Rolle.

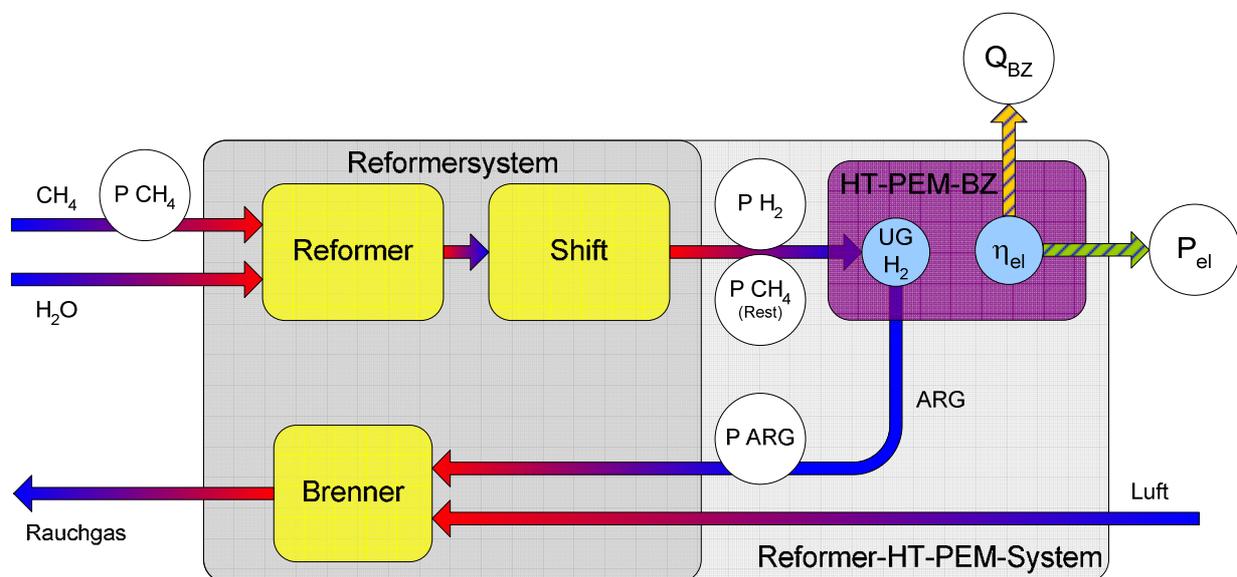


Abbildung 11: Skizze mit Systemgrenzen und Leistungen zur Wirkungsgradberechnung

Der Wirkungsgrad des Reformersystems wird aus der produzierten Wasserstoffleistung (P_{H_2}) im Verhältnis zu Reformereduktleistung (P_{CH_4}) zuzüglich der ARG-Brennerleistung (P_{ARG}), entsprechend Gleichung 1, berechnet.

$$\eta_{\text{Reformersystem}} = \frac{P_{H_2}}{P_{CH_4} + P_{ARG}} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Der elektrische Wirkungsgrad des Gesamtsystems ergibt sich aus der produzierten elektrischen Leistung im Verhältnis zu der Reformereduktleistung (P_{CH_4}). Die elektrische Leistung kann entsprechend Gleichung 2 zu Wasserstoffleistung (P_{H_2}) multipliziert mit dem Umsatzgrad (UG) multipliziert mit dem elektrischen Wirkungsgrad der BZ (η_{el}) berechnet werden.

$$\eta_{\text{elektrisch}} = \frac{P_{el}}{P_{CH_4}} = \frac{P_{H_2} \times UG \times \eta_{el}}{P_{CH_4}} \quad (\text{Gleichung 2})$$

Die im Reformersystem produzierte Wasserstoffleistung hängt von der Brennerleistung ab, welche die Konvertierung des CH_4 im Reformierreaktor bestimmt. Die Brennerleistung ist abhängig vom im ARG enthaltenen Restmethan und dem von der BZ gemäß dem Umsatzgrad nicht genutzten Wasserstoff.

Der Umsatzgrad stellt in diesem Zusammenhang eine zentrale Regelgröße dar, die alle anderen Parameter und damit natürlich auch die Wirkungsgradberechnung beeinflusst. Die Regelung erfolgt in dem Sinne, dass sich abhängig von der Temperatur im Reformierreaktor gemäß des thermodynamischen Gleichgewichts die Produktgaszusammensetzung einstellt. Ein Teil dieses Produktgases speist in Form des ARG wieder den Brenner. Der Restmethangehalt geht in die Brennerleistung direkt ein, während sich der Wasserstoffgehalt über den Umsatzgrad bestimmt. Ist der momentane Heizwert des ARG zu gering, um den Zustand der aktuellen Produktgaszusammensetzung stationär halten zu können, so wird die Konvertierung aufgrund sinkender Reformierungstemperaturen zu einem höheren Restmethangehalt verschoben, der dann wieder zu einer erhöhten Brennerleistung beiträgt, die entsprechend zeitversetzt den Restmethangehalt wieder sinken lässt. Das System ist also einer Selbstregelung unterworfen, die als Eingabegröße nur die Vorgabe der Reformeredukte und des Umsatzgrades benötigt.

In dieser Regelungskette ist im realen gekoppelten Reformier-Brennstoffzellen-System die Erfassung des elektrischen Wirkungsgrads relativ einfach, da die erzeugte elektrische Leistung nur ins Verhältnis zu der zugeführten Reformereduktleistung gesetzt werden muss.

3.5.2 Wirkungsgradbestimmung und die zentrale Rolle der Gasanalytik

Wenn die Dosierung des ARG synthetisch erfolgen muss, weil der Betrieb des Reformersystems ohne angeschlossene BZ erfolgen soll, so ist eine exakte online-Analyse der Reformierproduktgaszusammensetzung das wichtigste Element für die Angabe eines exakten Wirkungsgrads, da die von der Gasanalytik ausgegebenen Werte die Berechnungsgrundlage aller nachfolgenden Schritte bilden.

In der Praxis kommen diese Werte trotz regelmäßiger Reinstgaskalibrierung in Summe auf weniger als 100 %, was bereits grundsätzlich auf Ungenauigkeiten hinweist. Ein zusätzlicher Einfluss ergibt sich bei der Ermittlung des Produktgasvolumenstroms, der mit Hilfe der Kohlenstoffbilanz berechnet wird. Jedes zugeführte Kohlenstoffatom muss sich im Produktgas in Form von CO₂, CO oder CH₄ wiederfinden. Bei reinem Methanbetrieb ergibt sich so die Formel für den Produktgasstrom (\dot{n}_P): Der Stoffmengenstrom des CH₄ (Edukt) wird zu den kumulierten Stoffmengenanteilen von CO₂, CO und CH₄ im Produktgasstrom ins Verhältnis gesetzt, entsprechend Gleichung 3.

$$\dot{n}_P = \frac{\dot{n}_{CH_4}}{X_{CH_4} + X_{CO_2} + X_{CO}} \quad (\text{Gleichung 3})$$

Werden einer oder mehrere dieser Konzentrationen niedriger gemessen als der Realität entspricht, so ergibt sich fälschlicherweise ein zu hoher Produktgasstrom, auf welchen alle Konzentrationen der Analyse bezogen werden. Damit wird einerseits die produzierte Wasserstoffmenge zu hoch berechnet und andererseits eine unkorrekte ARG-Zusammensetzung mit zu hohem Brennwert ausgegeben. Damit ist bei einem relativ hohen Umsatzgrad immer noch eine gute Methankonvertierung möglich, was zusammen mit der ohnehin zu hoch berechneten Wasserstoffleistung einen sehr hohen Wirkungsgrad vortäuscht.

Um dieser Problematik zu begegnen, wurde eine Prüfgasflasche mit Reformatgaszusammensetzung zu Hilfe genommen, um die Gasanalyse mit einem realistischen Gasgemisch anstatt mit Reinstgasen zu überprüfen und ggfs. neu zu kalibrieren. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die fehlenden Anteile in der Gesamtsumme komplett den Gasmengenanteilen von CO₂ zugeschlagen werden müssten, um eine gute Übereinstimmung mit den Gasmengenanteilen in der Prüfgasflasche zu erhalten. Mit dieser Erkenntnis wurde die Dosierungsberechnung des ARG in der Steuerungssoftware modifiziert.

Um die Abhängigkeiten zwischen Reformersystem-Wirkungsgrad, elektrischem Wirkungsgrad und Umsatzgrad zu verdeutlichen, wurde bei Nennlast eine entsprechende Kennlinie aufgenommen. Dabei wurde stündlich die ARG-Brennerleistung durch Reduzierung des Umsatzgrads erhöht. Die Messreihe begann bei einem UG von 80 % und endete bei einem UG von 74 %. Der UG konnte nicht tiefer gewählt werden, da das Reformersystem sonst zu überhitzen drohte. Die Messergebnisse verdeutlicht Abbildung 12: Abhängig von der Verringerung des UG erhöht sich der Wirkungsgrad des Reformersystems stetig von ca. 76 % auf ca. 78 %, während der elektrische Wirkungsgrad relativ konstant bei etwa 40 % verbleibt

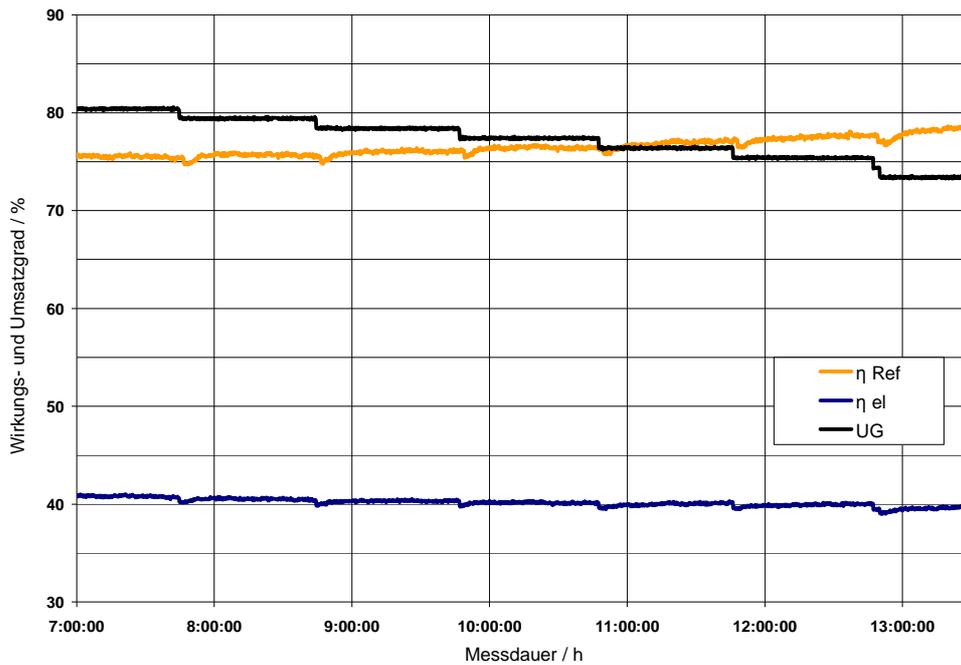


Abbildung 12: Wirkungsgrade im Volllastbetrieb abhängig vom Umsatzgrad (basierend auf korrigierten GA-Werten)

Um den Unterschied zu einem Betrieb ohne korrigierte Gasanalyse-Werte zu demonstrieren, wurde erneut die gleiche Kennlinie aufgenommen, wobei in diesem Fall die Produktgas-konzentrationen in Summe nur 98 % betragen. Den Kurvenverlauf zeigt Abbildung 13.

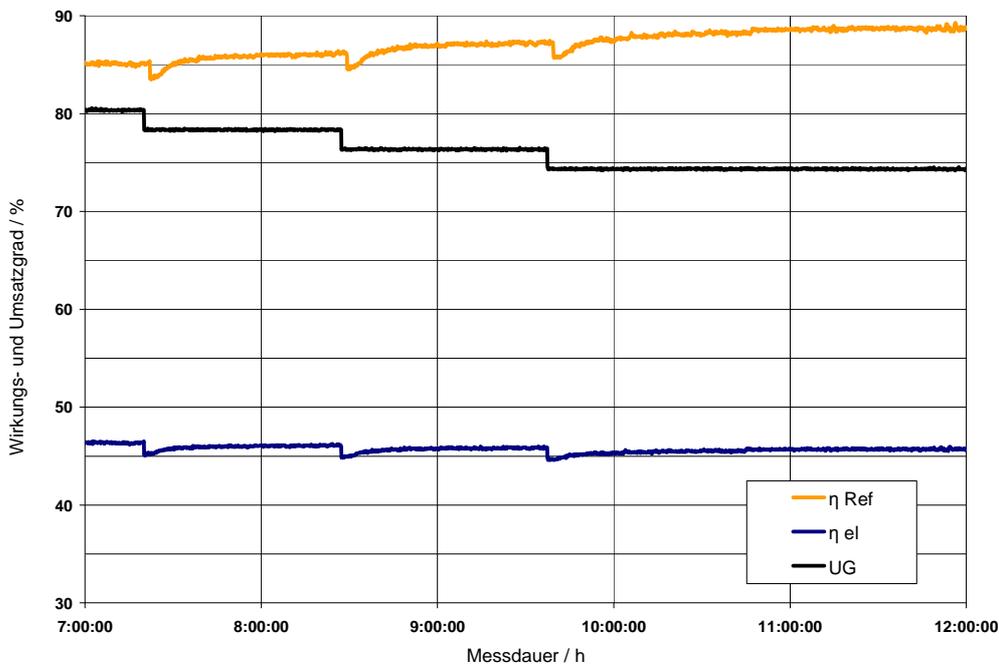


Abbildung 13: Wirkungsgrade im Volllastbetrieb abhängig vom Umsatzgrad (basierend auf unkorrigierten GA-Werten)

Qualitativ ist der Kurvenverlauf nahezu identisch mit Abbildung 12. Allerdings ist der Reformersystemwirkungsgrad um ca. 10 Prozentpunkte und der elektrische Wirkungsgrad um etwa 5 Prozentpunkte nach unten verschoben. Dieser enorme Unterschied ist nicht nur in den korrigierten Gasanalysewerten allein begründet, sondern beruht hauptsächlich auf dem neu eingeregelter, veränderten Systemzustand.

Der Unterschied ist in Abbildung 14 besser sichtbar. Hier sind der Reformersystemwirkungsgrad und der elektrische Wirkungsgrad korrigiert und unkorrigiert in Abhängigkeit vom Umsatzgrad dargestellt.

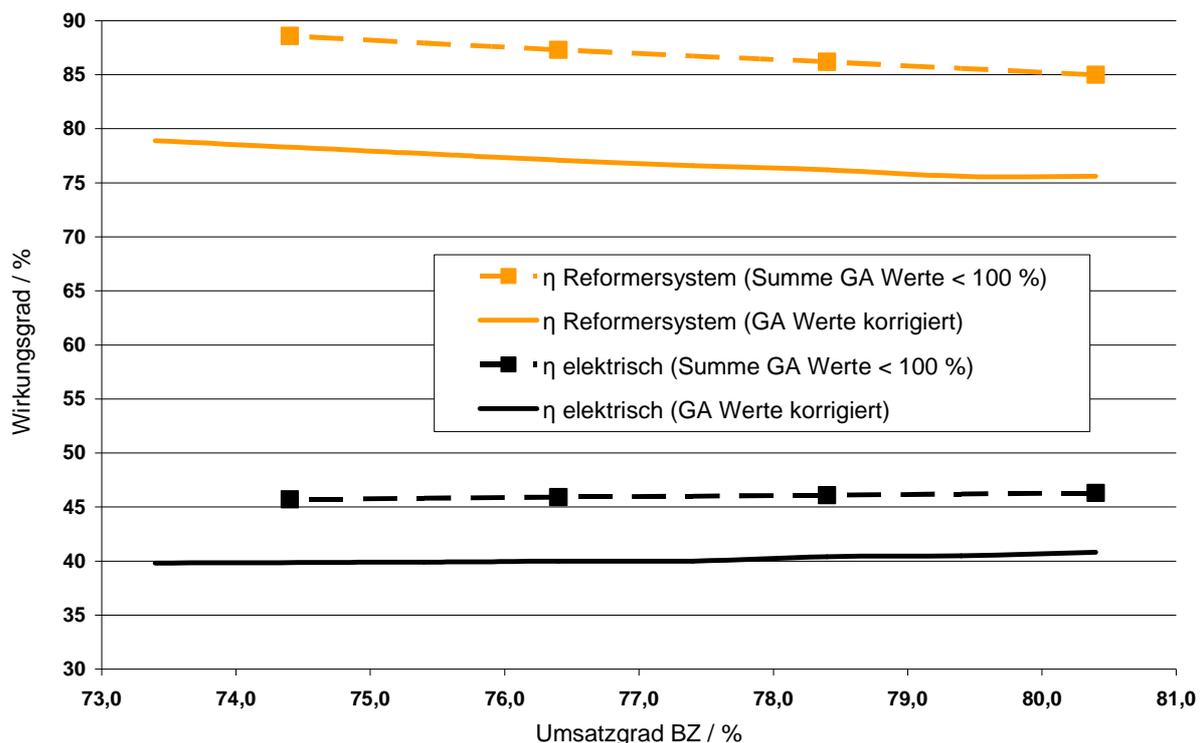


Abbildung 14: Wirkungsgradvergleich zwischen korrigierten und unkorrigierten GA-Werten

Die erhobenen Daten machten erkennbar, dass der elektrische Wirkungsgrad weitestgehend unbeeinflusst vom Umsatzgrad der BZ bleibt. Es ist allenfalls die Tendenz vorhanden, mit steigendem UG ebenfalls leicht zu steigen. Diese Tendenz ist aber bei weitem nicht so ausgeprägt, wie bei dem Wirkungsgrad des Reformersystems, welcher umgekehrt mit steigendem UG deutlich abnimmt.

Ergänzend ist hier noch zu bemerken, dass neben der Gasanalyse selbst weitere Fehlerquellen bei der Wirkungsgradberechnung berücksichtigt werden müssten. Beispielsweise können die Dosiereinheiten einen Fehler von bis zu einem Prozent vom

Messwert aufweisen und auch die Fehler der Gasmengenanteile in der Prüfgasflasche betragen +/- 2 Prozent.

3.6 Arbeitspaket 4: Technologische Bewertung der Hardwarelösung in der Praxis

Dieses Kapitel beschreibt, inwiefern sich die umgesetzte Hardwarelösung tatsächlich im Labortest bewährt hat, welche Herausforderungen noch bestehen und welche zukünftigen Lösungsansätze denkbar sind. Es werden das Anfahrprozedere und der Teillastbetrieb beschrieben sowie ein Vergleich des realen Systembetriebs mit den Simulationsergebnissen gezogen und daraus Optimierungspotentiale abgeleitet.

Die eigentliche Hardwarelösung hat sich bezüglich ihrer Robustheit über die Versuchsdauer hervorragend bewährt und erfüllte alle in Kapitel 3.4 definierten Anforderungen. Auch die Leistung der Wärmeübertrager war sehr zufriedenstellend.

3.6.1 Anfahrprozedere

Im angestrebten Praxisbetrieb stellt der aufzuheizende Shiftreaktor diejenige Komponente dar, welche die Anfahrzeit limitiert. Dies muss im Anfahrprozedere berücksichtigt werden. Einerseits wäre eine elektrische Beheizung des Shiftreaktors vorstellbar, was technologisch kein Problem darstellt, aber gegebenenfalls nicht gewünscht ist. Andererseits kann die Shiftvorheizung auch mit Wasserdampf erfolgen. Dabei muss die Trennung von der Katalysatorschüttung, z.B. durch eine Rohrwendel, sichergestellt sein. Letzteres ist notwendig, damit kein flüssiges Wasser am Shiftkatalysator ausfällt. Vor dem Eintritt in die Heizwendel durchströmt das Medium allerdings auch den Reformierreaktor ohne bauliche Trennung. Dies stellt in der umgesetzten Hardwarelösung deshalb kein Problem dar, da das Wasser bereits durch die Verdampfung mittels des vortemperierten HT-PEM-BZ Kühlmediums in dampfförmigem Zustand das System betritt und der Reformierreaktor selbst bereits ab Brennerstart sehr schnell die Temperaturen um 100 °C erreicht hat. Bei einer identischen Ausführung des Reformiersystems wäre ein solcher Anfahrvorgang bei Kopplung mit einer NT-PEM-BZ nicht denkbar, da keine Wasserverdampfung vor Reformierreaktoreintritt erfolgen könnte. Der Reformierkatalysator würde daher durch flüssiges Wasser ausgewaschen und Schaden nehmen.

Als ein möglicher Ausblick sei hier erwähnt, dass das vortemperte HT-PEM-BZ Kühlmedium ebenfalls zur direkten Shiftreaktortemperaturung genutzt werden könnte. Der Umweg über die Wasserverdampfung entfiere und es könnte ein bedeutend schnellerer Systemstart realisiert werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes betrug die Startzeit aus dem kalten Zustand bis zur Reformatgasproduktion bei Vollast etwa 100 Minuten. Dabei konnte eine sehr gute Produktgasqualität mit einem CO-Gehalt von unter 0,5 % gewährleistet werden.

3.6.2 Teillastbetrieb bei 50 % Last

Entsprechend der Vorgehensweise bei Vollastbetrieb wurde auch für Teillastbetrieb bei 50 % Last eine Messreihe aufgenommen, welche den Reformersystem-Wirkungsgrad und den elektrischen Gesamtwirkungsgrad abhängig vom gewählten Umsatzgrad aufzeigt. Die Ergebnisse werden in Abbildung 15 dargestellt.

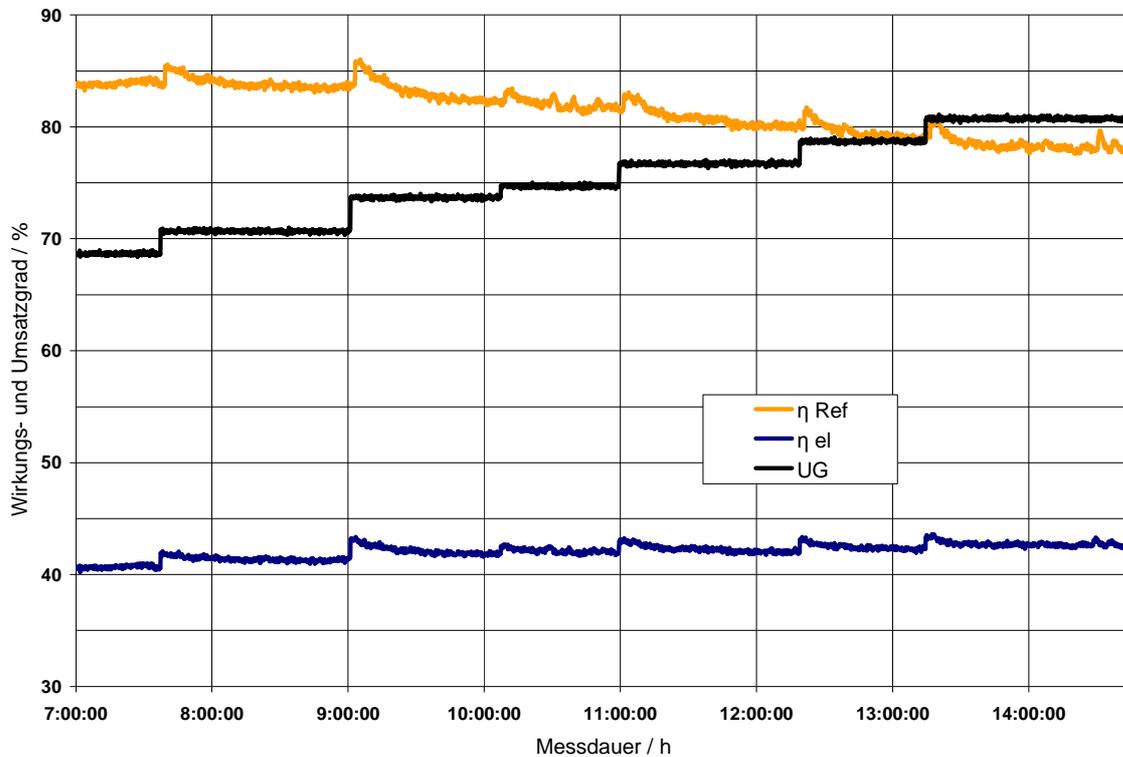


Abbildung 15: Wirkungsgrade im 50 % Teillastbetrieb abhängig vom Umsatzgrad (basierend auf korrigierten GA-Werten)

Auffällig ist die Tatsache, dass bei Teillast der geringste Reformersystem-Wirkungsgrad mit knapp 78 % signifikant höher liegt als bei Vollast. Der elektrische Wirkungsgrad erzielt in diesem Betriebspunkt mit ca. 43 % einen ebenfalls deutlich höheren Wert. Es wird geschlussfolgert, dass mit einem durch z.B. Geometrieoptimierungen modifizierten Reformierreaktor auch bei höheren Raumgeschwindigkeiten im Nennlastbereich ebenfalls höhere Wirkungsgrade zu erreichen sind.

3.6.3 Messergebnisse im Vergleich zur Simulation

Die Simulationswerkzeuge bieten nicht nur im Vorfeld die Möglichkeit zur Prozessauslegung. Mit den real erfassten Temperaturmesswerten kann die bereits modellierte, reale Prozesskette erneut simuliert werden, um aufzuzeigen, wo z.B. noch Wärmeverluste im System herrschen und Optimierungspotential besteht. Diese Untersuchung wurde beispielhaft für den 50 %

Lastpunkt vorgenommen, der mit über 84 % (mit korrigierten GA-Werten bei einem UG von 69 %) den besten Reformersystem-Wirkungsgrad der Vermessung aufweist. Bei Eingabe der realen Temperaturdaten in die Simulation konnte ermittelt werden, dass im Bereich der Reformierreaktor-Rauchgas-Wärmeübertragung ein Wärmeverlust von etwa 120 Watt zu verzeichnen ist. Dies ist kein sehr hoher Wert, allerdings vergrößert sich der Betrag stetig mit zunehmender Brennerleistung. Die Verluste nehmen also mit höheren Laststufen zu. In diesem Zusammenhang wird noch einmal deutlich, dass durch bessere Wärmedämmung und –einkopplung im Brennkammerbereich auch im Nennlastbetrieb noch entsprechend gute Wirkungsgrade zu erzielen wären.

Weiterhin auffällig war die gute Übereinstimmung der in der Vorwärmer/Brenner-Einheit aufgenommenen Temperaturmesswerte mit den simulierten Werten, obwohl in der Simulation keinerlei Übertragungsverluste berücksichtigt wurden, siehe nachfolgende Tabelle 3:

Tabelle 3: Vergleich von Simulationsdaten und Messwerten der Brenner/Vorwärmer-Einheit

Temperaturmessstelle	Simulation / °C	Reale Messwerte / °C
T_ARG Eintritt Brenner	614	575
T_Brennerluft Eintritt Brenner	363	372
T_Rauchgas nach ARG-Tausch	364	373
T_Rauchgas nach Brennerluft-Tausch	205	237

4 Plan zum Ergebnistransfer

Nachfolgend werden die im Bewilligungszeitraum (01.09.2010 bis 28.02.2013) und die darüber hinaus in 2013 durchgeführten Transfermaßnahmen aufgeführt.

2011

- Zwischenbericht 2010 an die AiF, März 2011

2012

- Treffen des projektbegleitenden Ausschusses, März 2012
- Zwischenbericht 2011 an die AiF, März 2012
- Vortrag auf der internationalen Fachkonferenz „Fuel Cells 2012 Science & Technology“, 11. bis 12.04.2012 in Berlin
 - o „Highly Integrated Steam Reforming Fuel Processor with Condensing Burner Technology for Maximised Electrical Efficiency of CHP-PEMFC Systems“
- Posterbeitrag auf der Fachtagung „5. AiF-Workshop Brennstoffzellenallianz 2012“, 22. und 23.05.2012 in Duisburg am ZBT
 - o „Entwicklung eines wirkungsgradoptimierten Reformersystems für HT- / NT-PEM Brennstoffzellenheizgeräte“
- Treffen des projektbegleitenden Ausschusses, Oktober 2012
- Artikel im Fachjournal „Energy Procedia“ von Elsevier, Volume 28, 2012, Seiten 57–65
 - o „Highly Integrated Steam Reforming Fuel Processor with Condensing Burner Technology for Maximised Electrical Efficiency of CHP-PEMFC Systems“

2013

- Vortrag auf dem Innovationsforum „hySmart – Wasserstoff für Industrie und dezentrale Energieerzeugung“, am 06.03. und 07.03. 2013 in Riesa
 - o „Reformer für KWK-Anlagen: Anforderungen und Lösungsansätze“
- Posterbeitrag auf der Fachtagung „6. AiF-Workshop Brennstoffzellenallianz 2013“, 23. und 24.04.2012 in Duisburg am ZBT
 - o „Entwicklung eines wirkungsgradoptimierten Reformersystems für HT-PEM Brennstoffzellenheizgeräte“
- Schlussbericht an die AiF, Mai 2013
- Veröffentlichung des Schlussberichts auf der ZBT-Homepage

5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

5.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Die durch das Projekt gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der theoretisch erzielbaren Wirkungsgrade eines HT-PEM Brennstoffzellenheizgerätes mit beschriebenen Konfigurationen stellen eine wichtige Orientierungsmarke dar, welche Effizienz mit dieser Technik erreichbar ist. Hersteller von Brennstoffzellenheizgeräten oder Reformersystemen bekommen somit die Möglichkeit, ihre Produkte zu bewerten und können aufgrund der detailliert beschriebenen Herangehensweise selbst prüfen, inwiefern ihr Produkt noch Optimierungspotential birgt.

Weiterhin wurde detailliert dokumentiert, welche wichtige Rolle die exakte Bestimmung der Gasmengenanteile im Produktgas gerade im Zusammenhang mit der ARG-Nutzung bei der Wirkungsgradbestimmung spielt. Gerätehersteller bekommen so aufgezeigt, welchen Einfluss auch kleinere Messfehler u.U. bei der Wirkungsgradbestimmung des eigenen Produktes oder eines Konkurrenzproduktes haben können.

Für die beteiligte Forschungsstelle weist der in diesem Forschungsvorhaben generierte Wissenszuwachs einen erheblichen Beitrag zur Weiterentwicklung von Reformersystemen auf, der auch für weitere Forschungsvorhaben eine wesentliche Grundlage darstellt.

5.2 Nutzen für Fachgebiete und Wirtschaftszweige

Durch den Ergebnistransfer dieses Forschungsvorhabens werden insbesondere Unternehmen in der Reformersystem- und Brennstoffzellenheizgerätebranche durch innovatives KnowHow gestärkt. Durch die in diesem Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse kann gerade im internationalen Vergleich ein wichtiger, grundlegender Wettbewerbsvorsprung aufgebaut werden. Viele Zulieferer profitieren von einem aufstrebenden neuen Technologiezweig sowohl im eigenen Land als auch für den Export.

Die von der durchführenden Forschungsstelle konzipierte Hardwarelösung konnte unter Beweis stellen, dass sich die theoretischen Erarbeitungen in die Praxis umsetzen lassen. Dieser Status bietet auf dem Weg zur Serienfertigung und Markteinführung einen großen wirtschaftlichen Vorteil bei den beteiligten Unternehmen.

Das mögliche zu erschließende Marktsegment im Bereich der Hausenergieversorgung wird auf ca. 900.000 Einheiten pro Jahr geschätzt. Aktuell müssen Brennstoffzellensysteme in Feldtests ihre Praxistauglichkeit beweisen, mit denen der Markteintritt, z.B. als

Brennstoffzellenheizgeräte mit netzgekoppelter Kraft-Wärme-Nutzung oder als autarke Energieversorgungssysteme für vielfältige Anwendungsfälle vorbereitet wird. Jegliche Effizienzsteigerung und jegliches zusätzliche KnowHow verschafft den Systemherstellern und Zulieferunternehmen Wettbewerbsvorteile gegenüber der internationalen Konkurrenz.

6 Durchführende Forschungsstelle

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH
Carl-Benz-Straße 201
D-47057 Duisburg

Leiter Forschungsstelle:
Projektleiter:

Prof. Dr. A. Heinzl
Dipl.-Ing. O. Pasdag

7 Förderhinweis

Das in diesem Schlussbericht beschriebene Forschungsvorhaben Nr.16561N der Forschungsvereinigung IUTA wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.