

# Abschlussbericht

**IGF-Vorhaben 15192 N**

**Entwicklung einer hoch modulierenden Gebläse-Brenner-Kombination für  
Reformersysteme zur dezentralen Wasserstofferzeugung**

**Forschungsstelle 1**

**Gaswärme-Institut e. V. Essen**

**Forschungsstelle 2**

**Universität-Duisburg-Essen**

Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik / Energietechnik

Duisburg-Essen, den 03. Dezember 2010

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Geschäftsführender Vorstand: Dr.-Ing. Rolf Albus

Wissenschaftlicher Vorstand: Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner

Kaufmännischer Vorstand: Dipl.-Betriebswirt Michael Radzuweit

Bankverbindung

Sparkasse Essen (BLZ 360 501 05)

Konto-Nr.: 208033

Mitglied der



Das IGF-Vorhaben 15192 N der Forschungsvereinigungen Gaswärme-Institut e.V. Essen und der Universität-Duisburg-Essen, Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik / Energietechnik 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.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Vorüberlegungen / Voruntersuchungen</b>	<b>2</b>
2.1	Analyse und Dokumentation des Ist-Zustandes	2
2.2	Simulation Brennstoffzellengesamtsystem	2
2.3	Definition Anforderungsprofile der Einzelkomponenten der Gebläse-Brenner-Kombination	6
<b>3</b>	<b>Brenner</b>	<b>8</b>
3.1	Auswahl und Konzeption des Brennersystems	8
3.2	Experimentelle Untersuchungen am Teststand	10
3.3	Konzeption und Aufbau des Reformerteststandes	26
3.4	Experimentelle Untersuchung des Brennersystems im Reformier	28
<b>4</b>	<b>Gebläse</b>	<b>39</b>
4.1	Entwurf und Konstruktion eines Verbrennungsluftgebläses	39
4.2	Fertigung durch Rapid Prototyping	43
4.3	Experimentelle Untersuchung und Optimierung der Radialmaschine	44
<b>5</b>	<b>Überwachung Regelung und Verbrennung</b>	<b>50</b>
5.1	Entwicklung eines Sensorikkonzeptes	50
5.2	Entwicklung einer Regelstrategie für das Brennersystem	51
5.3	Validierung der Regelstrategie ohne Reformier	53
<b>6</b>	<b>Brenner-System</b>	<b>54</b>
6.1	Fertigstellung eines Funktionsmusters der Gebläse-Brenner-Kombination	54
<b>7</b>	<b>Brenner-System im Reformier</b>	<b>55</b>
7.1	Einbau der Gebläse-Brennerkombination in den Reformier	55
7.2	Experimentelle Charakterisierung des Brenner-Systems im Reformier	58
7.3	Bewertung und Optimierung der Systemkette	69
<b>8</b>	<b>Nutzen der Forschungsergebnisse</b>	<b>70</b>
8.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	70
8.2	Wirtschaftlicher Nutzen für KMU	71
<b>9</b>	<b>Plan zum Ergebnistransfer</b>	<b>72</b>
<b>10</b>	<b>Schutzrechte</b>	<b>72</b>
<b>11</b>	<b>Danksagung</b>	<b>72</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>73</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>1</b>

# 1 Zusammenfassung

An ein Reformersystem zur dezentralen Wasserstoffherzeugung im kleinen Leistungsbereich zur Versorgung eines Brennstoffzellenheizgerätes (BZH) werden sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht besondere Anforderungen gestellt. Eine hohe Effizienz kann beispielsweise durch die thermische Verwertung von niederkalorischen Restgasen (z.B. Anodenrestgas einer Brennstoffzelle), die nach der Nutzung von wasserstoffreichen Reformatgasen zurückbleiben, erlangt werden. Um einen hohen Jahresnutzungsgrad und eine umweltfreundliche Betriebsweise des Reformersystems zu gewährleisten, ist es darüber hinaus notwendig, den Leistungsmodulationsbereich eines Reformersystems, der sehr stark von der Modulierbarkeit der Systemkomponenten Gebläse und Brenner abhängig ist, möglichst weit zu gestalten. Zudem ist eine angepasste Sensorik und Regelung der Gebläse-Brennerkombination für den zuverlässigen Betrieb des Systems erforderlich. All diese Anforderungen können nicht oder nur zum Teil von kommerziell erhältlichen Komponenten erfüllt werden.

Im Rahmen des IGF-Vorhabens 15192 N „Entwicklung einer hoch modulierenden Gebläse-Brenner-Kombination für Reformersysteme zur dezentralen Wasserstoffherzeugung“ wurde daher von den Forschungsstellen Gaswärme-Institut e. V. Essen (FSt. 1) und Universität Duisburg-Essen, Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik (FSt. 2) eine hoch modulierende Gebläse-Brenner-Kombination für den Einsatz in einem Reformersystem mit einer thermischen Wasserstoffleistung von 7,5 kW entwickelt. Die dazu gehörige thermische Brennerleistung beträgt etwa 3 kW. Als geeignetes Brennerkonzept wurde ein Vliesbrenner bzw. Flächenbrenner ausgewählt, um eine Verbrennung von Gasen mit sehr unterschiedlicher Zusammensetzung (Erdgas beim An- und Abfahren des Systems, feuchte Anodenrestgase der Brennstoffzelle im Normalbetrieb) und wegen der angestrebten Modulation von z.B. mindestens 1 zu 4 auch in einem weiten Leistungsbereich zu realisieren. Auf der Basis von Simulationsdaten wurden unter Berücksichtigung der möglichen Betriebszustände die Auslegungsparameter für die Brennerauslegung ermittelt. Ein solcher Vliesbrenner wurde von der FSt. 1 entwickelt und umfassend in einem Brenner-Teststand im Freibrand charakterisiert. Ein zweites, baugleiches Exemplar des Brenners konnte bei der FSt. 2 in einer realen Reformierumgebung seine grundsätzliche Eignung hinsichtlich Modulation, Wärmeeinbringung und Schadgasemissionen nachweisen.

Ein bezüglich Volumenstrom und Druckerhöhung passendes, drehzahlreguliertes Radialgebläse wurde bei der FSt. 2 entwickelt und mit Hilfe des Rapid Prototyping hergestellt. Nach einigen Modifikationen konnte das Gebläse in einem speziellen Komponenten-Prüfstand die geforderten Betriebsparameter nachweisen. Anschließend wurde das Gebläse mit dem Flächenbrenner, einer Lambda-Sonde und einem PID-Regler zum Funktionsmuster einer geregelten Gebläse-Brenner-Einheit kombiniert. Mit der Lambda-Sonde wird der Sauerstoffgehalt im Rauchgas ermittelt und über die Drehzahl des Gebläses kann die gewünschte stöchiometrische Luftzahl eingestellt werden. Die Regelparameter wurden nach Ziegler/Nichols ermittelt. Das geeignete Zusammenwirken von realem Reformer, Brenner, Gebläse und Regelung konnte abschließend durch Messungen nachgewiesen werden, wobei hinsichtlich der Modulation der Gebläse-Brenner-Kombination 1 zu 4 für den Normalbetrieb und sogar 1 zu 8 für den Störfall gezeigt werden konnten.

**Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.**

## 2 Vorüberlegungen / Voruntersuchungen

### 2.1 Analyse und Dokumentation des Ist-Zustandes

Eine wesentliche Herausforderung bezüglich der Wärmeversorgung des Reformers mittels eines Brenners kleiner Leistung besteht darin, dass der Brenner Brennstoffe unterschiedlichster Zusammensetzung sauber verbrennen muss und dies in einem weiten Modulationsbereich realisieren soll. Während der Startphase und der Inbetriebnahme des Reformers wird der Brenner mit Erdgas betrieben, welches überwiegend aus Methan besteht. Während des Reformerbetriebs muss der Brenner in der Lage sein, feuchtes Anodenrestgas von der Brennstoffzelle, welches wegen des signifikanten  $\text{CO}_2$ -Gehaltes relativ niederkalorisch ist, vollständig und mit geringen Schadstoffemissionen zu verbrennen [Bra2005]. Es werden von den Entwicklern von Reformern [Ma2003] unterschiedliche Brennerkonzepte [Die2006], [Wue2006] eingesetzt, häufig kommt ein relativ einfach gestalteter, kostengünstiger Flammenbrenner zum Einsatz. Der Flammenbrenner ist meist gekennzeichnet durch eine schmale Bauform und ähnelt im Prinzip einem Bunsenbrenner. Der Flammkegel hat einen verhältnismäßig geringen Durchmesser. Aufgrund dessen ist die Wärmeeinbringung in die Brennkammer in der Regel stark konzentriert, es gibt einen deutlich ausgeprägten Ort maximaler Temperatur (Hot Spot) direkt oberhalb der Flamme. Bei einem Vliesbrenner oder Flächenbrenner liegt, wie der Name schon sagt, eine deutlich größere Oberfläche im Bereich der Verbrennung vor. Den Abschluss der Verbrennungsoberfläche bildet oft ein Metallfaservlies, welches zudem die Funktion eines Flammenhalters bzw. einer Flammensperre übernimmt. Die Wärmeeinbringung in den Reformierungsreaktor erfolgt, bedingt durch die größere Verbrennungsoberfläche, dann weniger punktuell und damit erheblich schonender für das Reformierwandmaterial im Vergleich zum Flammenbrenner.

### 2.2 Simulation Brennstoffzellengesamtsystem

Um die theoretischen Grundlagen für die Brennerentwicklung zu erarbeiten, ist eine bilanzierende Betrachtung des gesamten Reformersystems im Rahmen einer Simulationsrechnung notwendig. Die Simulation umfasst das Reformersystem unter Berücksichtigung auch der Brennstoffzelle. Die Brennstoffzelle beeinflusst das Reformersystem durch die Einspeisung des Anodenrestgases, welches dem

Brennersystem zugeführt wird. Das Produktgas verlässt das Reformersystem und wird der Brennstoffzelle zugeführt. Die Brennstoffzelle wird in dieser Simulation vereinfacht als Wasserstoffabscheider betrachtet. Sie trennt dabei gedanklich einen Teil des Wasserstoffs, charakterisiert durch die Wasserstoffgasausnutzung bzw. Fuel Utilisation (FU), aus dem Reformatgasstrom ab. Dieser Teil wird in der Brennstoffzelle zu Strom und Wärme umgesetzt. Das wasserstoffärmere Restgas, welches den Wasserstoffabscheider in der Simulation verlässt, entspricht dann quasi dem Anodenrestgas (ARG) der Brennstoffzelle. Dieses Restgas wird dem Brennersystem zur Wärmeversorgung des Reformers zugeführt. Die exakte Brennerleistung, die sich aus der Verbrennung des ARG der Brennstoffzelle und einem gegebenenfalls zusätzlich noch zugeführten Anteil an Erdgas zusammensetzt, kann damit in der Simulation z.B. in Form eines adiabaten Verbrennungsreaktors ermittelt werden.

Für die Übertragung auf den späteren realen Versuchsbetrieb ist erfahrungsgemäß die Definition eines Standard-Systemzustandes sinnvoll. Basis für die Definition bildet die Brennstoffzelle, welche einen Leistungsbereich von bis zu  $2,5 \text{ kW}_{\text{elektr.}}$  erbringen soll. Darauf basierend wird für die Brennstoffumsetzung in der Brennstoffzelle ein typischer Wert von  $FU = 0,7$  angesetzt. FU (Fuel Utilisation) bezeichnet, wie oben bereits erwähnt, den Umsatzgrad des verfügbaren Wasserstoffs im Verhältnis zum tatsächlich umgesetzten Wasserstoff in der Brennstoffzelle ( $FU = \text{umgesetzte H}_2\text{-Menge} / \text{zugeführte H}_2\text{-Menge}$ ). Der elektrische Wirkungsgrad der Brennstoffzelle für die Umsetzung des Wasserstoffs wird mit  $\eta_{\text{elektr.}} = 0,5$  als typischer Wert angenommen. Somit kann die benötigte thermische Wasserstoffleistung des Reformersystems zu ca.  $7,15 \text{ kW}_{\text{therm}}$  berechnet werden. Da dem System noch keine SeIOx-Stufe zur CO-Feinreinigung nachgeschaltet ist, welche einen leichten Wasserstoffverlust zur Folge hat, wurde die vom Reformersystem erzeugende thermische Wasserstoffleistung zu  $P_{\text{H}_2, \text{therm.}} = 7,5 \text{ kW}$  angenommen.

Mit Hilfe der Vorüberlegungen bezüglich der Wasserstoffleistung wurde dann die Simulation des Reformersystems durchgeführt. Die Berechnung beruht dabei in erster Näherung auf der Annahme, dass in den Reaktoren des Reformers das thermodynamische Gleichgewicht der chemischen Reaktionen erreicht wird. Nach den am Lehrstuhl Energietechnik vorliegenden langjährigen Erfahrungen ist dies eine ausreichend genaue Beschreibung des Reformierungsprozesses, insbesondere, wenn nur eine Stoff- und Energiebilanz zu erstellen ist. Die vorgegebenen Drücke

und Temperaturen bestimmen dann maßgeblich neben den eingesetzten Edukten die Reaktionsgleichgewichte in den Reaktoren und damit die Produktgasqualität, so dass hier ebenfalls Standardwerte festgelegt werden mussten.

Für die Reaktionen im Reformer wurde ein Druck von  $p = 1,01325 \text{ bar}_{\text{absolut}}$  und eine Temperatur von  $T_{\text{Reformer}} = 650 \text{ °C}$  für die Berechnung der Produktgaszusammensetzung der Reformerstufe angenommen. Die weiteren Prozessparameter wurden zu  $T_{\text{Shift-Eingang}} = 120 \text{ °C}$ ,  $T_{\text{SelOx-Eingang}} = 235 \text{ °C}$  und  $T_{\text{Brennstoffzelle-Eingang}} = 70 \text{ °C}$  festgelegt. Die Simulation liefert für den so definierten Standard-Systemzustand als stationäre Nennbetriebspunkt über die Massen- und Energiebilanzen die Gasströme (Volumenströme und Zusammensetzungen an allen Stellen im Gesamtsystem) und damit auch die Menge und die Zusammensetzung des Anodenrestgases als Brenngas für den Reformerbrenner. Reicht die Heizleistung des Anodenrestgases nicht für die Reformerbeheizung aus, wird noch die entsprechende Menge an Erdgas (bzw. Methan) zudosiert.

Der Teillastbereich des Systems wird durch einfaches lineares Skalieren der Werte am Nennbetriebspunkt berechnet. Im späteren Verlauf des Projektes wurde die Simulation des Teillastbereiches aber mit Hilfe der am realen Reformer gewonnenen Messwerte (z.B. wegen der absolut nahezu konstanten, aber relativ steigenden Wärmeverluste über die Reformeraußenwand) angepasst, wodurch im Teillastbereich in der Regel eine höhere Brennerleistung notwendig wird, als durch lineares Skalieren berechnet. Im realen Reformerbetrieb müssen dann im Teillastbereich größere Brennerleistungen für den stationären Fall eingestellt werden als sich aus der Simulation ergeben.

Die wesentlichen Ergebnisse der Simulation, die berechneten Brenngas-Volumenströme, die in der folgenden Tabelle 2.2.1 zusammenfassend dargestellt sind, helfen dabei, die notwendigen Betriebsparameter und dessen Grenzwerte zur Definition eines Anforderungsprofils für den einzusetzenden Brenner, das Gebläse und auch für die Sensorik/Regelung zu ermitteln und die Variation der Betriebsdaten zur Erstellung eines Versuchsprogramms für die experimentellen Untersuchungen festzulegen. Darüber hinaus dient die Simulation zur Generierung von Vergleichs- und Referenzdaten, anhand der die theoretischen Potenziale zur Effizienzsteigerung durch Anodenrestgasnutzung aufgezeigt und schließlich die praktisch erzielten Verbesserungen nachgewiesen werden können.

**FU = 0,6**

Brennerleistung	Brennerleistung	Luft	CH4 Br	CO2 ARG	N2 ARG	CH4 ARG	H2O ARG	H2	CH4 Ref	N2 Ref	H2O Ref
[%]	[kW]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]
25	0,75	12,7114	0	2,2206	0,2822	0,2327	20,602	3,5194	2,631	0	0,4335
50	1,5	25,4405	0	4,4443	0,5648	0,4656	41,2326	7,0437	5,262	0	0,867
75	2,25	38,152	0	6,6649	0,8471	0,6983	61,8346	10,5631	7,893	0	1,3005
100	3	50,8811	0	8,8886	1,1297	0,9313	82,4652	14,0874	10,524	0	1,734

**FU = 0,7**

Brennerleistung	Brennerleistung	Luft	CH4 Br	CO2 ARG	N2 ARG	CH4 ARG	H2O ARG	H2	CH4 Ref	N2 Ref	H2O Ref
[%]	[kW]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]
25	0,75	12,8096	0,0383	2,6933	0,3423	0,2822	21,4934	3,2014	2,631	0	0,4335
50	1,5	25,6193	0,0765	5,3866	0,6846	0,5644	42,9868	6,4028	5,262	0	0,867
75	2,25	38,4111	0,1147	8,0761	1,0264	0,8462	64,4502	9,5997	7,893	0	1,3005
100	3	51,2207	0,153	10,7694	1,3687	1,1283	85,9436	12,8011	10,524	0	1,734

**FU = 0,8**

Brennerleistung	Brennerleistung	Luft	CH4 Br	CO2 ARG	N2 ARG	CH4 ARG	H2O ARG	H2	CH4 Ref	N2 Ref	H2O Ref
[%]	[kW]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]	[l/min]
25	0,75	13,3311	0,3577	2,6669	0,339	0,2794	17,8235	2,1134	2,631	0	0,4335
50	1,5	26,6621	0,7154	5,3338	0,6779	0,5589	35,647	4,2268	5,262	0	0,867
75	2,25	39,9932	1,0731	8,0007	1,0169	0,8383	53,4705	6,3403	7,893	0	1,3005
100	3	53,3243	1,4308	10,6676	1,3558	1,1177	71,294	8,4537	10,524	0	1,734

**Tabelle 2.2.1:** Simulierte Eduktgasvolumenströme für die 12 Hauptmesspunkte (4 Brennerleistungen bei 3 verschiedenen Brenngasausnutzungen und  $\lambda = 1,2$ )



## 2.3 Definition Anforderungsprofile der Einzelkomponenten der Gebläse-Brenner-Kombination

Aus den in Tabelle 2.2.1 und in der folgenden Tabelle 2.3.1 dargestellten, simulierten Brenngas-Volumenströmen lassen sich zahlreiche Anforderungen ableiten, die die einzelnen Komponenten der Gebläse-Brenner-Kombination erfüllen müssen. Der Brenner muss in der Lage sein sehr **unterschiedliche Qualitäten von Brenngasen** zu verbrennen. Während des Anfahrens steht zum Beispiel noch kein Anodenrestgas zur Verfügung. Der Brenner wird in dieser Phase mit **Erdgas** (Methan) befeuert. Im Normalbetrieb kann dann auf **Anodenrestgas**-Nutzung umgeschaltet werden. Falls der Energieinhalt des ARG nicht ausreicht, um den endothermen Reformierprozess aufrecht zu erhalten, wird eine Zudosierung von Erdgas vorgenommen wodurch sich wieder andere Gaszusammensetzungen ergeben.

$FU / -$	Methan	Reformat	ARG 1	ARG 2	ARG 3
		0,0	0,6	0,7	0,8
Komponente					
H <sub>2</sub> / %	-	71,3	52,5	45,8	36,5
CH <sub>4</sub> / %	100	1,9	3,5	4,1	4,8
CO <sub>2</sub> / %	-	18,1	33,4	38,8	46,4
N <sub>2</sub> / %	-	2,3	4,2	4,9	5,9
H <sub>2</sub> O / % ( $T_{cond} = 40^{\circ}C$ )	-	6,4	6,4	6,4	6,4
Eigenschaften					
Heizwert					
$H_i / MJ/m^3$	35,88	8,37	6,91	6,39	5,67
Wobbeindex					
$H_i / MJ/m^3$	48,07	13,1	8,57	7,43	6,11
spez. Volumenstrom Gas					
/ l/(min kW)	1,67	7,23	8,64	9,34	10,52
Luftbedarf					
$R_{stoch} / m^3_{Luft}/m^3_{Gas}$	9,52	1,88	1,582	1,477	1,330
spez. Luftmenge					
/ l/(min kW)	15,90	13,58	13,67	13,80	13,99
Volumenstrom Edukt					
/ l/(min kW)	17,57	20,82	22,31	23,14	24,51
Flammgeschwindigkeit					
$v_{Fl} / m/s$	0,42	-	0,55	0,38	0,23
Zündgrenzen (Gl. 2.33)					
$c_{Zu} / \%$	5,0	5,5	7,2	8,2	9,9
$c_{Zo} / \%$	15,0	68,0	60,0	56,5	51,2

**Tabelle 2.3.1:** Simulierte Zusammensetzung und Eigenschaften eingesetzter Brenngase

Im Falle einer Störung (z.B. **Lastabwurf** des Netzes, Brennstoffzelle setzt keinen Wasserstoff um) kann es außerdem notwendig sein, kurzzeitig das nicht in der Brennstoffzelle umgesetzte **Reformatgas** vollständig zu verbrennen. Die Veränderungen der Brenngaseigenschaften für die Haupt-Betriebspunkte sind in Tabelle 2.3.1 dargestellt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass es sich bei Anodenrestgas um ein **feuchtes Gas** handelt. Der Umgang mit dem gasförmigen Wasser bedarf einer gesonderten Betrachtung, da unkontrollierte Kondensation durch Abkühlung z.B. bei der Vermischung von Brenngas und kalter Verbrennungsluft negative Auswirkungen auf den Betrieb des Brenners wie z.B. Korrosion, Druckstöße oder Versagen der Flammenüberwachung zur Folge haben kann. Eine gesonderte Vorwärmung, Prozessführung oder eine gezielte Kondensation der Eduktgase ist dann notwendig. Aus energetischen Gründen wird allerdings keine aktive Kühlung des ARG vor dem Brenner in Betracht gezogen, was dazu führt, dass immer eine gewisse Restfeuchte im ARG vorhanden bleibt.

Neben der Zusammensetzung der Brenngase spielt die **Leistungsmodulation** eine entscheidende Rolle. Der Brenner muss in der Lage sein sowohl niedrige Lastpunkte im Bereich von 25 Prozent der ausgelegten Leistung, als auch hohe Leistungen im Volllastbereich fahren zu können. Das Gebläse muss die benötigte Verbrennungsluft für jeden dieser Lastpunkte zur Verfügung stellen.

Der Brenner muss zudem in jedem der geforderten Betriebszustände, von 25 bis 100 Prozent der Auslegungsleistung, eine ausreichende **Wärmeeinbringung** in den Reformer gewährleisten können, um einen effizienten Reformerbetrieb zu ermöglichen. Diese Wärmeeinbringung lässt sich über das Temperaturprofil der Brennkammer und die Produktgasqualität des Reformatgases überprüfen.

Der Brenner muss außerdem in der Lage sein, das Brenngas effizient und sauber zu verbrennen [War1997]. Die **Schadstoffemissionen** müssen dabei nicht nur die gesetzlichen und freiwilligen Grenzwerte einhalten, sie sollten sich auch an den Emissionen moderner Gas-Brennwertgeräte messen lassen.

Zuletzt sollte auf eine gute **Integrierbarkeit** des Brenners in den Reformer geachtet werden. Der Brennraum von Reformern ist häufig zylindrisch ausgeführt. Der Brenner sollte der Geometrie entsprechen und eine gleichmäßige Beheizung des Zylinders erlauben. Zudem ist zu beachten, dass der Brenner im Vergleich zum gesamten System keinen zu hohen apparativen Aufwand einnimmt.

## 3 Brenner

### 3.1 Auswahl und Konzeption des Brennersystems

Brennersysteme die es zurzeit am Markt gibt, z.B. Brenner für Gasheizungen besitzen nur ein eingeschränktes Modulationsvermögen von etwa 1:3 oder 1:5. Außerdem können sie im Teillastbetrieb unter 50% der maximalen Brennerleistung keine ausreichende Wärmeeinbringung bzw. Betriebssicherheit garantieren.

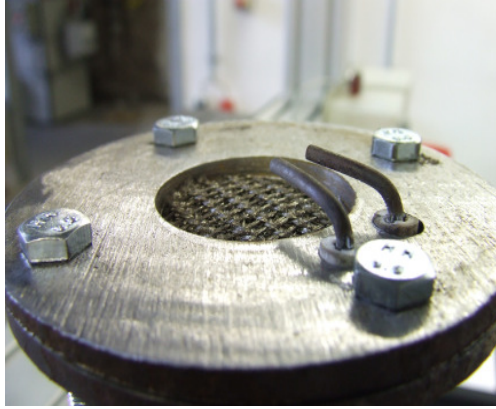
Die wechselnde Gaszusammensetzung bei unterschiedlichen Betriebszuständen des Reformers stellt für bisher erhältliche Gasbrenner eine schwer zu erfüllende Anforderung dar.

Beim Startvorgang steht kein Anodenrestgas zum Brennerbetrieb und zur Aufheizung des Reformers zur Verfügung, deshalb muss auf Erdgas zurückgegriffen werden. Im Normalbetrieb wird der Brenner mit rezirkuliertem Anodenrestgas aus Brennstoffzelle bzw. Reformerabgas betrieben. Sofern der Energieeintrag für die endotherme Reformierung nicht ausreicht, wird zusätzlich zum Anodenrestgas Erdgas zugemischt und verbrannt.

Der Teillastbetrieb des Reformerbrenners stellt eine besondere Anforderung dar. Um den Brenner möglichst kontinuierlich betreiben zu können, bedarf es einer hohen Modulationsfähigkeit der Brenner-Gebläse-Kombination von 1:10 (erwünschte Heizleistung von ca. 0,3 bis 3 kW). Dadurch können materialschwächende und stark schadstoffemittierende Start- und Stoppvorgänge des Systems vermieden werden und der Brenner kann umweltverträglich und wirtschaftlich betrieben werden. Dadurch lassen sich auch Lebensdauer und Gesamt-Jahresnutzungsgrad erhöhen.

Aufgrund der genannten Anforderungen wird ein Metallfaser-Flächenbrenner ausgewählt und den experimentellen Untersuchungen unterzogen.

Beim Metallfaser-Flächenbrenner findet die Verbrennung oberflächlich auf einem Metallvlies-Gewebe statt. Das Brenngas wird mit Luftsauerstoff im Brenner-Hüllrohr vermischt und auf dem Metallvlies-Gewebe gezündet und verbrannt, siehe Abbildung 3.1-1.



**Abbildung 3.1-1:** Brennerflansch mit Metallvlies-Brenngewebe

Die geringen Anschaffungskosten, die Langlebigkeit und Robustheit eines solchen Brennervlieses, sowie die gleichmäßige Wärme- und Flammenverteilung eignen sich besonders für das Konzept des Reformerbrenners. Weitere Vorteile sind die variable Geometriegestaltung der Brenneroberfläche und die hohe Modulierbarkeit und Flammenstabilität, bei geringer Emissionsentwicklung aufgrund vollständiger Vermischung und Verbrennung.

Da im Untersuchungszeitraum kein geeigneter Standard-Metallvlies-Brenner am Markt verfügbar war, musste ein entsprechender Brenner entwickelt, ausgelegt und erprobt werden.

## 3.2 Experimentelle Untersuchungen am Teststand

Im Hinblick auf wechselnde Gaszusammensetzungen beim Betrieb mit rezirkuliertem Anodenrestgas aus Brennstoffzelle und Reformier sind einige Kenngrößen zu beachten und vorab zu bestimmen.

### Heizwert und Brennwert

Eine elementare Kenngröße ist der Brennwert ( $H_s$ ) bzw. der Heizwert ( $H_i$ ), die sich jeweils auf die Masse bzw. auf das Volumen des Brennstoffs beziehen.

Der Brennwert ( $H_s$ ) ist definiert als der Quotient aus der negativen Reaktionsenthalpie ( $-\Delta H$ ) des Brennstoffs und seinem Volumen im Normzustand.

Wenn im Falle einer Verbrennung von realen Gasen in Spuren enthaltenes Wasser (Gasfeuchte) im Brenngas bzw. später im Abgas enthalten ist und dabei gasförmig vorliegt, ist vorrangig der Heizwert  $H_i$  (frühere Bezeichnung: unterer Heizwert ( $H_u$ )) von Interesse.

Dabei wird beim Heizwert ( $H_i$ ) das Produkt aus der Verdampfungsenthalpie des Wassers  $h_v$  und seines Volumenanteils im Brenngas abgezogen, da vom gasförmigen Zustand des im Brennstoff bzw. Abgas enthaltenen Wassers ausgegangen wird, siehe Gleichung 3.2-1.

$$H_i = H_s - (r_n \cdot \varphi_{H_2O}) = \frac{-\Delta H_{\text{Brennstoff}}}{V_{\text{Norm, Brennstoff}}} - (h_v \cdot \varphi_{H_2O}) \quad (3.2-1)$$

wobei:

$-\Delta H$  = Enthalpiegehalt des Gases in kJ/mol

$V_{\text{Norm, Brennstoff}}$  = Volumen im Normzustand (bei  $P = 1013,25$  hPa;  $T = 0$  °C)

$h_v$  = Verdampfungsenthalpie von Wasser bei Normzustand ( $r_n = 45,054$  kJ/m<sup>3</sup>)

$\varphi_{H_2O}$  = Volumenanteil des gasförmig enthaltenen Wassers bezogen auf das Normvolumen des Brenngases in %

Der Brenn- bzw. Heizwert wird in der Regel experimentell durch Verbrennung eines bestimmten Gasvolumens unter Luftüberschuss und der damit verbundenen Temperaturerhöhung eines bestimmten Wasservolumens, in einem sog. Junkers-Kalorimeter bestimmt.

Unabhängig von experimentell ermittelten Brenn- bzw. Heizwerten, können diese auch durch eine Näherungsgleichung errechnet werden, siehe Gleichung 3.2-2:

Für den gesuchten Heizwert ( $H_i$ ) ergibt sich:

$$H_i = (282,98 \cdot n(\text{CO}) + 241,81 \cdot n(\text{H}_2) + 802,60 \cdot n(\text{CH}_4) + 1323,15 \cdot n(\text{C}_2\text{H}_4) + 1428,64 \cdot n(\text{C}_2\text{H}_6) + 1925,97 \cdot n(\text{C}_3\text{H}_6) + 2043,11 \cdot n(\text{C}_3\text{H}_8) + 2657,32 \cdot n(\text{C}_4\text{H}_{10})) \text{ [kJ/mol]} \quad (3.2-2)$$

bzw. vereinfachend für niedrigere  $\text{C}_x\text{H}_y$ -Verbindungen, siehe Gleichung 3.2-3:

$$H_i = (282,98 \cdot n(\text{CO}) + 241,81 \cdot n(\text{H}_2) + 802,60 \cdot n(\text{CH}_4) + \sum (z_{\text{C}_x\text{H}_y} \cdot n(\text{C}_x\text{H}_y)) \text{ [kJ/mol]} \quad (3.2-3)$$

wobei:  $z_{\text{C}_x\text{H}_y}$  = Molenbruch bzw. Volumenanteil der Gaskomponente am Gesamtvolumen

Ausgehend vom Heizwert für Methan und Wasserstoff, lässt sich auch der Heizwert vom Anodenrestgas berechnen:

$$H_{i,\text{CH}_4} = 802,60 \text{ MJ/kmol} = 9,97 \text{ kWh/m}^3$$

$$H_{i,\text{H}_2} = 241,81 \text{ MJ/kmol} = 2,99 \text{ kWh/m}^3$$

$$H_{i,\text{ARG}} = r_{\text{CH}_4} \cdot H_{i,\text{CH}_4} + r_{\text{H}_2} \cdot H_{i,\text{H}_2} = 0,041 \cdot H_{i,\text{CH}_4} + 0,458 \cdot H_{i,\text{H}_2} \\ = 143,66 \text{ MJ/kmol} = 1,79 \text{ kWh/m}^3$$

Zusammen mit der angestrebten thermischen Leistung ( $\dot{Q}$ ) von 0,3 bis 3,0 kW und dem Heizwert  $H_i$  von Methan, bzw. Anodenrestgas, lässt sich der benötigte, reale

Brenngas-Volumenstrom  $\dot{V}_{Gas}$ , sowie der benötigte Volumenstrom der Verbrennungszuluft  $\dot{V}_{Luft}$  bestimmen, siehe Gleichung 3.2-4 und Gleichung 3.2-5:

$$\dot{V}_{Gas} = \frac{\dot{Q}}{H_{i,Gas}} \quad (3.2-4)$$

$$\dot{V}_{Luft} = \dot{V}_{Gas} \cdot l \quad (3.2-5)$$

Dabei sind alle gesamten Werte von  $\dot{V}_{Gas}$  und  $\dot{V}_{Luft}$  für Wärmeleistungen von 0,3 bis 3,0 kW bei verschiedenen Luftzahlen  $\lambda = 1,1; 1,2$  und  $1,3$  tabellarisch im Anhang aufgeführt.

### Wobbeindex

Um Aussagen über die Austauschbarkeit und Qualität der zur Verbrennung eingesetzten Brenngase machen zu können, kann der Wobbeindex  $W$  definiert werden. Er kann zur Bewertung der Wärmeleistung der Brennerflamme herangezogen werden, um zu klären, ob ein anderes Gas bei sonst gleichen Brennerbedingungen eingesetzt werden kann. Ist der Wobbeindex zweier Gase annähernd gleich, ist der Wärmeeintrag durch die Brennerflamme, trotz möglicher verschiedener Gasdichten, gleich. Der Wobbeindex stellt also einen korrigierten Heizwert dar und ist in Gleichung 3.2-6 definiert als:

$$W_i = \frac{H_i}{\sqrt{\rho_{rel.}}} = \frac{H_i}{\sqrt{\frac{\rho_{Br.gas}}{\rho_{Luft}}}} \quad [J/m^3 ; kWh/m^3] \quad (3.2-6)$$

Für Methan, siehe Gleichung 3.2-7:

$$W_{i,CH_4} = \frac{H_{i,CH_4}}{\sqrt{\rho_{rel,CH_4}}} = 13,3802 \frac{kWh}{m^3} \quad (3.2-7)$$

Für Anodenrestgas, siehe Gleichung 3.2-8:

$$W_i = \frac{H_{i,CH_4}}{\sqrt{\rho_{rel,ARG}}} = 2,0038 \frac{kWh}{m^3} \quad (3.2-8)$$

wobei  $\rho_{rel,CH_4} = \underline{0,555}$

$$\begin{aligned} \text{und } \rho_{rel, ARG} &= r_{H_2} \cdot \rho_{rel,H_2} + r_{CH_4} \cdot \rho_{rel,CH_4} + r_{N_2} \cdot \rho_{rel,N_2} + r_{CO_2} \cdot \rho_{rel,CO_2} \\ &= 0,458 \cdot 0,0695 + 0,041 \cdot 0,555 + 0,049 \cdot 0,967 + 0,452 \cdot 1,5312 \\ &= \underline{0,7941} \end{aligned}$$

Da der Wobbeindex zwischen Methan und Anodenrestgas deutlich abweicht, wäre eine Austauschbarkeit von Methan durch Anodenrestgas laut DVGW-Arbeitsblatt G 260 nicht gegeben. Der Wärmeeintrag von beiden Gasen variiert derart, dass eine Anpassung des Brennersystems erfolgen muss. Diese Abweichung konnte durch das eingesetzte Brennervlies mit seinen positiven Eigenschaften für die Flammenstabilität ausgeglichen werden.

Für ein und denselben Betriebspunkt (z.B.  $\dot{Q} = 1,5 \text{ kW}$ , bei  $\lambda = 1,1$ ) ergibt sich ein deutlich erhöhter Brenngas-Volumenstrom des Anodenrestgases ( $V_{CH_4} = 2,5073 \text{ l/min.}$ ;  $V_{ARG} = 14,0412 \text{ l/min.}$ ), der zum Wärmeeintrag nötig ist und durch den unterschiedlichen Heizwert der beiden Gase bedingt ist. Jedoch sinkt dabei die benötigte Luftmenge ( $V_{Luft, CH_4} = 26,2673 \text{ l/min.}$ ;  $V_{Luft, ARG} = 22,8738 \text{ l/min.}$ ).

### Stöchiometrische Verbrennungsrechnung

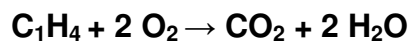
Ein brennbares Gemisch setzt sich stets aus den brennbaren Komponenten Kohlenstoff ( $C_x$ ) und/oder Wasserstoff ( $H_y$ ), sowie unter Umständen weiteren höheren  $C_xH_y$ -Verbindungen und/oder inerten nicht brennbaren Bestandteilen, wie Stickstoff ( $N_2$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und Wasser ( $H_2O$ ) zusammen und lässt sich



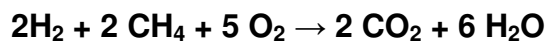
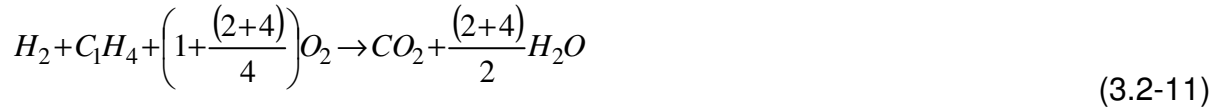
folgend stöchiometrisch in einer Verbrennungsrechnung, siehe Gleichung 3.2-9 allgemein darstellen:



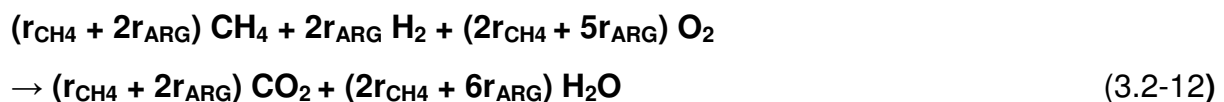
So ergibt sich folgende Gleichung für Methan, siehe Gleichung 3.2-10:



Gleichung 3.2-11 für Anodenrestgas (für die Verbrennung relevante Komponenten):



Für eine beliebige Mischung aus Methan und Anodenrestgas ergibt sich folgende Gleichung 3.2-12:



### Sauerstoff- und Luftbedarf

Der für die vollständige Verbrennung benötigte Mindestbedarf an Sauerstoff ( $O_{min}$ ) ist von der jeweiligen Brennstoff- bzw. Brenngaszusammensetzung abhängig und lässt sich folgend aufstellen, siehe Gleichung 3.2-13:

$$O_{\min} = \frac{1}{2} \cdot CO + \frac{1}{2} \cdot H_2 + \left( x + \frac{y}{4} \right) C_x H_y - O_2 \quad \left[ \frac{m^3 O_2}{m^3 C_x H_y} \right] \quad (3.2-13)$$

Daraus ergibt sich für reines Methan (CH<sub>4</sub>) Gleichung 3.2-14 :

$$O_{\min, CH_4} = \frac{1}{2} CO + \frac{1}{2} H_2 + \left( 1 + \frac{4}{4} \right) CH_4 - O_2 = 2 \frac{m^3 O_2}{m^3 CH_4} \quad (3.2-14)$$

Sowie für reinen Wasserstoff (H<sub>2</sub>) Gleichung 3.2-15:

$$O_{\min, H_2} = \frac{1}{2} CO + \frac{1}{2} H_2 + \left( \frac{2}{4} \right) H_2 - O_2 = 0,5 \frac{m^3 O_2}{m^3 H_2} \quad (3.2-15)$$

Da sich im Anodenrestgas ein gewisses Gasmischungsverhältnis durch die verschiedenen enthaltenen Komponenten ergibt, müssen diese für die Verbrennungsrechnung relevanten Anteile errechnet werden.

Anteil CH<sub>4</sub>:

$$O_{\min, CH_4, ARG} = O_{\min, CH_4} \cdot r_{CH_4} = 2 \text{ m}^3 \text{ O}_2 / \text{m}^3 \text{ CH}_4 \cdot 0,041 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{m}^3 \text{ ARG}$$

$$O_{\min, CH_4, ARG} = \underline{0,0820 \text{ m}^3 \text{ O}_2 / \text{m}^3 \text{ ARG}}$$

Anteil H<sub>2</sub>:

$$O_{\min, H_2, ARG} = O_{\min, H_2} \cdot r_{H_2} = 0,5 \text{ m}^3 \text{ O}_2 / \text{m}^3 \text{ H}_2 \cdot 0,458 \text{ m}^3 \text{ H}_2 / \text{m}^3 \text{ ARG}$$

$$O_{\min, H_2, ARG} = \underline{0,2290 \text{ m}^3 \text{ O}_2 / \text{m}^3 \text{ ARG}}$$

Zusammenfassend ergibt sich in Gleichung 3.2-16 ein Mindest-Sauerstoffanteil für das gesamte Anodenrestgas:

$$O_{\min,ARG} = O_{\min,CH_4,ARG} + O_{\min,H_2,ARG} = 0,0820 + 0,2290 = \underline{0,3110 \text{ m}^3 \text{ O}_2 / \text{m}^3 \text{ ARG}} \quad (3.2-16)$$

Da sich die Umgebungsluft unter Normbedingungen jedoch dabei aus ca. 21 Vol.-% O<sub>2</sub>, 78 Vol.-% N<sub>2</sub>, 0,9 Vol.-% Ar, 0,03 Vol.-% CO<sub>2</sub>, sowie weiteren Spurengasen zusammensetzt, muss eine minimale Luftmenge, bzw. minimaler Luftbedarf ( $l_{\min}$ ) bestimmt werden, der für die reale Untersuchung maßgeblich ist, da mit Umgebungsluft verbrannt wird, siehe Gleichung 3.2-17.

$$l_{\min} = \frac{O_{2\min,Komponente}}{O_2\text{-AnteilLuft}} = \frac{O_{2\min,Komponente}}{0,21} \left[ \frac{\text{m}^3 \text{Luft}}{\text{m}^3 \text{Brennstoff}} \right] \quad (3.2-17)$$

In Gleichung 3.2-18 und Gleichung 3.2-19 ergibt sich der minimale Luftbedarf ( $l_{\min}$ ) für:

Methan:

$$l_{\min, CH_4} = \frac{O_{\min, CH_4}}{0,21} = 9,52 \frac{\text{m}^3 \text{Luft}}{\text{m}^3 CH_4} \quad (3.2-18)$$

Anodenrestgas:

$$l_{\min, ARG} = \frac{O_{\min, ARG}}{0,21} = 1,48 \frac{\text{m}^3 \text{Luft}}{\text{m}^3 ARG} \quad (3.2-19)$$

Um weiterhin eine stabile und vor allem gleichmäßige und vollständige Verbrennung zu garantieren, soll auch hier eine Verbrennung mit Luftüberschuss, also mit einer Luftzahl  $\lambda > 1$  ermöglicht werden.

Die so genannte Luftzahl  $\lambda$  ist in Gleichung 3.2-20 definiert:

$$\lambda = \frac{l}{l_{\min}} \quad (3.2-20)$$

Wobei  $\lambda$  das Verhältnis von tatsächlich benötigter Luftmenge ( $l$ ) zu vorher errechneter minimaler Luftmenge ( $l_{\min}$ ) bzw. minimalem Luftbedarf angibt.

So lässt sich durch Umstellen der obigen Gleichung 3.2-20 die tatsächlich für die Verbrennung benötigte Luftmenge ( $l$ ) bestimmen, siehe Gleichung 3.2-21:

$$l = \lambda \cdot l_{\min} \quad (3.2-21)$$

In Tabelle 3.2-1 ergibt sich der tatsächliche Luftbedarf ( $l$ ) für  $\lambda = 1,1; 1,2; 1,3$  für die jeweiligen verbrennungsrelevanten Gase Methan und Anodenrestgas:

	$\lambda = 1,1$	$\lambda = 1,2$	$\lambda = 1,3$	Einheit: [-]
$l_{\text{CH}_4}$ :	10,4792	11,4286	12,3809	$[\text{m}^3_{\text{Luft}} / \text{m}^3_{\text{CH}_4}]$
$l_{\text{ARG}}$ :	1,6290	1,7771	1,9252	$[\text{m}^3_{\text{Luft}} / \text{m}^3_{\text{ARG}}]$

**Tabelle 3.2-1:** Übersicht des Luftbedarfs von CH<sub>4</sub> und ARG bei  $\lambda=1,1; 1,2; 1,3$

## Abgasvolumen

Das bei der Verbrennung entstehende Abgas lässt sich ebenso anteilig in Bezug auf die eingesetzte Menge Brennstoff errechnen, bei der die minimale spezifische Menge Abgas in  $\text{m}^3$  pro  $\text{m}^3$  eingesetztem Brennstoff angegeben wird.

Hierfür lässt sich Gleichung 3.2-22 benutzen, bei der von trockenem Abgas (d. h. ohne auskondensierenden Anteil Wasser) ausgegangen wird.

$$v_{\text{Abgas,trocken}} = v_{\text{CO}_2} + v_{\text{N}_2} + v_{\text{O}_2} \quad \left[ \frac{\text{m}^3 \text{ Abgas}}{\text{m}^3 \text{ Brenngas}} \right] \quad (3.2-22)$$

$$\text{wobei: } u_{\text{CO}_2} = r_{\text{CO},\text{Brennstoff}} + r_{\text{CH}_4,\text{Brennstoff}} + \sum n r_{\text{C}_n\text{H}_m} + r_{\text{CO}_2,\text{Brennstoff}} \quad \left[ \frac{\text{m}^3\text{CO}_2}{\text{m}^3\text{Brenngas}} \right]$$

$$u_{\text{N}_2} = \lambda \cdot l_{\text{min.}} \cdot 0,79 + r_{\text{N}_2,\text{Brennstoff}} \quad \left[ \frac{\text{m}^3\text{N}_2}{\text{m}^3\text{Brenngas}} \right]$$

$$u_{\text{O}_2} = (\lambda - 1) \cdot l_{\text{min.}} \cdot 0,21 \quad \left[ \frac{\text{m}^3\text{CO}_2}{\text{m}^3\text{Brenngas}} \right]$$

Für reines Methan bzw. Anodenrestgas (jeweils 100 Vol.-%) ergeben sich folgende Werte aus Tabelle 3.2-2:

	$\lambda=1,1$	$\lambda=1,2$	$\lambda=1,3$	Einheit: [-]
$v_{\text{Abgas,CH}_4,\text{trocken}} =$	1,20	1,40	1,60	$\frac{\text{m}^3\text{Abgas}}{\text{m}^3\text{Brenngas}}$
$v_{\text{Abgas,ARG,trocken}} =$	2,31	2,46	2,61	$\frac{\text{m}^3\text{Abgas}}{\text{m}^3\text{Brenngas}}$

**Tabelle 3.2-2:** Abgasvolumen von reinem CH<sub>4</sub> und ARG bei  $\lambda=1,1; 1,2; 1,3$

Ausgehend von den Ergebnissen der Berechnung der Verbrennungskennwerte, wurde zunächst die zu untersuchende Brenner-Gebläse-Kombination in Betrieb genommen und einige Minuten bei unterer bis mittlerer Brennerleistung (0,3-1,5 kW) auf Betriebstemperatur gebracht. Dies kann sowohl mit reinem Methan als auch reinem Anodenrestgas erfolgen, wobei jedoch auf die deutlich höhere Flammengeschwindigkeit und den geringeren Heizwert des Anodenrestgases aufgrund des hohen Wasserstoffanteils geachtet werden muss, was zu einem verzögerten Aufheizen des Brenners führen kann.

Danach wurde der Brenner zunächst im Freibrand, d. h. ohne montierte Modellbrennkammer bei verschiedenen Brenngaszusammensetzungen (aufgeteilt in jeweils 10 Vol.-%-Schritten) von Methan und Anodenrestgas untersucht.

Es wurde mit einem Mischungsverhältnis von 100 Vol.-% CH<sub>4</sub> und 0 Vol.-% Anodenrestgas bei einer Brennerleistung von 0,3 kW begonnen, wobei die zuvor unter Excel berechneten Brenngas-Luft-Volumenströme mittels der

Präzisionsvolumenstromventile eingestellt und nach einer kurzen Einregelphase auf Verbrennqualität und optischem Flammenbild hin betrachtet wurden.

Danach wurden mittels Eingabe am PC, die nächsten Mischungsverhältnisse, also 90 Vol.-% CH<sub>4</sub> und 10 Vol.-% Anodenrestgas dann 80 Vol.-% CH<sub>4</sub> und 20 Vol.-% Anodenrestgas bis zum Mischungsverhältnis 0 Vol.-% Methan und 100 Vol.-% Anodenrestgas bei gleicher Brennerleistung eingestellt und untersucht.

So ergaben sich jeweils pro Brennerleistungsstufe 11 Betriebspunkte (bei 10 Brennerleistungen von 0,3 bis 3,0 kW<sub>thermisch</sub>). Dabei wurden diese insgesamt 110 Brennerbetriebspunkte bei Brennluftüberschuss und verschiedenen Luftzahlverhältnissen von jeweils  $\lambda = 1,1; 1,2; 1,3$  nacheinander eingestellt. So ergab sich eine Gesamtsumme von 330 zu untersuchenden Brennerbetriebspunkten.

Dabei wurde neben der Flammenstabilität (gleichmäßige Verteilung auf dem Metallvlies, Stabilitätsverhalten) auch die Rückschlagsicherheit der Flamme (Stabilität) untersucht und mittels eines Fotos dokumentiert.

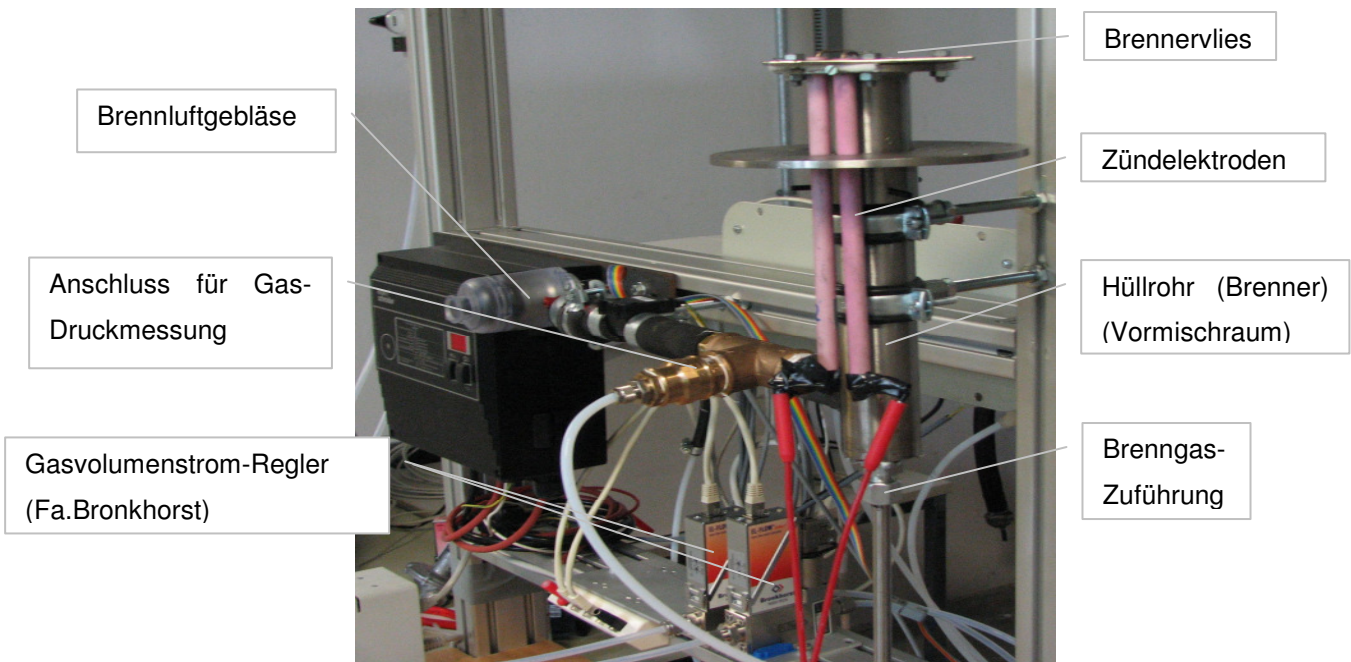
Da die Versuche im Freibrand zunächst nur der Überprüfung der Züandsicherheit, Verbrennungsstabilität und Modulationsfähigkeit (bei verschiedenen Gaszusammensetzungen und Brennerleistungen) dienen, wurden im zweiten Schritt die Abgaswerte (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) mit montierter Modellbrennkammer überprüft.

### **Versuchsablauf im Freibrand**

Um den Brenner hinsichtlich seiner generellen Eignung zur Untersuchung des Brand- und Emissionsverhaltens bei verschiedenen Gaszusammensetzungen und Brennerleistungsstufen zu überprüfen, wurde der Brenner zusammen mit dem Brennluftgebläse zunächst im so genannten Freibrand, ohne regulär darüber verbauter Brennkammer des Wasserstoffreformers, betrieben.

Das heißt die Brenneroberfläche (Brennervlies) ist frei gegenüber der Atmosphäre, so dass dort die Zünd- und Brandeigenschaften des Brenners genauer überprüft werden konnten.

Der Versuchsstand des Brenners ohne Modellbrennkammer ist in Abbildung 3.2-1 dargestellt.

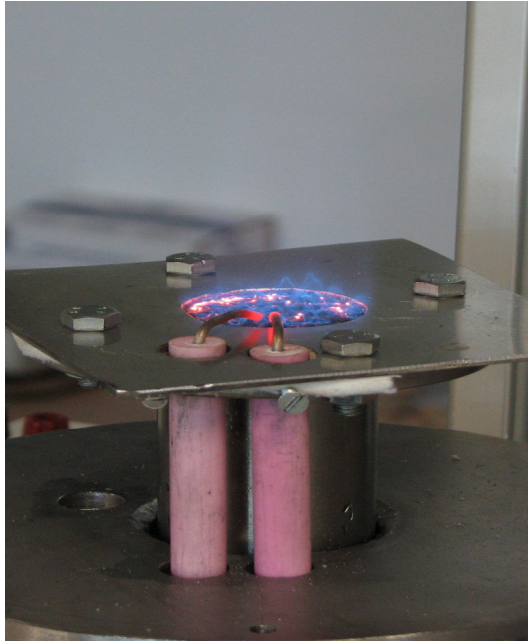


**Abbildung 3.2-1:** Gas-Gebläsebrenner montiert im Teststand (ohne Modell-Brennkammer)

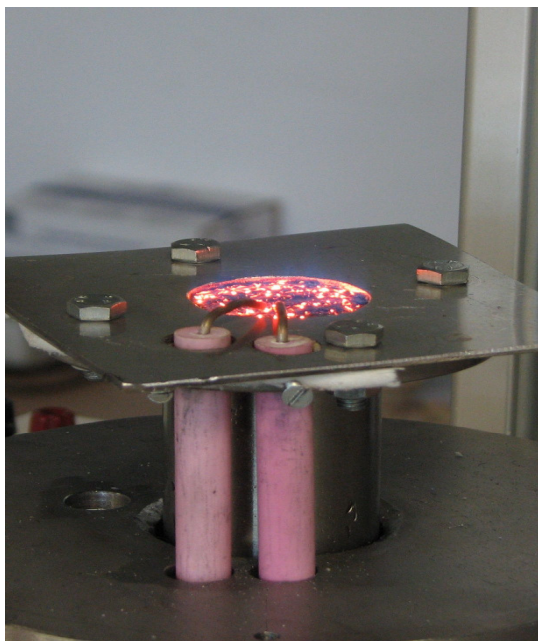
So kann zum einen die Zündfähigkeit frei zu wählender Gaszusammensetzungen, sowie das Brandverhalten (also die Flammenbildung, das Aussehen der Flamme, sowie deren Stabilität) genauer optisch betrachtet und überprüft werden.

Dabei können so unter Umständen Einschränkungen hinsichtlich der Gaszusammensetzungen, sowie der angestrebten Modulationsfähigkeit des Brenners erkannt werden, wenn das Flammenverhalten nur unzureichend oder zum Erlöschen der Flamme führen würde.

Ausgehend von den aufgeführten Excel-Tabellen (siehe Anhang), wurden dabei alle 330 verschiedenen Brenngas-/Luft-Zusammensetzungen am Brenner, bzw. Gebläse eingestellt und nach einer kurzen Stabilisierungsphase, die Flamme auf Ihre zunächst optisch erkennbaren Eigenschaften überprüft. Diese wurden dabei zusätzlich durch ein Foto zur Dokumentation erfasst. In Abbildung 3.2-2 und Abbildung 3.2-3 sind beispielhaft die Fotos des Flammenbildes bei einer Leistung von 1,5 kW und einer Luftzahl von 1,2 für 100% Methan bzw. 100% Anodenrestgas dargestellt.



**Abbildung 3.2-2:** Flammenbild bei  $Q=1,5$  kW;  $\lambda=1,2$ ; 100 Vol.-%  $\text{CH}_4$



**Abbildung 3.2-3:** Flammenbild bei  $Q=1,5$  kW;  $\lambda=1,2$ ; 100 Vol.-% ARG

Dabei wurde zunächst ausgehend von einer anfänglichen 100 Vol.-% Methan Brenngaseinstellung, der  $\text{CH}_4$ -Anteil immer weiter in 10 Vol.-%-Schritten verringert und dieser durch einen gleich hohen, steigenden Anteil an Anodenrestgas ersetzt.

Dabei ergaben sich für jeden der insgesamt 10 Brennerleistungsstufen (0,3 bis 3,0 kW) pro Stufe 11 Brenngaseinstellungen (inkl. je einer 100 Vol.-% Methan bzw.



Anodenrestgas-Einstellung), bei zusätzlich 3 verschiedenen Luftzahlen  $\lambda$  (1,1; 1,2; 1,3).

Es zeigte sich, dass alle 330 Brennereinstellungen eine stabile, sichere und autarke Verbrennung ermöglichen.

Trotz der maximal geforderten Modulationsfähigkeit von 1:10 war auch bei einer Leistung von 3,0 kW eine stabile Verbrennung mit nur leicht aufflackernder Brennerflamme aufgrund der positiven Eigenschaften des verwendeten Brennervlieses möglich. Ebenso verhielt es sich auch bei der kleinsten Brennerleistung von 0,3 kW, wo trotz niedrigster Gas- und Luftvolumendurchsätze dennoch eine stabile, sehr kleine und durchweg bläuliche Flamme zu beobachten war.

Daher wurde der Anspruch einer breiten Leistungsmodulationsfähigkeit von 1:10 bei verschiedenen Brenngas-Luft-Zusammensetzungen und Luftzahlen, durch ein stets stabiles und gleichmäßiges Flammenbild im Freibrand erfüllt.

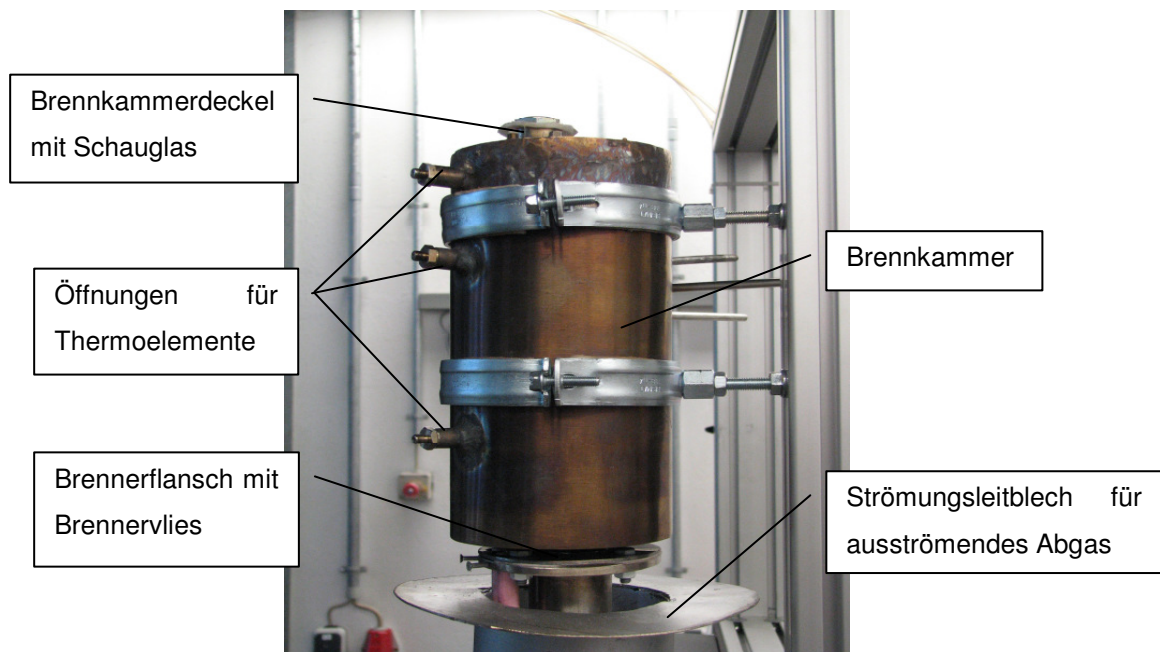
## Brand mit montierter Modell-Brennkammer

In einer zweiten Messkampagne wurde anschließend die bereits erwähnte Modell-Brennkammer mittig über den Brenner eingebaut. Dabei umschließt diese mit einem umlaufenden ca. 6-8 mm Luftspalt den Brennerflansch mit der Brennoberfläche (Brennervlies) und schließt den darüber befindlichen Abgasraum nach oben hin ab.

Das Brennervlies befindet sich innerhalb des Brennkammerraums, mit einem Abstand von ca. 190 mm zum nach oben geschlossenen Brennkammerdeckel.

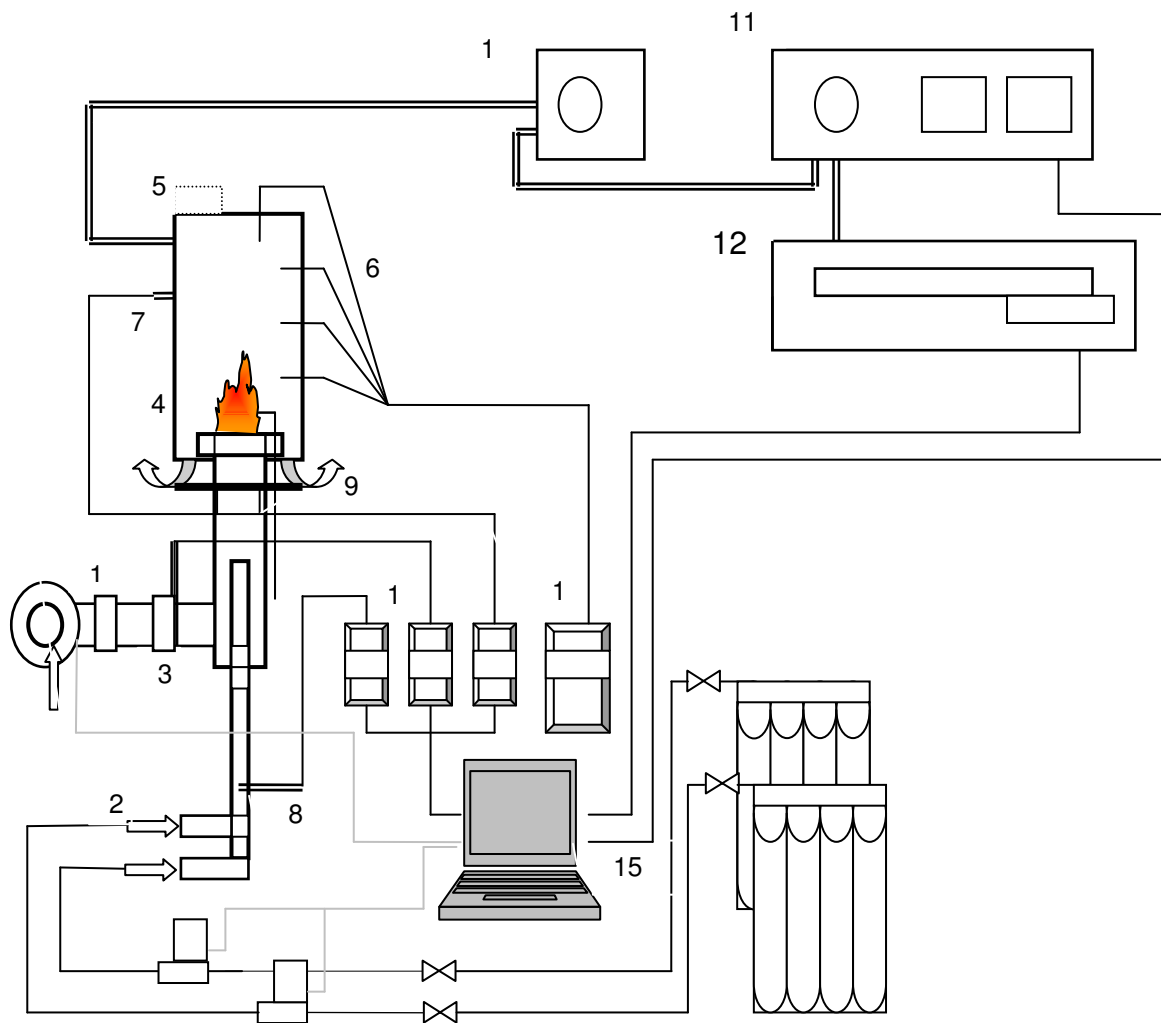
Darunter befindet sich mit einem seitlichen Luftspalt von 10 mm für das herabströmende Abgas, ein ringförmiges Strömungsleitblech.

In der Brennkammer befinden sich seitlich entsprechende Montageöffnungen zum Einbringen von Thermoelementen, sowie auf der anderen Seite drei dünne Abgas-Abzugsröhrchen zum Anschluss der Abgasmesstechnik, sowie auf dem Brennkammerdeckel ein hitzefestes Schauglas und 2 weitere Messanschlussöffnungen, siehe Abbildung 3.2-4.



**Abbildung 3.2-4:** Brennerkopf mit hochgefahrener Modell-Brennkammer

In Abbildung 3.2-5 ist der gesamte Versuchsstand schematisch dargestellt.



**Abbildung 3.2-5:** Übersichtsskizze des gesamten Versuchsstands mit Modell-Brennkammer und Messtechnik

Legende:

- |   |   |
|---|---|
| 1 : Brennluftgebläse mit Luftmengenmesser | 9 : Strömungsprallblech zur Abgasführung                    |
| 2 : Brenngaszuführung                     | 10 : Messgas-Kühler   |
| 3 : Druckmessung Brennluft                | 11 : CO-/CO <sub>2</sub> -Messgerät (Infrarotspektroskopie) |
| 4 : Modell-Brennkammer                    | 12 : NO-/NO <sub>x</sub> -Messgerät (Chemolumineszenz)      |
| 5 : Schauglas                             | 13 : Druckmessgeräte  |
| 6 : Thermoelemente                        | 14 : Digital-Thermometer (f. Thermoelemente)                |
| 7 : Druckmessung Brennkammer              | 15 : PC zur Steuerung und Überwachung                       |
| 8 : Druckmessung Brenngas                 |   |

Der Brenner wurde zunächst bei einer geeigneten Brenngas-Luft-Zusammensetzung gezündet und die Brennkammer einige Minuten auf normale Betriebstemperatur der realen Reformerbrennkammer von etwa 500-600 °C gebracht.

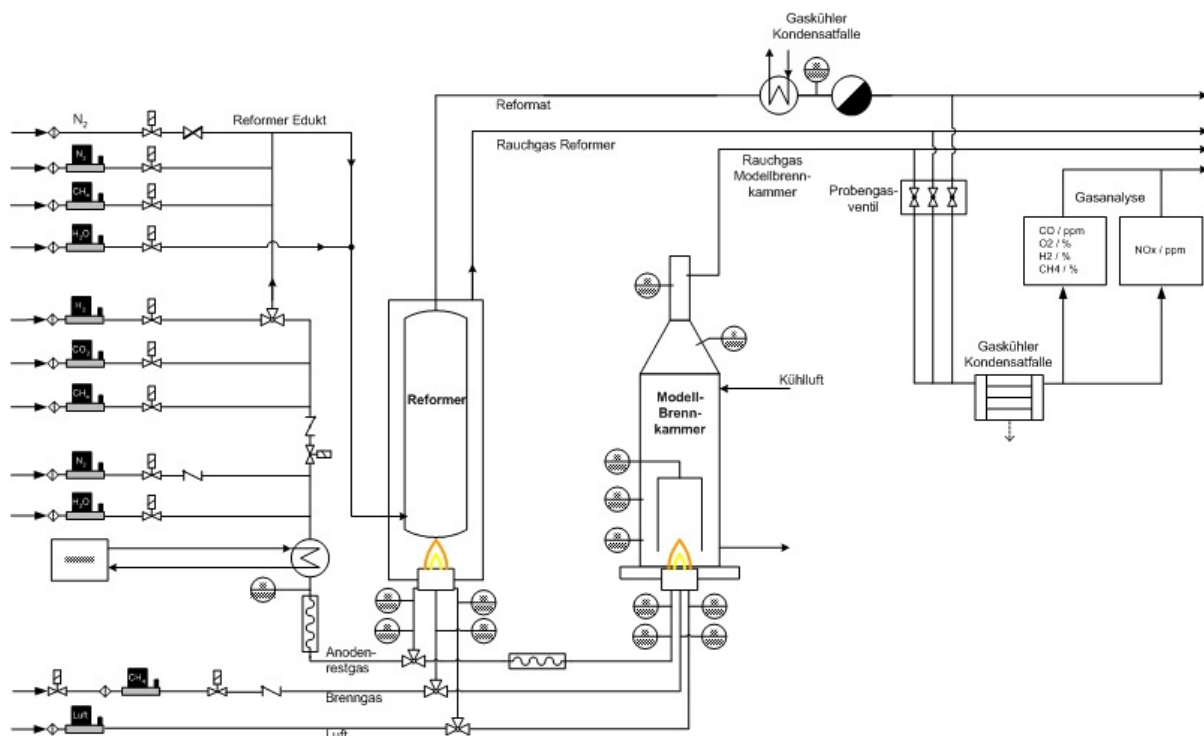
Anschließend wurden die bereits für den Freibrand verwendeten Brenngas-Luft-Einstellungen an der Brenner-Gebläse-Kombination eingestellt und das Emissions-, sowie das Temperaturverhalten der Brennkammer untersucht.

Die Steuerung der Luftzufuhr, Regelung der Brenngaszuführung, Erfassung der Emissionsmessungen sowie der jeweiligen Drücke von Gas, Brennluft und Brennkammer erfolgten mittels verschiedener Schnittstellen über ein gemeinsames Steuer- bzw. Anzeigeprogramm am PC.

Die Messergebnisse mit montierter Modellbrennkammer entsprechen denen aus den Freibrandversuchen, das Flammenbild war stabil und gleichmäßig.

### 3.3 Konzeption und Aufbau des Reformerteststandes

Im Arbeitspaket Brenner (s. Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2) wurden vom Projektpartner GWI experimentelle Brenner-Untersuchungen an einem für die in Kapitel 2.2 und Kapitel 2.3 beschriebenen Anforderungen angepassten Oberflächenbrenner auf einem speziellen Brennerteststand mit Modellbrennkammer durchgeführt. Zum Einsatz kamen dabei Erdgas sowie Anodenrestgas in verschiedenen Mischungsverhältnissen. Darauf aufbauend wurden dann zwei identische Funktionsmuster des Brenners für die weiteren Untersuchungen hergestellt, von denen eines im GWI der weiteren, detaillierten Charakterisierung unterzogen wurde. Parallel zu diesen Arbeiten wurde an der Fst. 2 UDE ein Teststand aufgebaut, um das zweite Brennerfunktionsmuster in den Reformer integrieren und testen zu können. Das Prozessschema des Teststandes an der UDE ist in Abbildung 3.3.1 dargestellt.

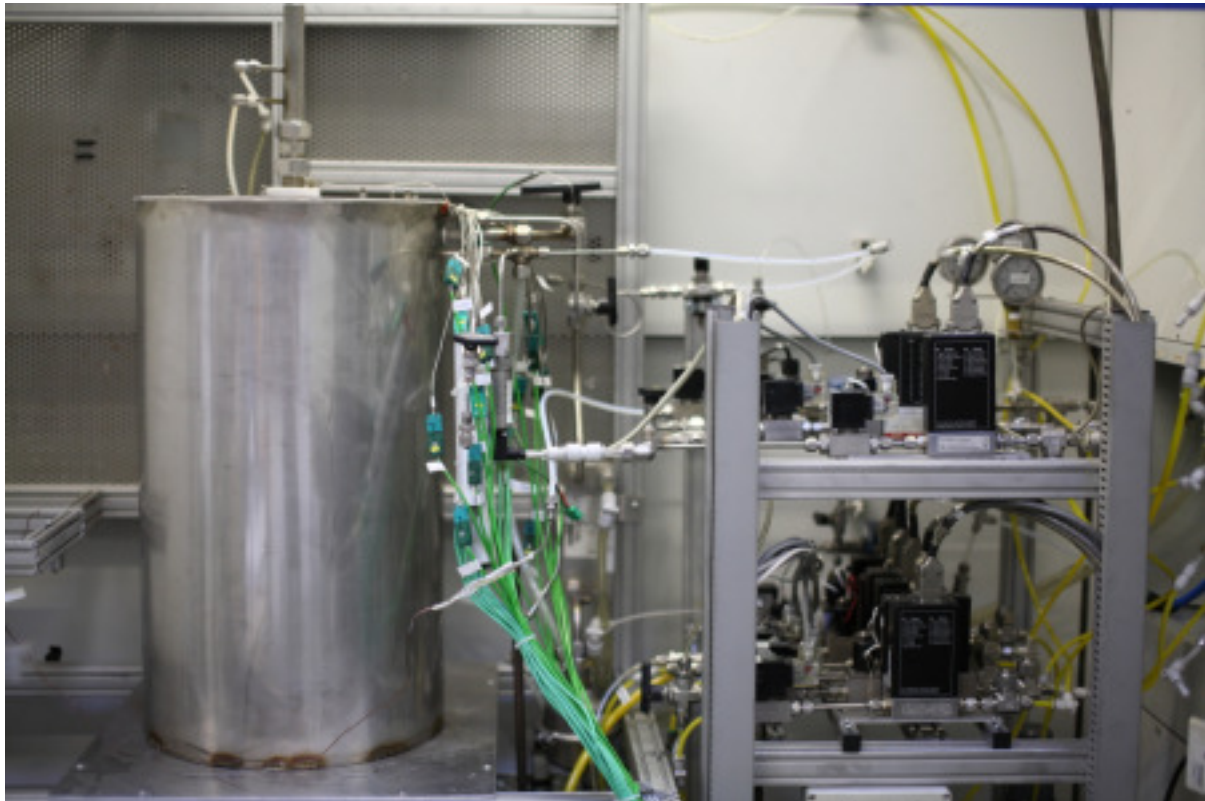


**Abbildung 3.3.1:** Prozessschema des Reformer-Brenner-Teststandes an der UDE

Kern des Prozessschemas ist der Reformer, welcher in der Mitte abgebildet ist. Neben dem Reformer wird der Teststand gleichzeitig noch für eine zusätzliche Modellbrennkammer ausgelegt. Die Modellbrennkammer ist rechts neben dem Reformer schematisch dargestellt. Im linken Teil der Abbildung ist die

Gasversorgung sichtbar, die es erlaubt, die in Kapitel 2 beschriebenen Brenngaszusammensetzungen und Brennerleistungen einzustellen. Die notwendigen Medien werden durch Mass-Flow-Controller (MFC) dosiert. Im rechten Teil des Prozessschemas ist die Gasanalytik zu erkennen [ECO2005], [ABB2001].

Ein Foto des Reformers im Teststand ist in der folgenden Abbildung 3.3.2 zu sehen. Im linken Teil der Abbildung ist der Reformer, bzw. die Reformerhülle zu erkennen, aus dem die Thermoelementanschlüsse zur Messung des Temperaturprofils herausgeführt sind.



**Abbildung 3.3.2:** Reformer im Teststand

Die Medien zur Methan- bzw. Erdgasreformierung werden im oberen rechten Teil des Reformers zugeführt, wo auch die Durchführung für die Thermoelemente angeordnet ist. Im rechten Teil der Abbildung ist die Gasdosiereinheit über die MFC zu erkennen. Der Brenner zur Wärmeversorgung des Reformers ist in dieser Abbildung nicht zu sehen. Er befindet sich innerhalb der Reformerhülle und wird von unten in den Reformer eingeführt.

### 3.4 Experimentelle Untersuchung des Brennersystems im Reformer

Neben der Ermittlung der **Gebälsebetriebsdaten** wurde in diesem Arbeitspaket auch die generelle Tauglichkeit des Brenners für den Einsatz in einem Reformersystem überprüft. Kriterien dieser Prüfung waren die **Modulierbarkeit** der Leistung, die **Wärmeeinbringung** in den Reformer, die Qualität der Verbrennung und die damit verbundenen **Abgasemissionen** des Brenners. Um ein differenziertes Bild zu erhalten, wurden die Versuche mit verschiedenen Gaszusammensetzungen und Brennerleistungen durchgeführt. Die einzelnen Gasqualitäten entsprechen den simulierten Ergebnissen des Arbeitspaketes 1 „Vorüberlegungen/Voruntersuchungen“ für Anodenrestgase (ARG) mit einer Fuel Utilisation (FU) von 0,6 und 0,7 und 0,8 bzw. 60, 70 und 80 %. Die Gase wurden dem Brenner vorgewärmt und **feucht** (gesättigt bei typischen 40 °C) zugeführt, um ein möglichst reales ARG zu simulieren. Sämtliche Versuche wurden mit einem Luftverhältnis  $\lambda$  von 1,2 und einem Wasserdampf/Kohlenstoffverhältnis S/C (steam-to-carbon-ratio) von 3,4 durchgeführt. Die Brennerleistung und die Reformerleistung wurden für jede Gaszusammensetzungen von 25 bis 100 Prozent variiert (s. Tabelle 3.4.1).

<b>Umsatzgrad der Brennstoffzelle</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>
<b>Brennerleistung [%]</b>	25	50	75	100
<b>Brennerleistung [kW]</b>	0,75	1,5	2,25	3

<b>Umsatzgrad der Brennstoffzelle</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>
<b>Brennerleistung [%]</b>	25	50	75	100
<b>Brennerleistung [kW]</b>	0,75	1,5	2,25	3

<b>Umsatzgrad der Brennstoffzelle</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>
<b>Brennerleistung [%]</b>	25	50	75	100
<b>Brennerleistung [kW]</b>	0,75	1,5	2,25	3

**Tabelle 3.4.1:** Die 12 Hauptmesspunkte der Brenneruntersuchungen im Reformer

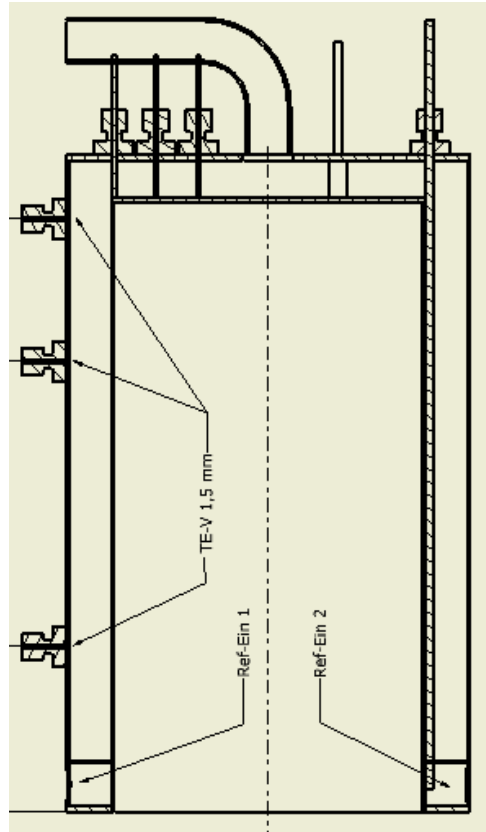
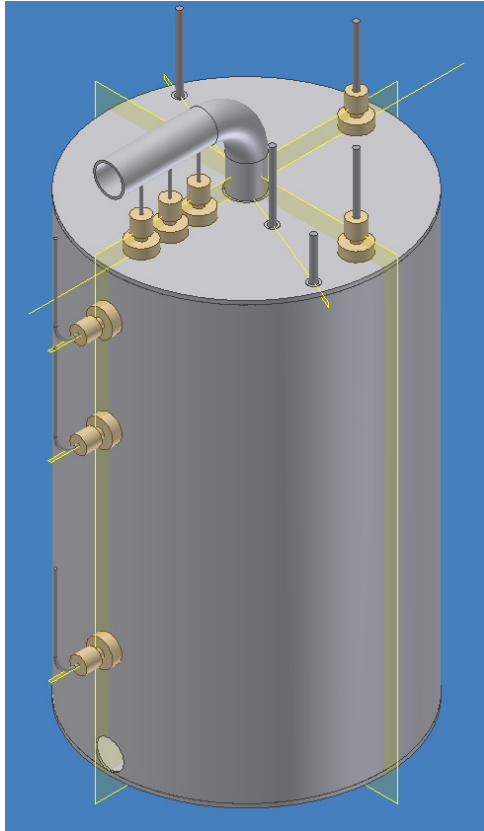
Damit ergaben sich 12 Hauptmesspunkte, die aufgrund der erheblichen thermischen Trägheit des Systems jeweils einem ganzen Messtag von ca. 8 Stunden entsprachen, wobei einige Messpunkte auch mehrfach angefahren wurden.

Außerdem wurden noch weitere Versuche zum „Standby-“Verhalten mit einer Brennerleistung von 10 Prozent gefahren. Ziel war es, einen Betriebspunkt mit möglichst niedriger Leistung für den Reformer zu finden, bei dem dann lediglich eine gerade ausreichende kleine Wasserstoffmenge für die Brennstoffzelle produziert wird, um die für den Betrieb des BZ-Systems notwendige elektrische Leistung zu produzieren (parasitäre Verluste), aber keine Nettoleistung abgegeben wird. In diesem Betriebspunkt werden die Wärmeverluste des Reformers kompensiert und so die Temperaturen des Reformers weitgehend konstant gehalten. Aus diesem Standby-Betrieb ist dann ein schnelles Hochfahren des Reformersystems ohne lange Vorwärmzeiten möglich. Diese Versuche führten jedoch immer zu einem langsamen Auskühlen der Reformer-Shiftstufen und mussten daher eingestellt werden. Die für den Reformerbetrieb erreichbare untere Leistungsgrenze lag demnach bei etwa 25 Prozent Teillast. Da die Laststufen von 25 bis 100 Prozent der Brennerleistung erfolgreich angefahren werden konnten, lag die nachgewiesene Modulierbarkeit des Reformers zu diesem Zeitpunkt also bei 1 zu 4. In einem späteren Arbeitspaket (siehe Kapitel 7) wurde jedoch mit zusätzlichen Versuchen zum **Lastabwurf** eine weit größere Modulierbarkeit des Brennersystems nachwiesen.

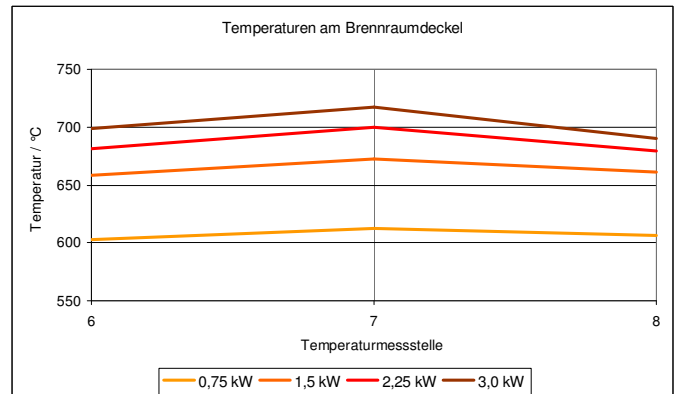
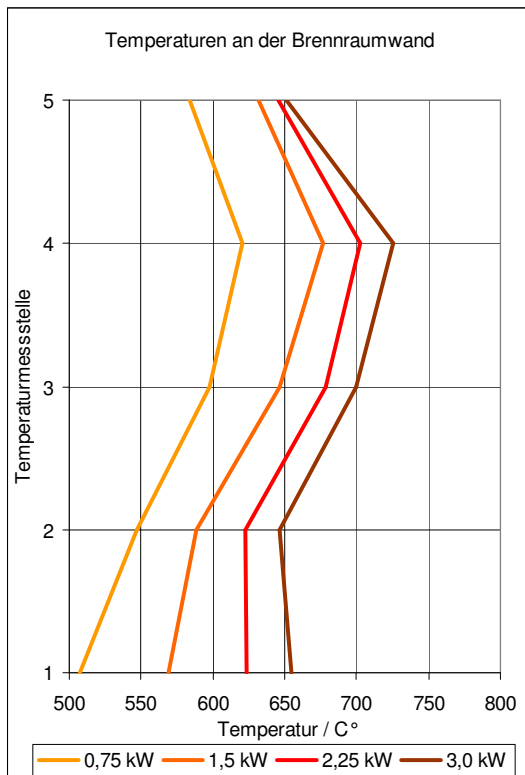
Um die Wärmeeinbringung des Brenners in den Reformer untersuchen zu können, wurden die Temperaturen der Brennkammerwand und des Brennkammerdeckels überwacht und gemessen. Die Messung erfolgte mit Hilfe von sechs einfachen Thermoelementen und zwei weiteren Fünffach-Thermoelementen. Abbildung 3.4.1 zeigt den Reformer mit einer Übersicht der Temperaturmessstellen.

Die Temperaturverteilung im Brennraum wird am Beispiel eines Anodenrestgases mit einer Fuel Utilisation von 70 Prozent in Abbildung 3.4.2 dargestellt. Sie beinhaltet die Messungen für alle vier Brennerlaststufen von 25 bis 100 Prozent der Auslegungsleistung und zeigt deutlich, dass mit 600 bis 700 °C die für eine stabile Reformierung notwendigen Temperaturen mit dem Brenner erreicht werden, wobei die Temperaturen immer mit der Leistung steigen. Die Versuche mit den Anodenrestgasen der beiden anderen Umsatzgrade von 60 und 80 % lieferten nahezu identische Ergebnisse, diese sind im Anhang dargestellt.





**Abbildung 3.4.1:** Verteilung der Temperaturmessstellen an der Brennkammer



**Abbildung 3.4.2:** Temperaturprofil im Reformier bei  $FU= 0,7$  (links: Brennkammerwand, rechts: Reformierdeckel)

Dass die in den Reformer eingebrachte Wärme für einen Reformierungsprozess ausreicht, lässt sich anhand der Produktgaszusammensetzung zeigen (s. Abbildung 3.4.3). Das Methan wird bis auf einen Rest von ca. 3 vol.-% in  $H_2$  und  $CO_2$  umgesetzt. Das nicht im Reformer umgesetzte Methan ist jedoch nicht als Verlust zu bewerten, da es ja mit dem ARG dem Brenner zugeführt wird und so zur Reformerbeheizung genutzt werden kann.

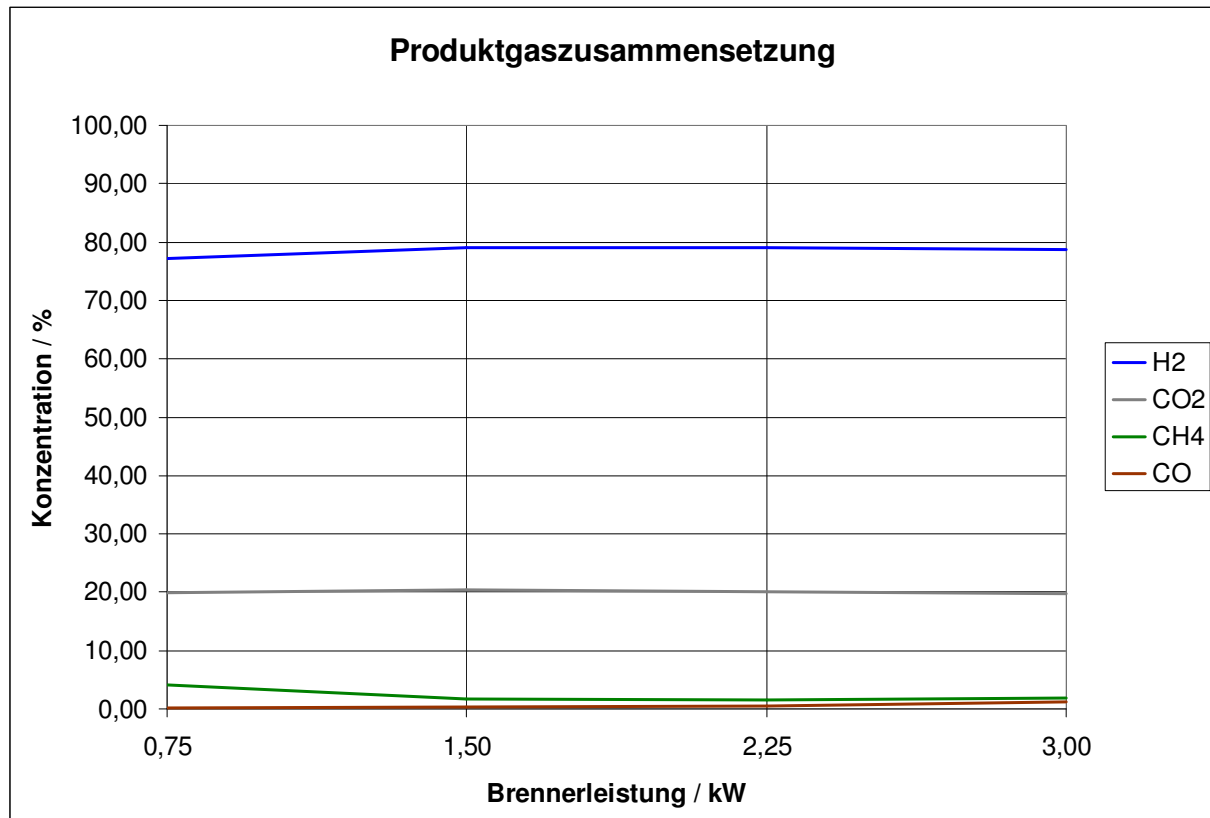


Abbildung 3.4.3: Produktgaszusammensetzung bei  $FU=0,7$

Die in Abb. 3.4.3 dargestellte Gaszusammensetzung wurde für das ARG bei einem Umsatzgrad von 70 % gemessen und beinhaltet die vier gemessenen Lastpunkte. Die Messungen für die Umsatzgrade 60 und 80 Prozent lieferten wiederum nahezu identische Ergebnisse, so dass diese Messungen hier nicht dargestellt sind.

Neben der **Modulierbarkeit** und der **Wärmeeinbringung** in den Reformer spielen vor allem die **Schadstoffemissionen** des Brenners eine entscheidende Rolle, um über die Eignung für den Einsatz in einem Reformersystem entscheiden zu können. Sie müssen in jedem Fall die gesetzlichen Vorgaben erfüllen. Außerdem sollten sie die Werte aktueller und alternativer Anlagen für die Hausenergieversorgung wie zum Beispiel die von aktuellen Heizkesseln nicht überschreiten. Tabelle 3.4.2 bietet eine Übersicht über aktuelle gesetzliche Grenzwerte.

	Leistungsbereich	NO <sub>x</sub>	CO
1. BImSchV	120kW	80mg/kWh	
	10-20MW	100-150mg/m <sup>3</sup> (@ 13% O <sub>2</sub> )	80mg/m <sup>3</sup>
RAL-UZ 41 Gasbrenner- Kessel-Einheit	70kW	70mg/kWh	60mg/kWh
RAL-UZ 61 Gas- Brennwertgeräte	70kW	60mg/kWh	50mg/kWh
RAL-UZ 71 Gasraumheizer und Gasheizeinsätze	11kW	100mg/kWh	80mg/kWh
	22kW	130mg/kWh	60mg/kWh
RAL-UZ 80 Gasbrenner mit Gebläse	120kW	70mg/kWh	60mg/kWh
DIN 4702 Heizkessel	Wärmeleistung		
	350kWh	150mg/kWh	100mg/kWh
	350kWh	200mg/kWh	100mg/kWh
TA-Luft	50MW	0,1-0,15g/m <sup>3</sup> @ 3% O <sub>2</sub>	50mg/m <sup>3</sup> @ 3% O <sub>2</sub>

**Tabelle 3.4.2:** Gesetzliche Emissionsgrenzwerte von Gasbrennern [TAL2002], [BImSchV], [RAL-UZ]

Der gesetzliche Maßstab für Emissionswerte von Brennstoffzellenheizgeräten wird in der DIN EN 50465 über die Grenzwerte für CO < 1000 ppm und NO < 70 mg/kWh sehr hoch angegeben [EN50465]. Im Falle der freiwilligen Selbstverpflichtung „Blauer Engel“ gibt es verschiedene Vergabegrundlagen bzw. Voraussetzungen. Sie richten sich nach Typ und Leistungsbereich des Produktes. Daher kommen im Prinzip mehrere dieser Vergabegrundlagen für den „Blauen Engel“ in Frage, z.B. die „Brenner-Kessel-Kombinationen (Units) mit Gasbrenner und Gebläse“ (RAL-UZ 41), die „Emissionsarmen und energiesparenden Gas-Brennwertgeräte“ (RAL-UZ 61) und die „Gasbrenner mit Gebläse“ (RAL-UZ 80).

	Brennstoffenergiebezogene Grenzwerte	Brennstoffvolumenbezogene Grenzwerte
Nox	≤ 60mg/kWh	≤ 0,1-0,15g/m <sup>3</sup> (O <sub>2</sub> -Bezug = 3 Vol%)
CO	≤ 50mg/kWh	≤ 50mg/m <sup>3</sup> (O <sub>2</sub> -Bezug = 3 Vol%)

**Tabelle 3.4.3:** Einzuhaltende, strengste Emissionsgrenzwerte nach „Blauer Engel“

Jede Vergabegrundlage beinhaltet verschiedene Emissionsgrenzwerte für das Erhalten des Umweltzeichens „Blauer Engel“. Da eine Zuordnung des Brennstoffzellenheizgerätes nicht einwandfrei möglich ist, wurden die jeweils strengsten Grenzwerte angenommen (siehe Tabelle 3.4.3).

Die gesetzlichen und freiwilligen Grenzwerte der DIN EN 50465, der TA-Luft und des „Blauen Engels“ liegen jedoch weit höher, als die heutigen technischen Standards bei aktuellen Gas-Brennwertgeräten. Moderne Geräte erreichen im Bereich der CO-Emissionen Werte von ca. 15 mg/kWh, einige sogar bis zu 5 mg/kWh. Im Bereich der NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen sie bei ca. 15 bis 20 mg/kWh (siehe Tabelle 3.4.4). Um dem Anspruch eines umweltfreundlichen Energieversorgungssystems gerecht zu werden, muss das Brennstoffzellenheizgerät (BZH), dessen Emissionen ja neben dem umweltneutralen Produktwasser des Brennstoffzellen-Stacks praktisch ausschließlich durch das Abgas des Reformerbrenners erzeugt werden, mit den Emissionswerten eines modernen Gasheizkessels konkurrieren.

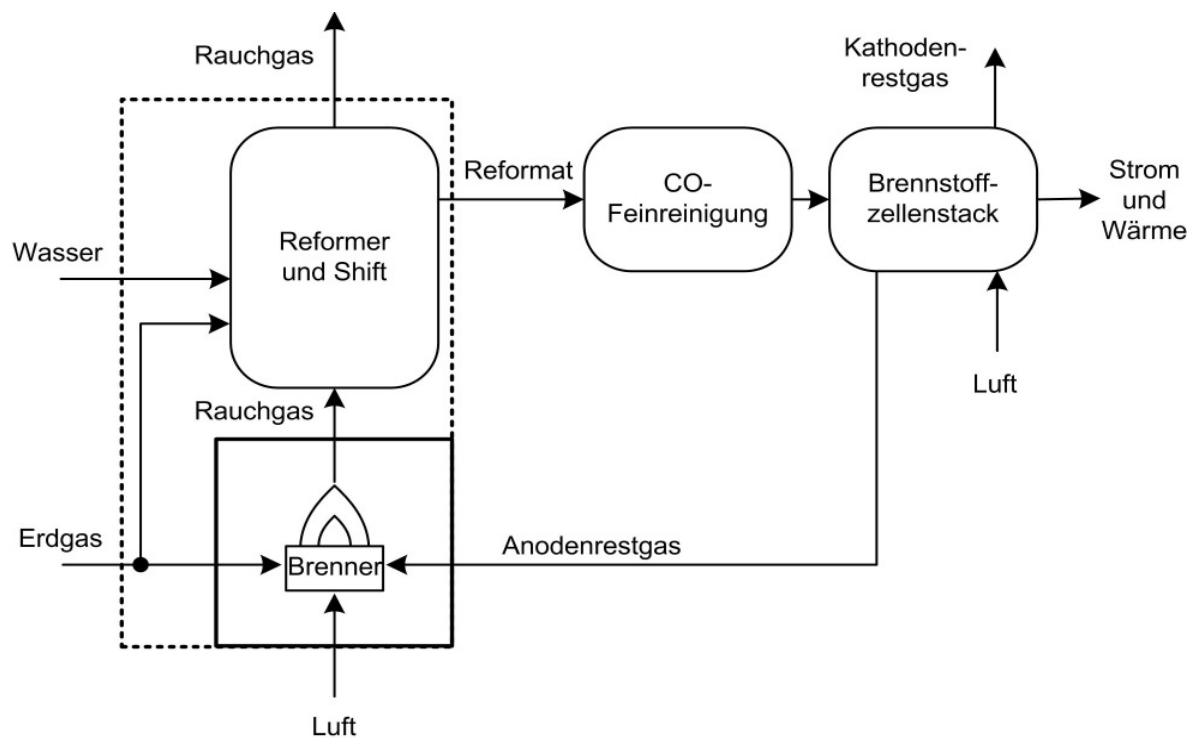
Typ	NO <sub>x</sub> / mg/kWh	CO / mg/kWh
Vaillant ecoTEC	< 20	-
Buderuns Logano plus	< 20	< 15
Brötje EcoTherm Plus	< 15	< 5

**Tabelle 3.4.4:** Herstellerangaben zu Emissionswerten aktueller Gasheizkessel

Die Bewertung von Schadstoff-Emissionen erfolgt im Bereich der Hausenergieversorgung in der Regel auf Basis von Energie bezogenen Schadstoffeinheiten (z.B. mg/kWh), wie den o.a. Tabellen entnommen werden kann. Die im Teststand verwendeten Gasanalysen geben jedoch nur den relativen Volumenanteil der gemessenen Gase im Rauchgas in der Einheit ppmv oder in Volumenprozent an. Diese Messwerte allein sind also für die Vergleiche mit den entsprechenden Grenzwerten nicht aussagekräftig. So ist z.B. die Bezugsgröße der Messwerte, das Rauchgasvolumen, keine konstante Größe, sondern mit steigendem Lambda nimmt auch die Rauchgasmenge zu. Korrekte Vergleiche mit den o.a. Grenzwerten können demnach nur durch eine Umrechnung der Messwerte auf energiebezogene Einheiten oder eben durch Umrechnung der Grenzwerte auf die bei der Messung sich ergebende Rauchgasmenge erreicht werden. Für die

Umrechnung muss auf die VDI-Richtlinie 4660 zurückgegriffen werden, in der die Vorgehensweise für die unterschiedlichen Brenngase beschrieben wird. Am Lehrstuhl für Energietechnik steht für die Umrechnung ein dazu erstelltes Programmsystem zur Verfügung. Hier werden die aus dem gekühlten, trockenen Rauchgas gemessenen Werte für CO und NO<sub>x</sub> jeweils umgerechnet in Milligramm pro Kilowattstunden. Die Dimension mg/kWh bietet den Vorteil, dass die Emissionen nun auf die eingesetzte Energiemenge bezogen werden. So sind Aussagen über Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoffen, unabhängig vom Luftüberschuss und der Inertgasmenge im Rauchgas möglich.

Neben der Umrechnung auf eine vergleichbare Dimension ist es notwendig, die energetischen Bilanzgrenzen des BZH zu definieren. Aus der folgenden Abbildung 3.4.4 gehen zwei Möglichkeiten der Bilanzierung für die Schadstoffemissionen hervor. Die äußere Bilanzgrenze (gestrichelte Linie) berücksichtigt die insgesamt zugeführte Energie für das System inklusive des Reformererdgases. Im Vergleich zur Bilanzierung des Brenners allein, ohne Reformier (durchgezogene Linie), werden so wegen der erheblich größeren energetischen Bezugsgröße deutlich niedrigere Emissionswerte ermittelt.



**Abbildung 3.4.4:** Mögliche Bilanzgrenzen für die Bewertung der Emissionen eines BZH

Die Definition der Bilanzgrenzen um den Brenner (durchgezogene Linie), wird hier jedoch als die strengere und damit sinnvollere Variante angesehen und in den  
Seite 34

folgenden Betrachtungen angewendet. Die folgenden Abbildungen 3.4.5 und 3.4.6 zeigen die volumenbezogenen Messwerte von CO und NOx in Abhängigkeit der Brennerleistung für die drei gewählten Brenngasausnutzungsgrade (FU).

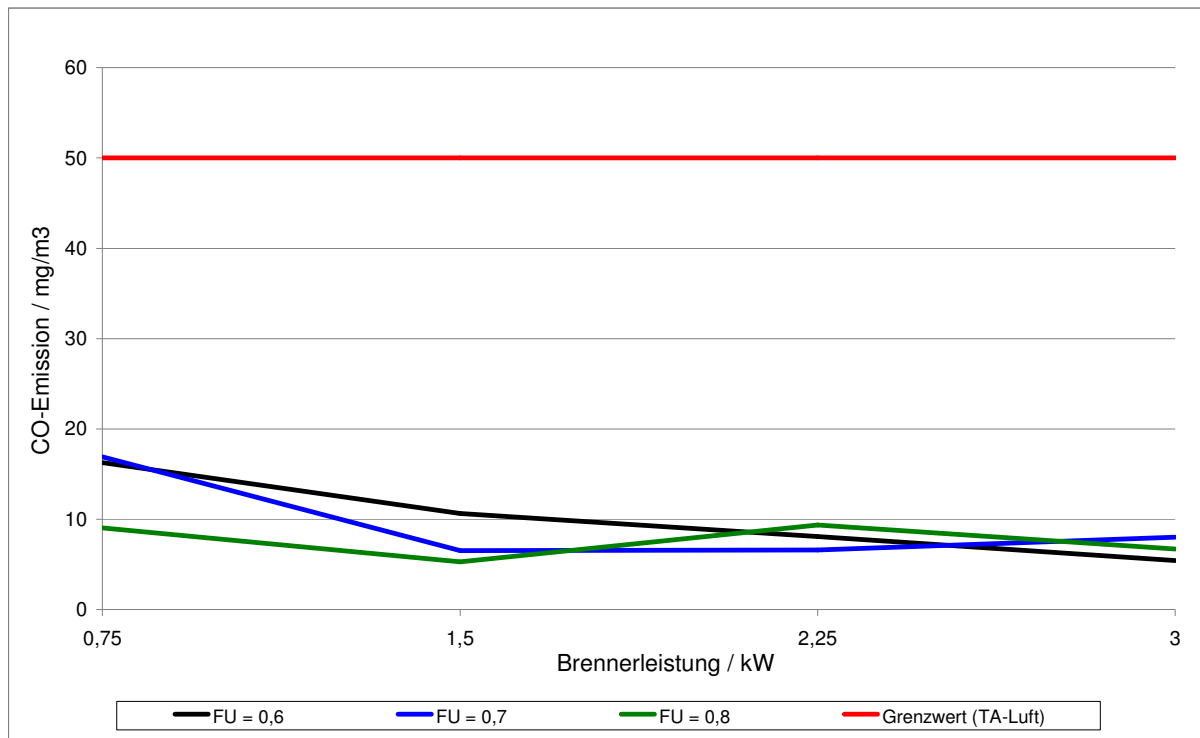


Abbildung 3.4.5: Rauchgasvolumenbezogene CO-Emissionen mit Grenzwert

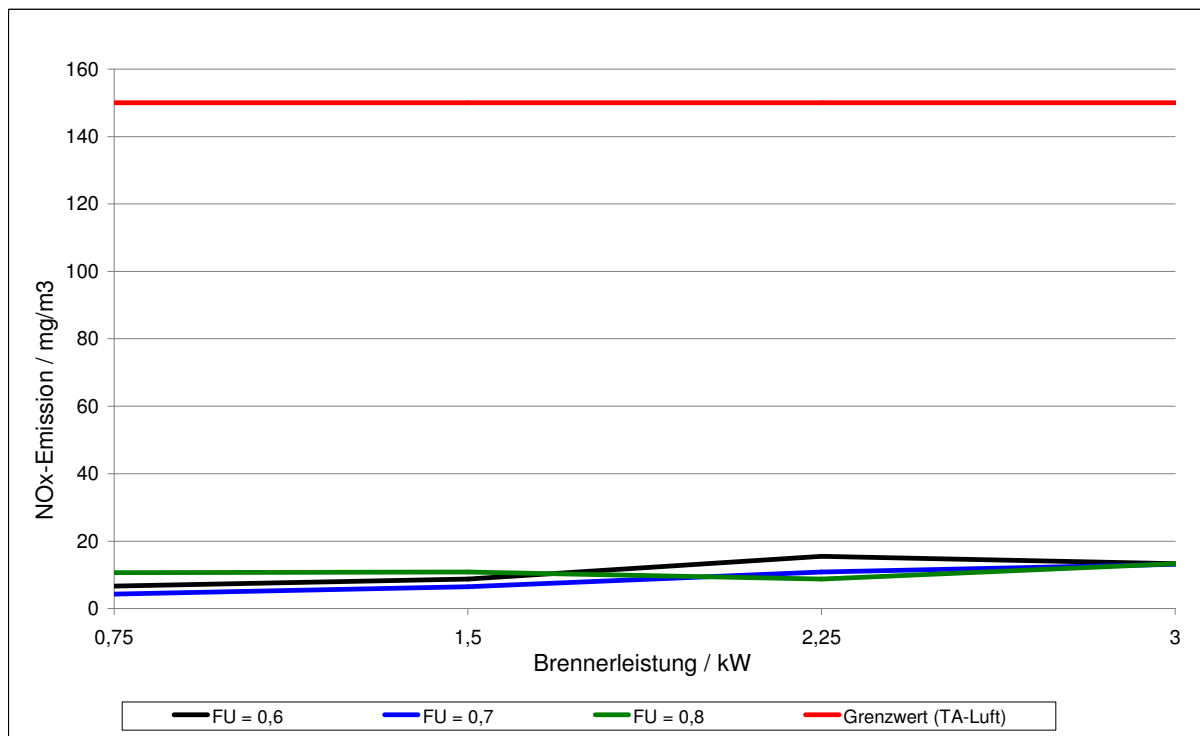


Abbildung 3.4.6: Rauchgasvolumenbezogene NOx-Emissionen mit Grenzwert

In den Abbildungen 3.4.5 und 3.4.6 sind neben den Messwerten noch die volumenbezogenen Grenzwerte gemäß dem „Blauen Engel“ aus der Tabelle 3.4.3 eingetragen. Die Abbildungen machen deutlich, dass die Messdaten die auf das Rauchgasvolumen bezogenen Grenzwerte der Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) in allen zwölf Messpunkten in erheblichem Maße und deutlich unterschritten werden.

Die auf das Rauchgasvolumen bezogenen Messdaten wurden nach der VDI-Richtlinie 4660 in brennstoffenergiebezogene Werte umgerechnet und in den beiden folgenden Abbildungen 3.4.7 und 3.4.8 ebenfalls als Funktion der Brennerleistung aufgetragen. Zusätzlich wurden die Grenzwerte des „Blauen Engels“ aus Tabelle 3.4.3 und die Werte aktueller Heizkessel zur Orientierung mit eingetragen. Auch bei dieser Form der Darstellung wird deutlich, dass die Emissionswerte des im Projekt entwickelten Flächenbrenners erheblich unter den gesetzlichen Grenzwerten liegen. Die Werte für die Kohlenmonoxid-Emissionen liegen mit steigender Brennerleistung leicht sinkend immer unterhalb von 20 mg/kWh. Die Stickoxide nehmen mit steigender Brennerleistung leicht zu, liegen aber im Bereich von 5 mg/kWh bis etwa 15 mg/kWh ebenfalls in einem sehr niedrigen Bereich. Die im Prinzip mit der Brennerleistung entgegengesetzten Verläufe von CO (sinkend) und NO<sub>x</sub> (steigend), die sich durch die mit steigende Brennerleistung auch steigenden Temperaturen erklären lassen (s. Abb. 3.4.2), machen einen prinzipiellen Zielkonflikt bei der Kontrolle der Emissionen deutlich. Will man Maßnahmen zur Reduktion von CO oder von NO<sub>x</sub> ergreifen, ergeben sich gegenläufige Forderungen. Bei der NO<sub>x</sub>-Reduktion werden möglichst niedrige Verbrennungstemperaturen angestrebt, um die Bildung von thermischen Stickoxiden zu unterdrücken [War1997]. Niedrige Verbrennungstemperaturen führen jedoch zu höheren CO-Emissionen, da die Reaktionsgeschwindigkeit mit abnehmender Temperatur sinkt und dann das bei der Verbrennung gebildete CO nicht mehr schnell genug zu Kohlendioxid umgesetzt werden kann, obwohl bei dem gewählten Luftüberschuss  $\lambda$  von 1,2 noch ausreichend Sauerstoff zur Verfügung steht. Dennoch kann hier festgestellt werden, dass bei dem entwickelten Flächenbrenner die Emissionswerte insgesamt sehr niedrig liegen und die Schadstoffemissionen des Brenners im Betrieb mit Anodenrestgas vergleichbar niedrige Werte wie aktuelle Heizkessel aufweisen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die insgesamt sehr guten Eigenschaften des Flächenbrenners bezüglich der Wärmeeinbringung in den Reformer und hinsichtlich

der niedrigen Schadstoffemissionen im Bereich von aktuellen Heizkesseln die prinzipielle Tauglichkeit des Flächenbrenners für den Einsatz in einem Reformersystem grundsätzlich bestätigte.

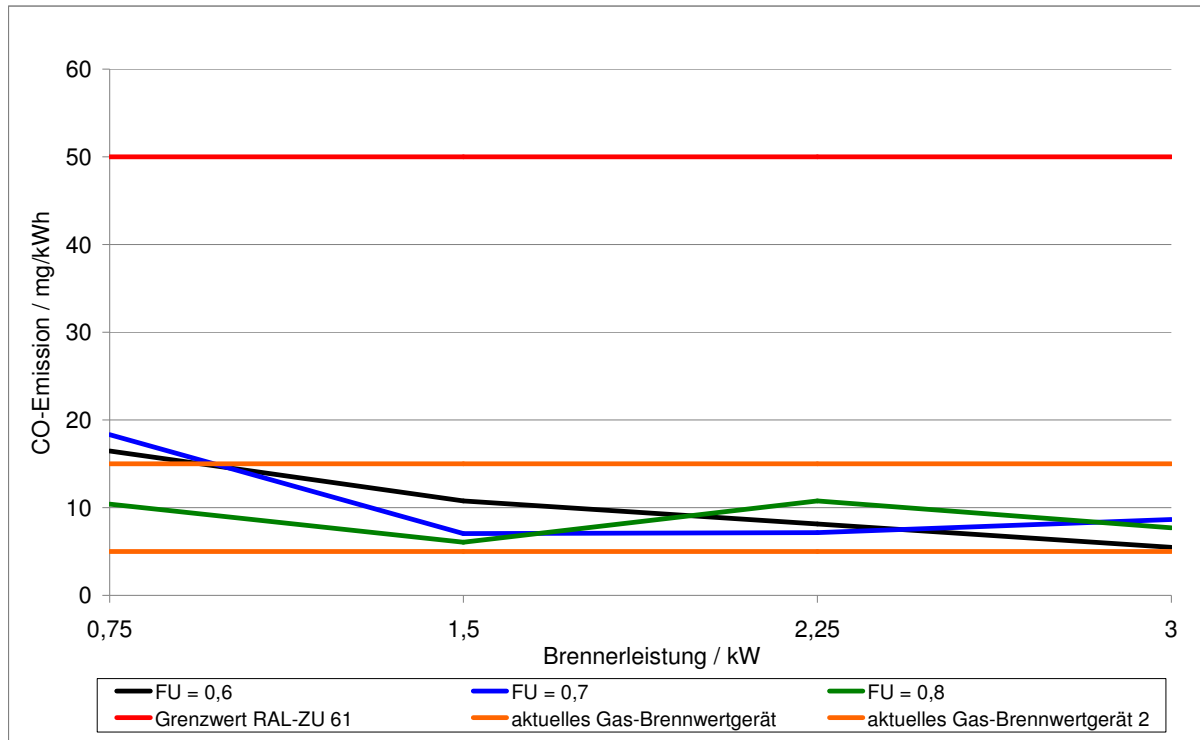


Abbildung 3.4.7: Brennstoffenergiebezogene CO-Emissionen mit Grenz- und Vergleichswert

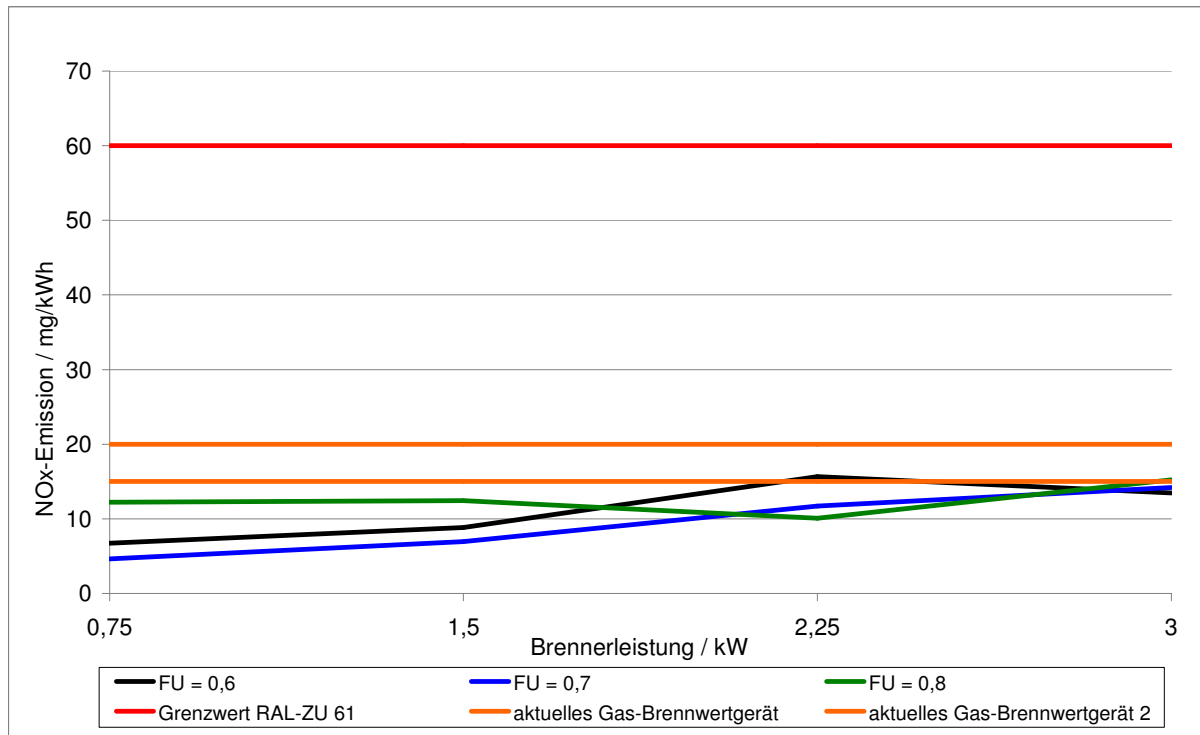
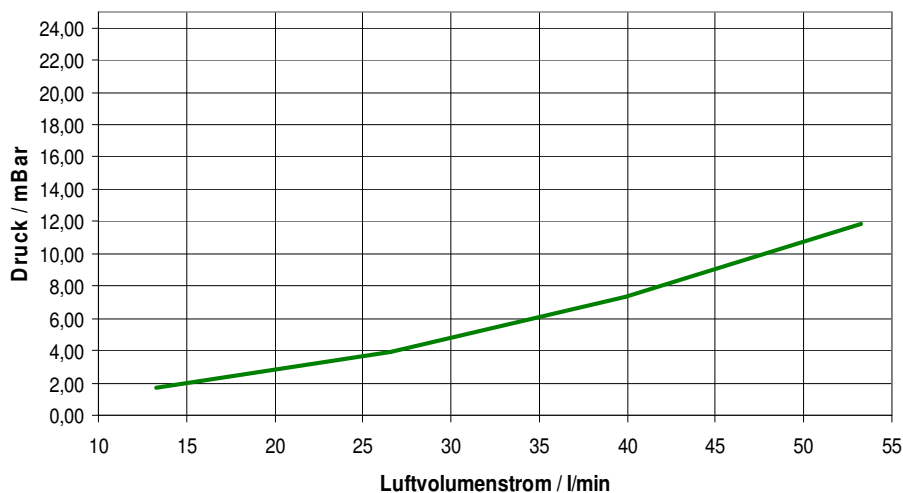


Abbildung 3.4.8: Brennstoffenergiebezogene NOx-Emissionen mit Grenz- und Vergleichswert



Während der oben beschriebenen Messungen wurden zur Ermittlung der benötigten Gebläse-Betriebsdaten an jedem eingestellten Lastpunkt der Gegendruck im Verbrennungslufttrakt aufgenommen und damit eine Verbraucherkennlinie des Brenner-Abgas-Traktes ermittelt. Der Brenner-Abgas-Trakt besteht aus dem eigentlichen Brenner (Zuströmung der Luft in den Vormischbereich des Brenners und Durchströmen des Metallfaservlieses) und dem gesamten Abgas-Trakt des Reformers (bestehend aus der Reformerbrennkammer, Durchströmbereich der Reformershülle mit den Wärmetauschern und dem Ausströmbereich für das Brennerrauchgas im Deckelbereich des Reformers) erstellt.

Der maximal erforderliche Luftvolumenstrom lässt sich entsprechend den Simulationsrechnungen in Tabelle 2.2.1 für  $\lambda = 1,2$  bei einer Brenngasausnutzung (FU) von 80 % und 3 kW Brennerleistung zu 53,3243 l/min ablesen. Für die Verbrennung von reinem Methan hat die Simulation einen Luftbedarf von 57,5 l/min (Wert in den Tabellen nicht dargestellt) ergeben. Es zeigte sich also, dass bei den maximal hier eingestellten Volumenströmen von knapp 55 l/min ein Gegendruck von etwa 12 mbar gemessen werden konnte. Die Geräte- bzw. Verbraucherkennlinie ist in der Abbildung 4.4.9 dargestellt.



**Abbildung 3.4.9:** Verbraucherkennlinie des Reformersystems bei Normalbetrieb

Für die folgende Auslegung des Verbrennungsluftgebläses wurde von einem Gegendruck von 15 mbar bei einem Luftvolumenstrom von 50 bis 70 l/min ausgegangen, um noch entsprechende Reserven z.B. für eine gegebenenfalls erforderliche Erhöhung der Luftzahl  $\lambda$  zur Verfügung zu haben.

## 4 Gebläse

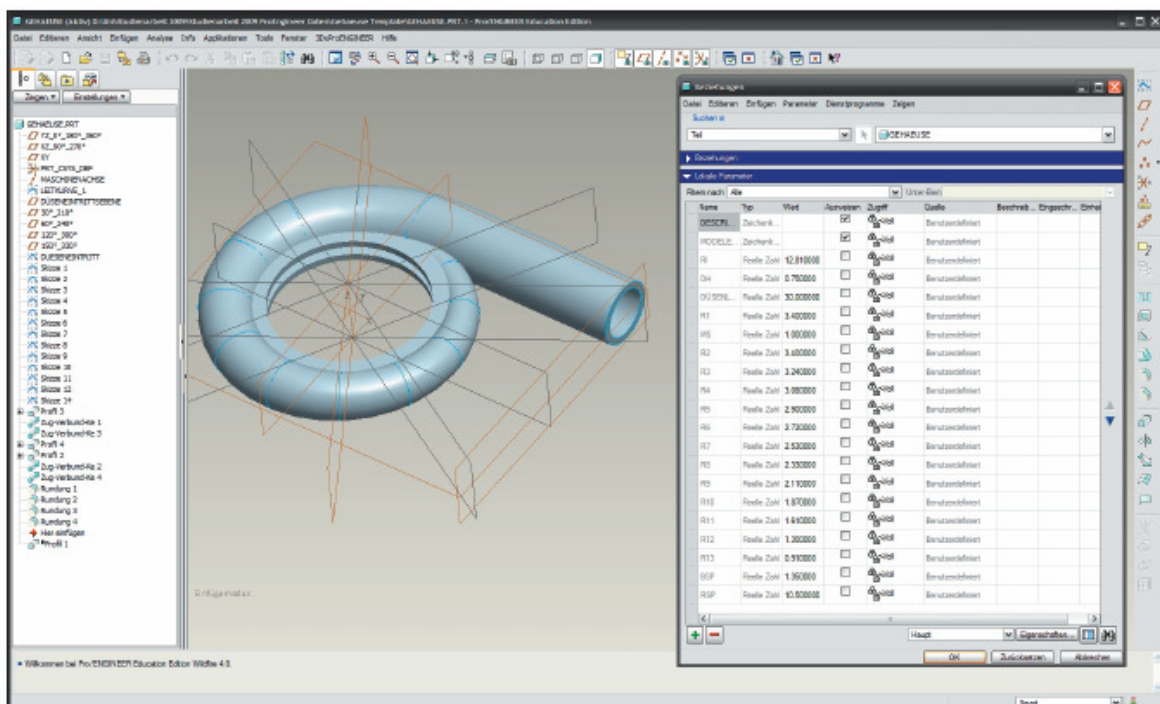
### 4.1 Entwurf und Konstruktion eines Verbrennungsluftgebläses

Die Versorgung mit Verbrennungsluft des bei der Forschungsstelle 1 (GWI) entwickelten Flächenbrenners soll durch ein bei der Forschungsstelle 2 (UDE) neu entwickeltes Gebläse realisiert werden. Die Neuentwicklung war notwendig, da eine Marktrecherche gezeigt hatte, dass für die in Abb. 3.4.9 dargestellte Kombination von Volumenstrom und Druckerhöhung exakt kein passendes, kommerzielles Gebläse verfügbar ist. Die für das zu entwickelnde Gebläse geforderten Auslegungsdaten orientieren sich an der benötigten Brennerleistung für den Reformer. Bei einer thermischen Leistung des Reformers von ca. 7,5 kW ist ca. 3 kW an thermischer Brennerleistung erforderlich. Dadurch werden, je nach Luftüberschuss im Nennbetriebspunkt des Brenners, ca. 50 - 70 l/min und 15 mbar an der Luftseite des Brenners notwendig. Auf Basis vorhandener experimenteller Erfahrungen wurde der Luftüberschuss  $\lambda$  bei den Reformermessungen zu 1,2 eingestellt, dieser Wert hatte sich ja bei den Emissionsmessungen, die in Kapitel 3.4 dargestellt sind, sehr gut bewährt. Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Gebläse passen nicht allerdings nicht exakt zu den beschriebenen Anforderungen. Gebläse bzw. Lüfter mit passendem Volumenstrom erbrachten nicht die erforderliche Druckerhöhung von 15 mbar und die Gebläse mit einer ausreichenden Druckerhöhung fördern dann einen deutlich zu hohen Volumenstrom. Um also ein optimal passendes Gebläse mit einem hohen Wirkungsgrad zu realisieren ist eine Neuentwicklung notwendig.

Die Entwicklung eines zum Reformer passenden Radialgebläses erfolgte bei der Forschungsstelle 2 mit Hilfe des Lehrstuhls für Strömungsmaschinen, das ebenfalls zum Institut für Energie und Umweltverfahrenstechnik der Universität Duisburg-Essen gehört. Die Auslegungsberechnung des Gebläses erfolgt nach [Fis1986]. Zur Berechnung wurde die Software Mathcad von PTC verwendet. Diese ermöglichte es, die Berechnung so zu programmieren, dass die Ergebnisse der verwendeten Formeln grafisch dargestellt werden können, was die Kontrolle der Programmierung erleichtert. Darüber lassen die Ergebnisse leichter nachvollziehen und werden in anschaulicher Form dokumentiert.

Zur Erzeugung der Laufradgeometrie und des Einlaufes wurde das Programm Blade Geometry 12.0 verwendet. Mit Hilfe dieses Programms wurde die gesamte fluidbenetzte Geometrie automatisch erzeugt und konnte dann in verschiedenen Formaten, z.B. zur Gittererzeugung in Turbo Grid 12.0 oder zur Geometrieerzeugung in Pro/ENGINEER, exportiert werden. Der Vorteil von Blade Geometry liegt in der Möglichkeit, die Parameter des Laufrades und des Einlaufes schnell und einfach abzuändern. So können mit relativ geringem Aufwand auch mehrere Varianten einer Geometrie erstellt werden.

Die Spiralgeometrie wurde ebenfalls anhand der in Mathcad berechneten Ausgangsdaten erzeugt. Für die Erzeugung wurden diese mit einem parametrischen Pro/ENGINEER Modell gekoppelt. Nach der Eingabe der Parameter und der Berechnung in Mathcad wurde direkt die entsprechende Geometrie in Form eines Pro/ENGINEER Modells zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 4.1.1).



**Abbildung 4.1.1:** Darstellung der Spiralgeometrie mit Pro/ENGINEER

Nachdem das Gebläse ausgelegt und die fluidbenetzte Geometrie erzeugt ist, folgt die numerische Simulation zur Überprüfung der Ergebnisse mit Hilfe der ANSYS 12.0 CFX Umgebung. Das Ziel dieser Simulation ist es die Berechnungen so anzupassen, dass die einzelnen Bauteile möglichst strömungsgerecht gestaltet werden können.

Nach der Erstellung der fluidbenetzten Oberfläche folgte die Diskretisierung des durchströmten Volumens. Die Art der Diskretisierung hat einen großen Einfluss auf

die späteren Berechnungsergebnisse, da über die gewählte Auflösung des Gitternetzes in der Regel auch das Konvergenzverhalten der Berechnung sowie die Genauigkeit der errechneten Ergebnisse beeinflusst werden können.

Die generierten Gitternetze für Laufrad und Einlauf wurden in Turbo Grid 12.0 erzeugt. Dies ist eine relativ einfache Art der Generierung von Gittern, da das Gitternetz nahezu vollautomatisch erzeugt wird. Die Geometrie von Einlauf und Laufrad wurden zuvor mit Blade Geometry erzeugt. Es wurden zwei separate Bereiche an Gitternetzen erzeugt, einer für den Einlauf (Inlet) und einer für das Laufrad (Passage), ansonsten wäre es später nicht möglich gewesen, das Laufrad drehend und den Einlauf stehend zu simulieren. Für die Erzeugung des Gitternetzes der Spirale wurde das Programm Advanced Meshing (ICEM CFD) verwendet.

In CFX Pre (Pre) werden nun alle zuvor gesammelten Ergebnisse für die endgültige Simulation zusammengefügt. Die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgt in CFD-Post (Post), wie in Abbildung 4.1.2 und 4.1.3 dargestellt, Die endgültige Konstruktion aufgrund der Simulationsergebnisse erfolgt dann in mehreren Teilschritten, über die Grobgestaltung und die Berücksichtigung des vorgesehenen Fertigungsverfahrens bis hin zur Feingestaltung, zunächst der Baugruppe und dann der Einzelkomponenten, mit Hilfe von Pro/ENGINEER. Zuletzt werden die Daten für das hier als Fertigungsverfahren vorgesehen selektive Lasersintern (Rapid Prototyping) aufbereitet und in das STL-Format überführt.

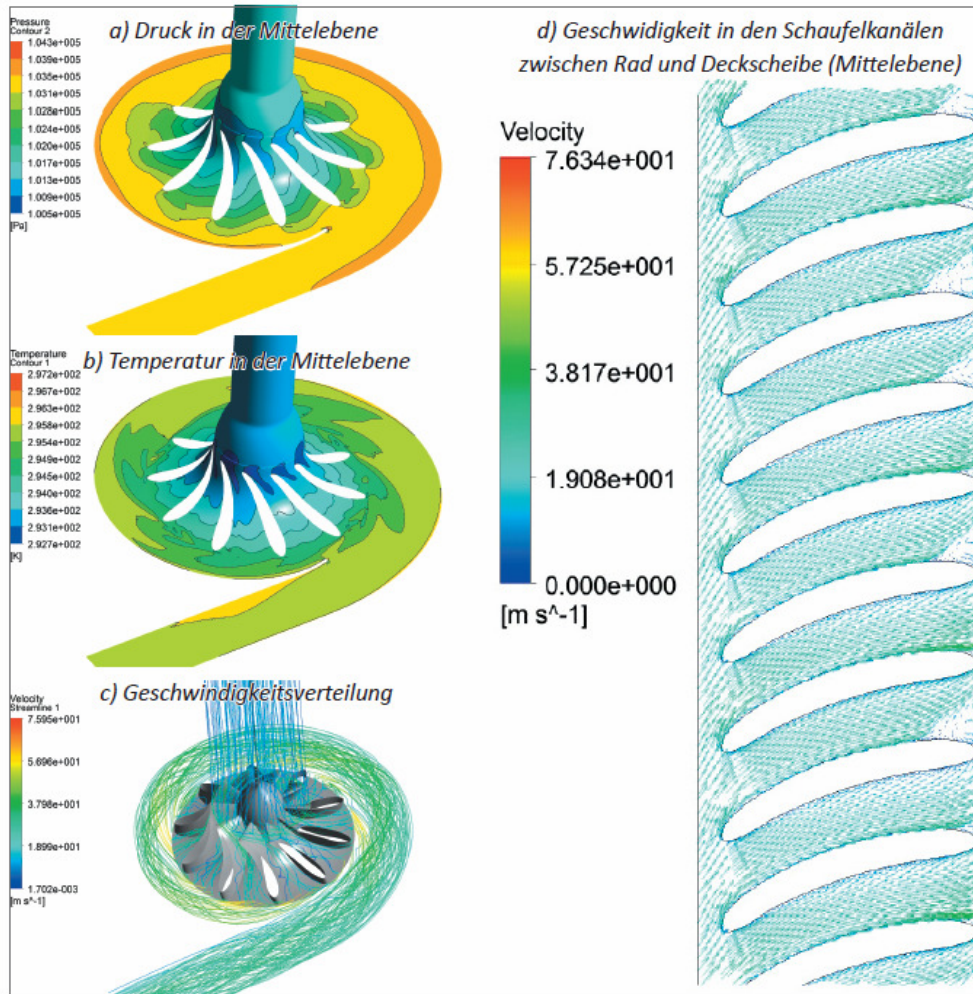


Abbildung 4.1.2: Simulationsergebnisse

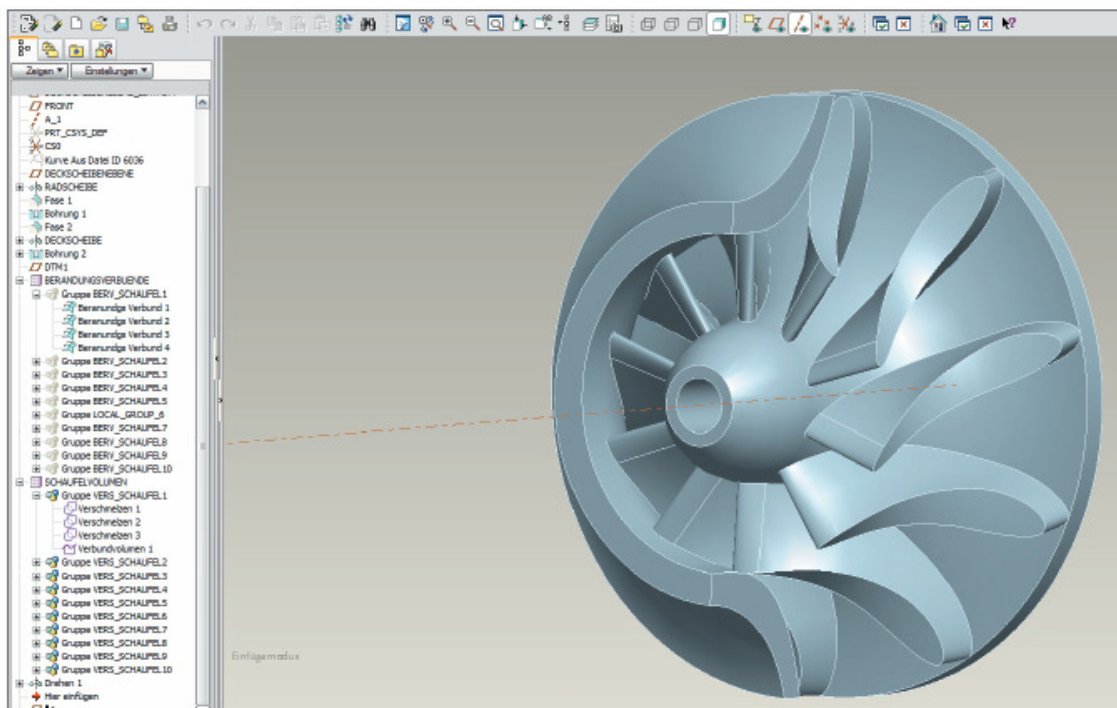
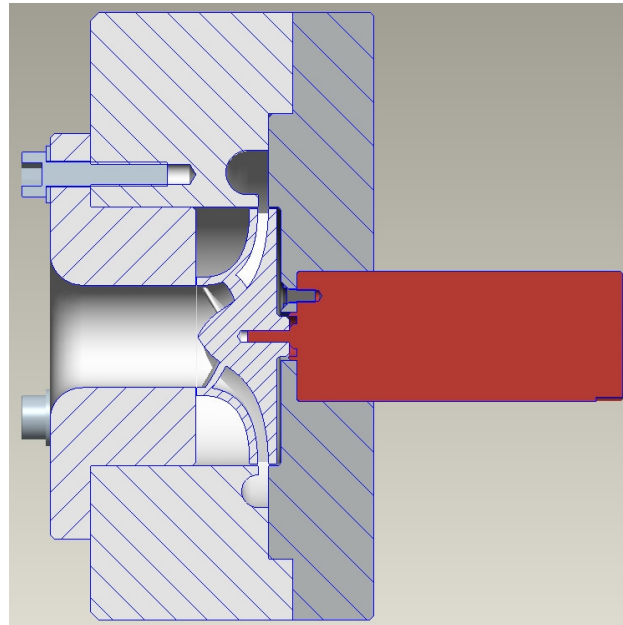


Abbildung 4.1.3: Schaufeln als Volumenkörper

## 4.2 Fertigung durch Rapid Prototyping

Das Radialgebläse wurde durch den Lehrstuhl für Product Engineering der UDE anhand der in Kap. 4.1 beschriebenen Vorgaben gefertigt. Die Herstellung erfolgte durch selektives Lasersintern welches eine spezielle Art des Rapid Prototyping darstellt. Bei diesem Verfahren werden räumliche Strukturen erstellt, indem ein pulverförmigen Ausgangsstoff gesintert wird. Es handelt sich also um ein generatives Schichtbauverfahren, bei dem das Werkstück Schicht für Schicht aufgebaut wird, indem die



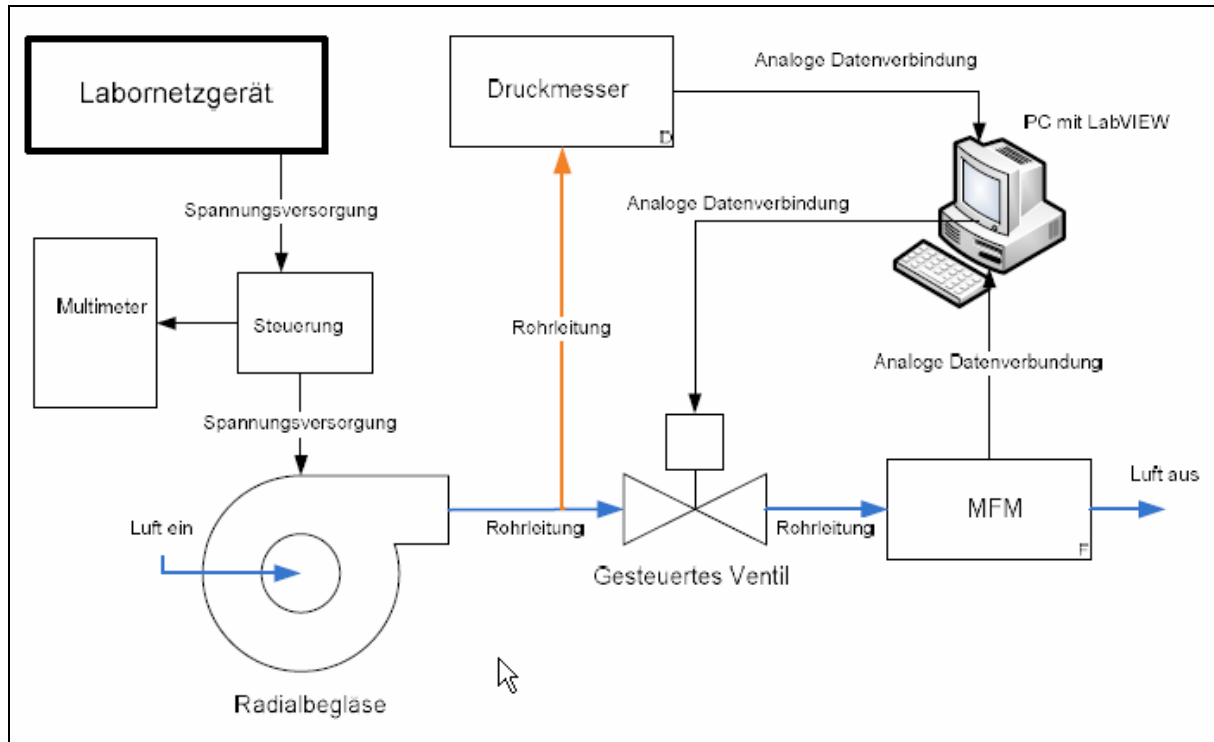
**Abbildung 4.2.1:** Gebläsesystem mit Radialgebläse und Antriebsmotor

Kunststoffpartikel von einem Laser miteinander verschmolzen werden. Auf diese Weise ist es möglich, beliebige dreidimensionale Geometrien auch mit Hinterschneidungen zu erzeugen. Dies ist vor allem deshalb wichtig, weil das Laufrad des Gebläses mit konventionellen Frästechniken in dieser Form nicht zu fertigen gewesen wäre. Dazu hätte es dann zweiteilig aufgebaut werden müssen. Auch ist die Herstellung eines Prototypen mittels selektivem Lasersintern sehr zeiteffizient, wodurch Verbesserungen in der Konstruktion des Gebläses schnell umgesetzt und ein neuer Prototyp erstellt werden konnte. Insgesamt wurden so im Laufe des Projektes drei komplette Prototypen mit 5 verschiedenen Laufrädern und verschiedenen Dichtungen entworfen und gefertigt. Die ersten beiden Modelle bestanden noch komplett aus lasergesinterten Teilen, während die dritte Gebläsegeneration dann zu besserer Wärmeabfuhr über ein geteiltes Gehäuse mit einer Aluminium-Gehäusehälfte verfügte (siehe Kapitel 4.3).

Mit Fertigungstoleranzen von etwa 1/10 Millimeter verfügt das selektive Lasersintern allerdings nicht über die Genauigkeit der ansonsten üblichen spanenden Bearbeitung. Daher wurden in einigen Fällen einzelne Bauteile (z.B. Dichtung und Laufradumfang) in der Mechanischen Werkstatt der UDE nachbearbeitet, um eine genaue Ausrichtung und Montage der Komponenten (s. Abb. 4.2.1) zu ermöglichen.

### 4.3 Experimentelle Untersuchung und Optimierung der Radialmaschine

Um das Gebläse zu charakterisieren, wurden an einem verfügbaren, speziellen Gebläse- und Pumpenprüfstand (s. Abb. 4.3.1) die Leistungsaufnahme und die Gebläsekennlinie vermessen.

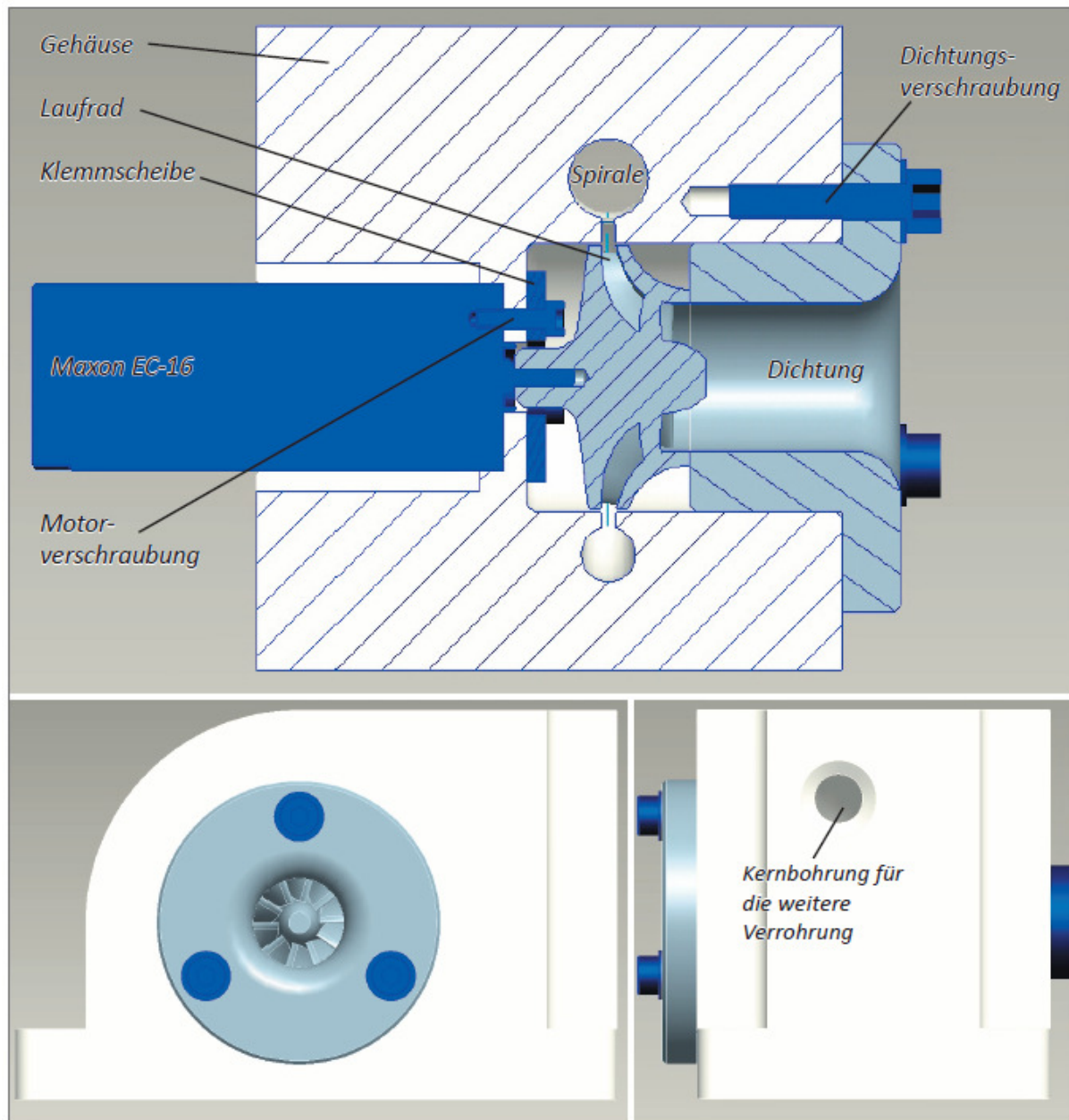


**Abbildung 4.3.1:** Schema des Pumpen- und Gebläseteststandes

Der Prüfstand besteht im Wesentlichen aus einem Labornetzteil zur Spannungsversorgung, einem gesteuerten Ventil zum Einstellen unterschiedlicher Vordrücke, einer Druckmessdose zur Messung der Gegendrücke, einem Massflowmeter (MFM) zur Messung der Volumenströme und einem Rechner zur Messwerterfassung und Steuerung des Teststandes. Das Gebläse selbst wird von einem EC 16 Motor der Firma „Maxon Motor“ angetrieben. Die Drehzahlregelung des Motors mit einer maximalen Drehzahl von 50.000 1/min erfolgt über eine Steuerplatine, die ebenfalls von „Maxon Motor“ hergestellt und vertrieben wird.

Die Untersuchung des ersten gelieferten Gebläses ergab deutlich zu geringe Luftvolumenströme, schon bei geringen Gegendrücken. Dies konnte auf einen Auslegungsfehler zurückgeführt werden. Dieser Fehler wurde bei dem zweiten gelieferten Gebläse behoben. Abbildung 4.3.2 zeigt die Zusammenbauzeichnung für das Gebläse der zweiten Generation. Das Gebläse hat ein einteiliges Gehäuse, das

ebenso wie die Dichtung und das Laufrad mittels Rapid Prototyping gefertigt wurde, allerdings erschwerte das als ein Bauteil gestaltete Gehäuse eine optimale Ausrichtung von Motor, Laufrad und Spirale.

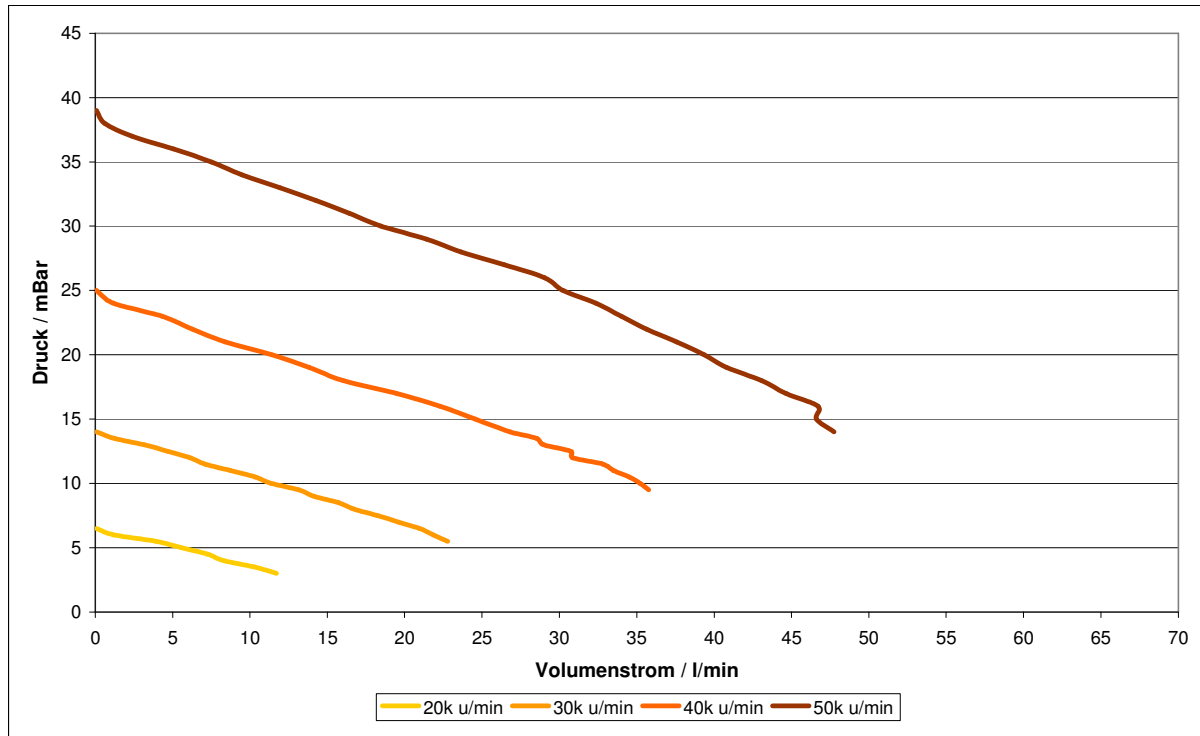


**Abbildung 4.3.2:** Zusammenbaudarstellung des Gebläses der zweiten Generation

Die exakte Ausrichtung des Laufrades durch die entlang der Maschinenachse verlaufende Bohrung im Gehäuse war äußerst schwierig, so dass sich intern erhebliche Strömungsverluste einstellten. Außerdem entwickelte der Motor bei Probeläufen mehr Abwärme als erwartet, welche durch die vorgesehenen Kühlschlitze nicht ausreichend abgeführt werden konnte. Ein weiterer Punkt, der die Leistungsfähigkeit des Gebläses beeinträchtigte, war die wegen des Rapid

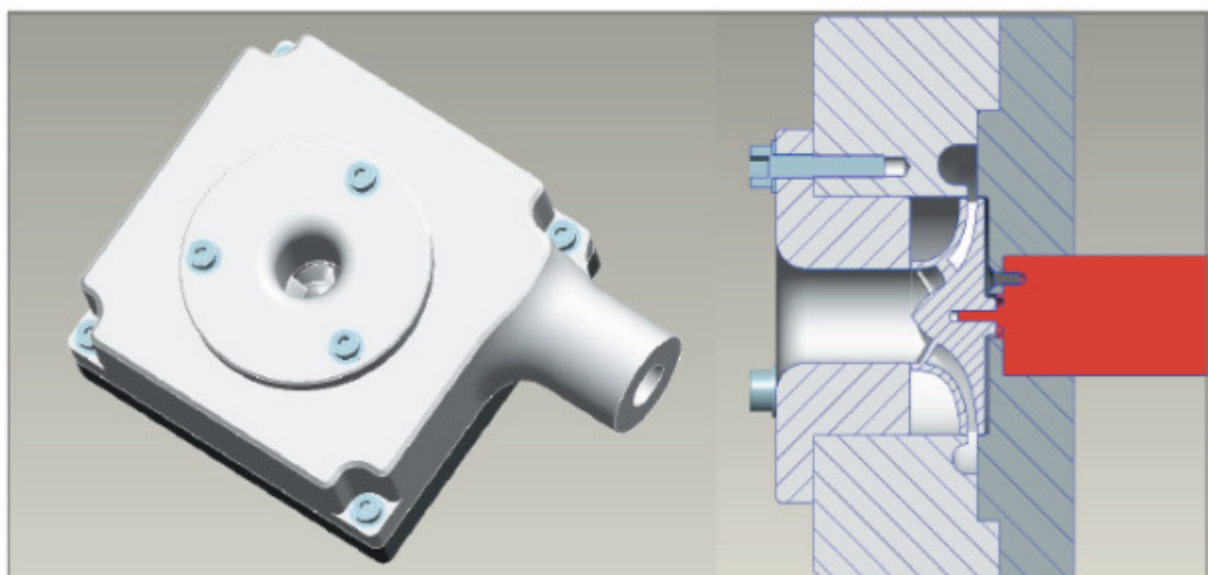


Prototyping fertigungsbedingte Rauigkeit der Laufradoberflächen, die bei den Auslegung nicht exakt berücksichtigt werden konnte. Diese Punkte führten dazu, dass auch das Gebläse der zweiten Generation bei der Charakterisierung im Teststand die geforderten Betriebsdaten von 50 bis 70 l/min Luftvolumenstrom bei 15 mbar Gegendruck nicht erreichen konnte (siehe Abb. 4.3.3)

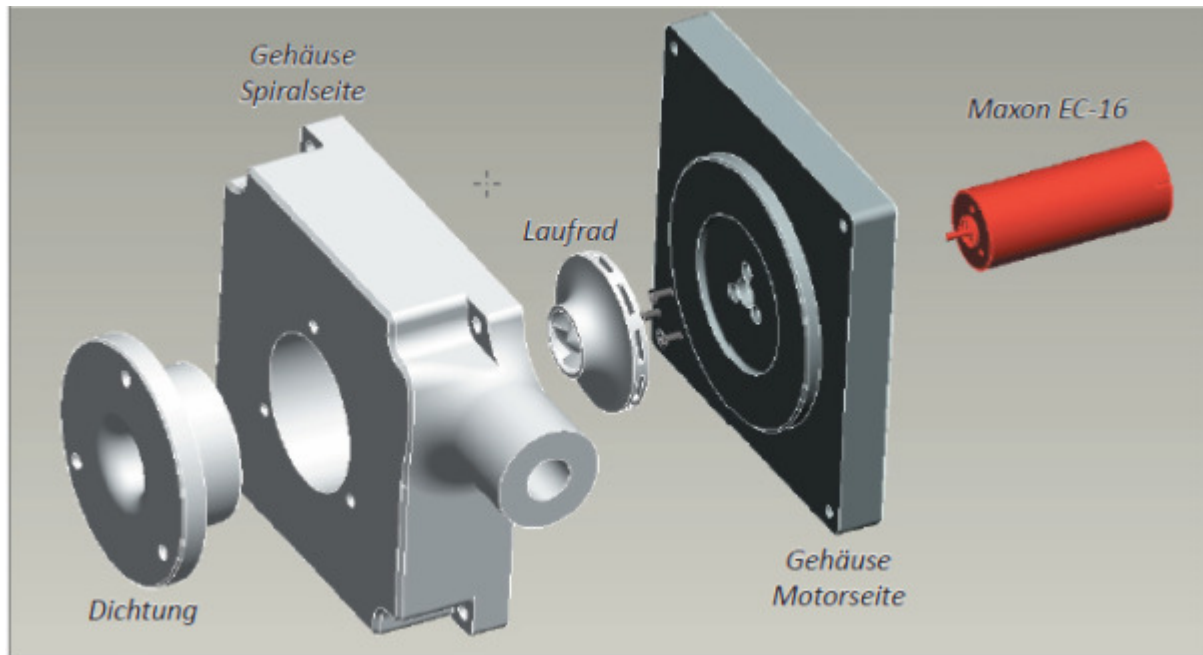


**Abbildung 4.3.3:** Gebläsekennlinien des Gebläses der zweiten Generation

Die wurde nun eine dritte Generation des Verbrennungsluftgebläses gefertigt, welches mit einem zweigeteilten Gehäuse ausgeführt ist (s. Abb. 4.3.4 und 4.3.5).



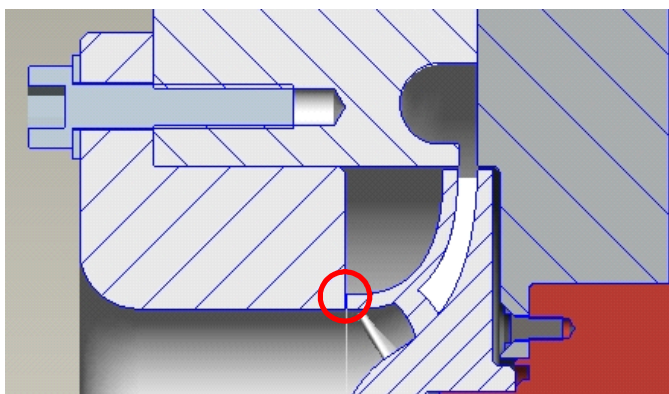
**Abbildung 4.3.4:** Zusammenbau darstellung des Gebläses der dritten Generation



**Abbildung 4.3.5:** Explosionsansicht des Gebläses der dritten Generation

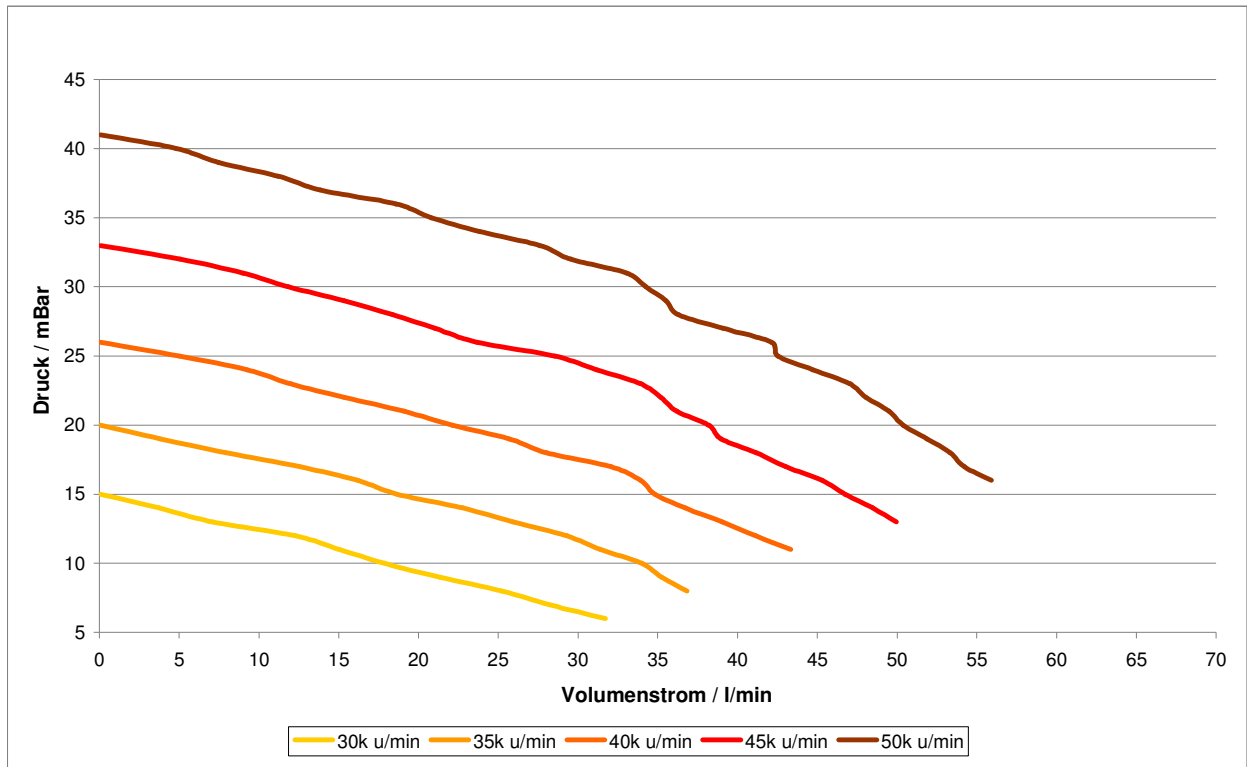
Diese Maßnahme verbessert die Montierbarkeit des Gebläses deutlich. Die spiralseitige Gehäusehälfte wurde wieder durch Rapid Prototyping aus Kunststoff gefertigt, während nun die motorseitige Hälfte in Aluminium ausgeführt und gefräst wurde. Dies ermöglicht zum einen eine weit bessere Fertigungstoleranz und darüber hinaus eine effektive Motorwärmeabfuhr über die motorseitige Gehäusehälfte. Zuletzt wurde das Laufrad etwas größer ausgelegt und durch diese zusätzlichen Reserven konstruktiv an die erhöhten Druckverluste durch die rauhen Schaufeloberflächen angepasst.

Durch diese Maßnahmen erfüllte das Gebläse der dritten Generation die geforderten Betriebsdaten sofort im ersten Testlauf, wie aus Abbildung 4.3.6 ersehen werden kann. Bei einem Gegendruck von ca. 15 mbar kann nun ein Luftvolumenstrom von ca. 55 l/min erreicht werden. Da diese Werte allerdings deutlich unter den theoretischen Werten der Auslegung lagen, wurde das Laufrad zunächst noch einmal

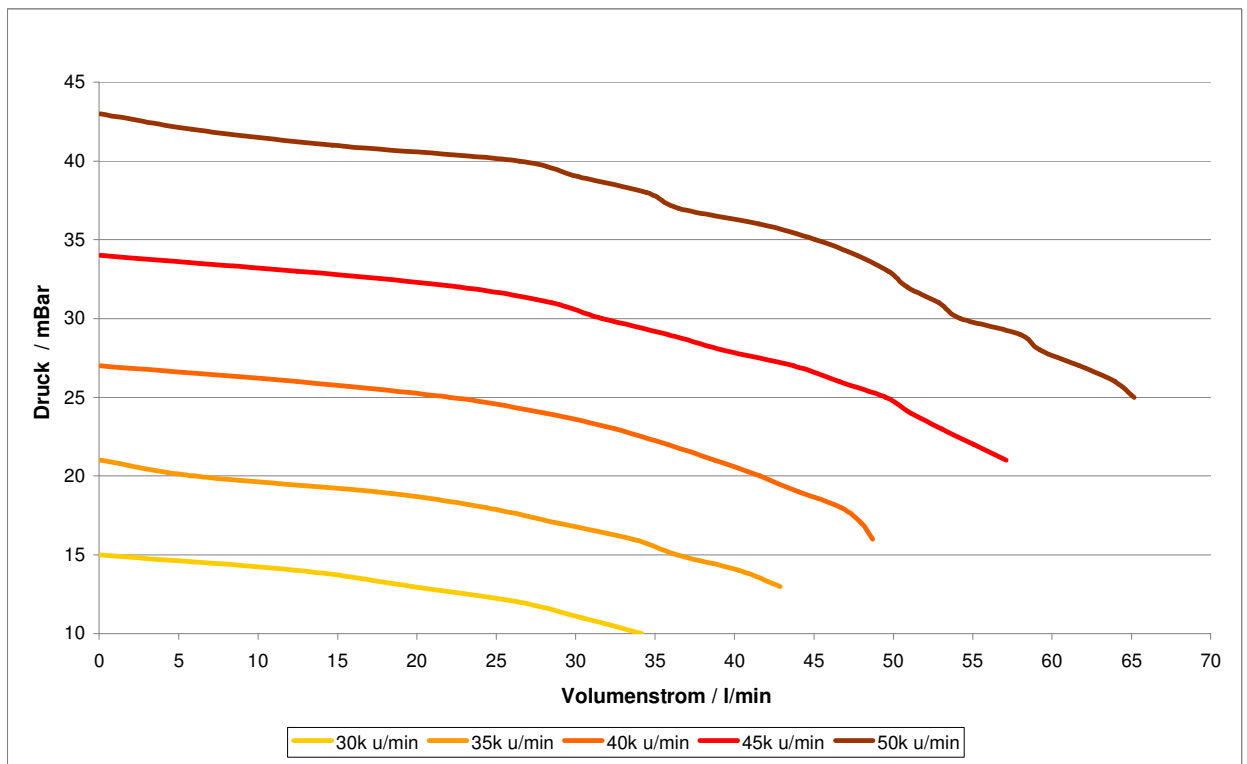


erneut durch kräftiges Ausblasen gereinigt. Die Ergebnisse dieses zweiten Testlaufes zeigten, dass die Maßnahmen erfolgreich waren und bereits zu einer deutlichen Verbesserung der Leistung führten (s. Abb. 4.3.7).

**Abbildung 4.3.5:** Dichtungskonzept



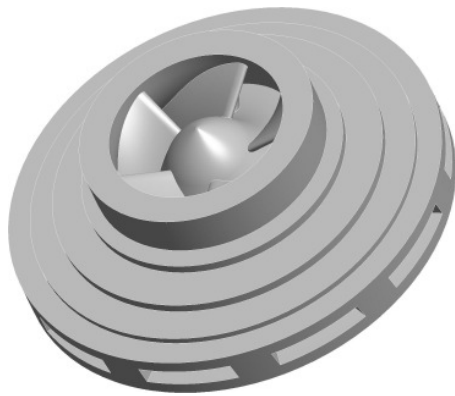
**Abbildung 4.3.6:** Gebläsekenlinie der dritten Gebläsegeneration im ersten Testlauf



**Abbildung 4.3.7:** Gebläsekenlinie der nachbearbeiteten dritten Gebläsegeneration (2. Testlauf)

Die theoretischen Auslegungswerte konnten allerdings dennoch nicht erreicht werden. Weitere Untersuchungen zeigten, dass das Dichtungskonzept noch unzureichend war (s. Abb. 4.3.5). Die Dichtfläche zwischen Laufrad und Dichtung

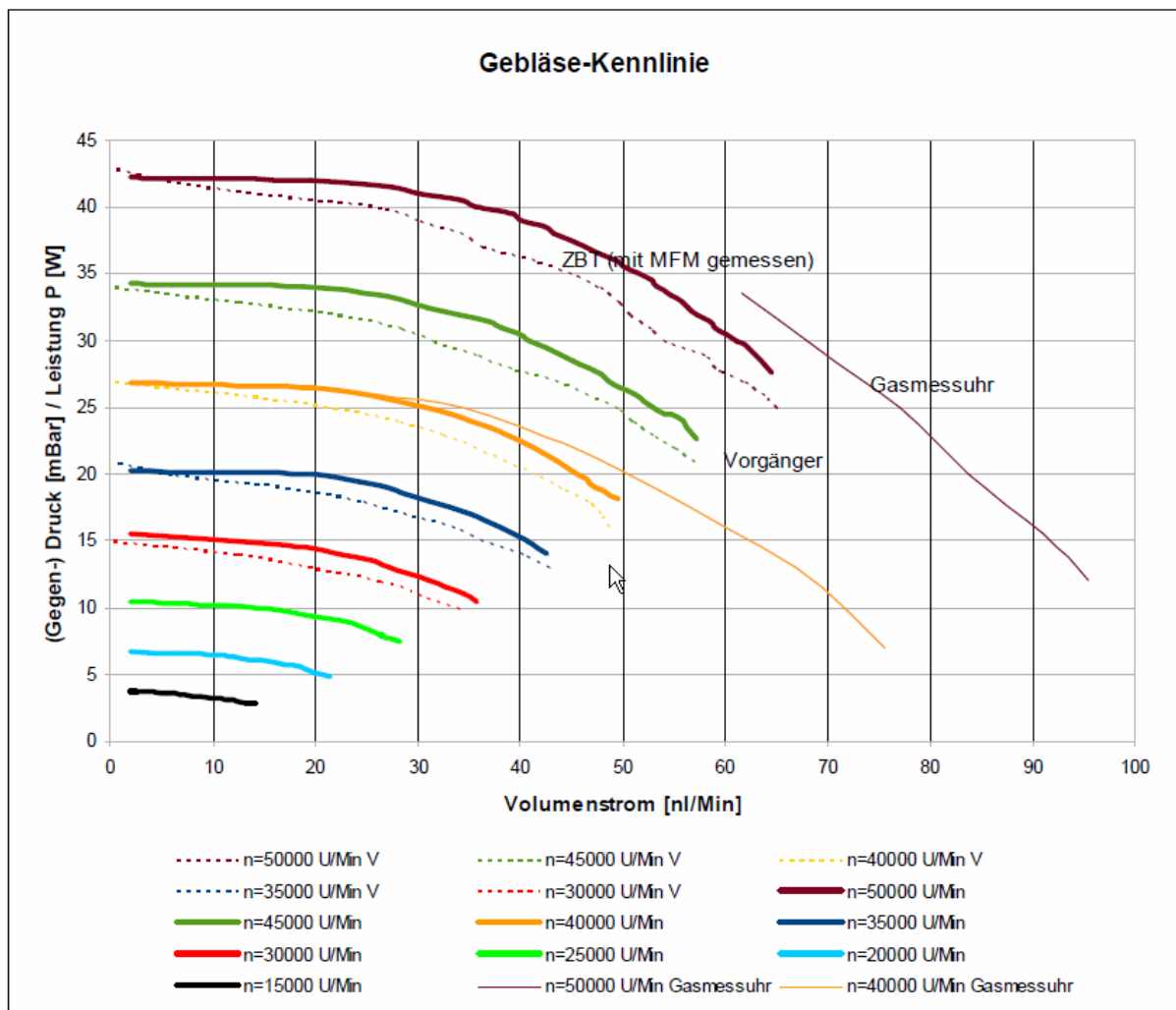
war offenbar zu klein. Daher wurde noch ein weiteres, neues Laufrad mit mehreren Dichtflächen konzipiert (s. Abb. 4.3.8) und die Dichtung gehäuseseitig entsprechend angepasst. Die Verbesserung der Dichtung führte, wie Abb. 4.3.9 zu entnehmen ist, zu einer weiteren Verbesserung der Gebläseleistung.



**Abbildung 4.3.8:** Laufrad mit verbessertem Dichtungskonzept

Alle drei Versionen des Gebläses der dritten Generation erfüllten also die Grundanforderungen. Dennoch konnte die Leistung durch die Nachbearbeitung und die verbesserte Dichtung noch einmal deutlich gesteigert werden. Dies ermöglichte, wie in den folgenden Arbeitspaketen noch gezeigt wird, die Modularität der Gebläse-

Brenner-Kombination noch weiter zu vergrößern.



**Abbildung 4.3.9:** Gebläsekennlinien des Gebläses mit verbessertem Dichtungskonzept

## 5 Überwachung Regelung und Verbrennung

### 5.1 Entwicklung eines Sensorikkonzeptes

Für die Überwachung der Verbrennung hat sich das Prinzip der Temperaturfeldüberwachung bei diesem Vorhaben als nicht geeignet herausgestellt. Es werden mehrere Thermoelemente benötigt, die jedoch einen zu hohen Verschleiß haben. Der nachfolgende Einbau der Thermoelemente gestaltet sich schwierig, da es unmöglich ist die exakte Einbaulage erneut zu realisieren. Für die Flammenüberwachung wurde deshalb auf eine Ionisationsstrommessung zurückgegriffen.

Aufgrund der variierenden Brenngaszusammensetzung ist die Ermittlung eines genauen Kennfelds sehr aufwändig, daher braucht man einen Monitor, um die Qualität der Verbrennung zu jedem Zeitpunkt und in jedem Betriebspunkt beurteilen zu können. Eine sehr gute Möglichkeit bietet dazu eine Lambdasonde. Es handelt sich dabei um eine bekannte, verhältnismäßig kostengünstige Technologie, die sich millionenfach bewährt hat, beispielsweise in der Automobilindustrie. Da die hier zu entwickelnde Gebläse-Brenner-Kombination auch den Massenmarkt, die Hausenergieversorgung, im Fokus hat, ist die Verwendung von möglichst kostengünstigen Komponenten von großer Bedeutung. Die Lambdasonde erlaubt die Beobachtung der Sauerstoffmenge im Abgas und damit einen Rückschluss auf eine der Einflussgrößen der Verbrennung. Am Reformerbrenner ist die Luftmenge die Haupteinflussgröße zur Steuerung der Verbrennungsqualität, da die Brenngaszusammensetzung und die Leistung durch die vorgeschalteten Prozesse vorgeben werden.



Abbildung 5.1.1: Lambdasonde Bosch LSU 4.9

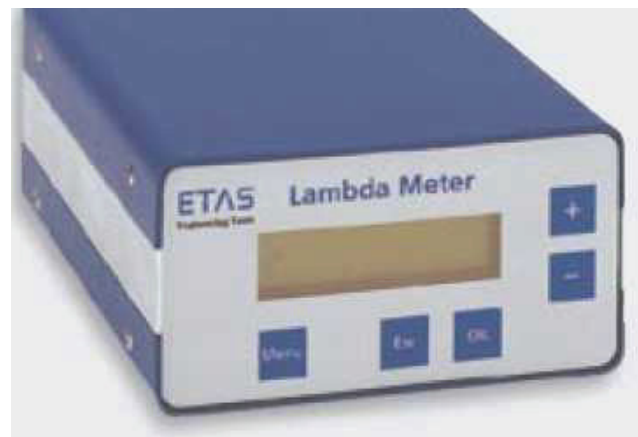


Abbildung 5.1.2: ETAS Lambda Meter LA4

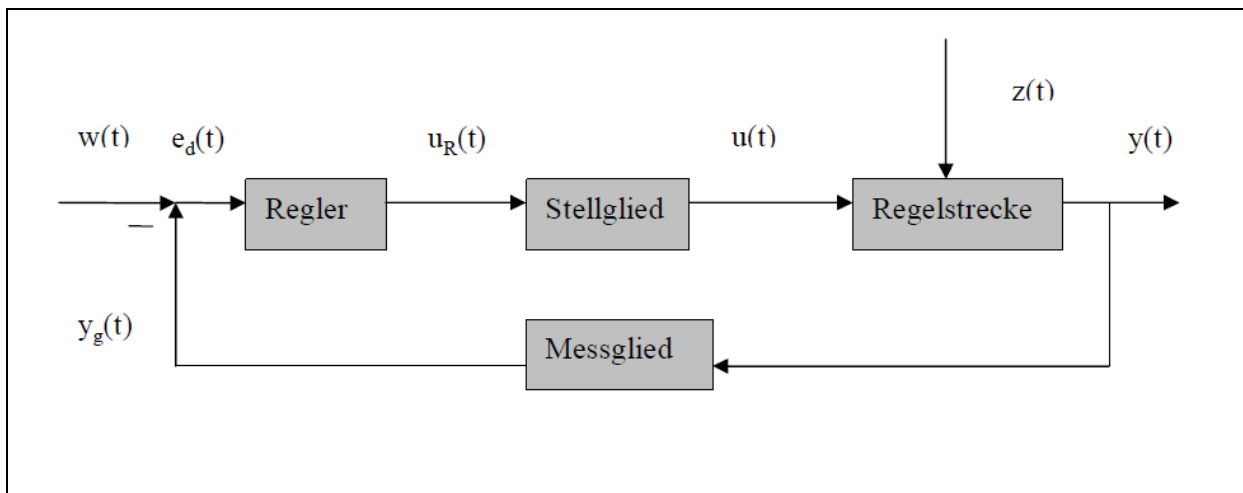
Die Breitbandlambdasonde LSU 4.9 von Bosch (s. Abb. 5.1.1) ist eine planare Zweizellen-Grenzstrom-Sonde. Sie besteht aus einer Nernst-Konzentrationszelle (Sensorzelle) und einer Pumpzelle, die die Sauerstoffionen transportiert. Durch diesen Aufbau ist sie im Gegensatz zu einfachen Lambdasonden (mit nur einer Sensorzelle) in der Lage, nicht nur im Bereich um  $\lambda = 1$  sondern in einem weiträumigeren Bereich von  $\lambda = 0,7$  bis etwa  $\lambda = 2,5$  direkte  $O_2$ -Messwerte zu liefern. Durch eine vergleichende Sauerstoffmessung, bei der der Sauerstoffgehalt der Außenluft mit dem Restsauerstoffgehalt im Abgas verglichen wird, ermittelt sie die Sauerstoffkonzentration im Abgas. Dazu befördert der Pumpstrom der Pumpzelle bei fettem Gemisch ( $\lambda < 1$ ) Sauerstoffionen in die Nernstzelle hinein und bei magerem Gemisch ( $\lambda > 1$ ) aus der Nernstzelle hinaus, so dass das Gemisch in der Nernstzelle stets bei  $\lambda = 1$  gehalten wird. Die Größe und das Vorzeichen des benötigten Pumpstroms sind dabei ein Maß für den Sauerstoffgehalt im Abgas.

Für den Testbetrieb ist die Lambdasonde mit einem dem Lambda Meter LA4 der Firma ETAS (s. Abb. 5.1.2) gekoppelt. Dabei handelt es sich um ein Präzisionsmessgerät zur Bestimmung von diversen Abgaswerten. Es besitzt einen umfangreichen Messbereich zur Ermittlung des Lambdawertes, des Luft/Kraftstoffverhältnisses und des Sauerstoffgehaltes. Neben der Ausgabe der Messwerte auf dem Display besteht die Möglichkeit eine der gemessenen Größen über einen parametrierbaren Analogausgang auszugeben. Darüber hinaus ist die Anpassung an unterschiedliche Kraftstoffe (H/C-, O/C-Verhältnis), an Luftdruck, Außentemperatur und Luftfeuchtigkeit möglich. Außerdem ist eine Kompensation für Sensordispersion oder -alterung vorgesehen. Der Analogausgang des ETAS kann mit einem analogen Eingangskanal des LabView-Systems verknüpft werden, welches die Regelung der Gebläse-Brenner-Kombination übernimmt (s. Kapitel 5.2), damit kann der gemessene  $O_2$ -Wert direkt angezeigt bzw. aufgezeichnet und weiterverarbeitet werden.

## 5.2 Entwicklung einer Regelstrategie für das Brennersystem

Eine Regelung beinhaltet einen geschlossenen Wirkungsablauf (Regelkette) mit Rückkopplung. Der vorgegebene physikalische Sollwert (Führungsgröße  $w(t)$ ) wird durch die Regelung erreicht und konstant gehalten. Die auftretenden Störungen (Störgröße  $z(t)$ ) werden durch die Rückkopplung ausgeglichen. In einem Regelkreis

werden wiederholend drei Aufgaben ausgeübt. Diese Aufgaben sind Messen, Vergleichen und Stellen. Die Aufgabe des Messens besteht darin, die Regelgröße zu erfassen. Beim Vergleichen wird die Regelgröße mit der Führungsgröße verglichen. Die Differenz zwischen der Führungsgröße und der Regelgröße wird als Regelabweichung bezeichnet. Beim Stellen wird die Stellgröße aus der Regelabweichung ermittelt. Dabei spielt die Dynamik der Regelstrecke eine wichtige Rolle. Die folgende Abb. 5.2.1 stellt diese Grundabläufe bei einer Regelung dar. Sie beinhaltet Regler, Stellglied, Regelstrecke, Messglied und Vergleichsstelle.



**Abbildung 5.2.1:** Schema der Regelstrecke

Bezogen auf die hier vorliegende Gebläse-Brenner-Kombination in einem Dampfreformersystem, besitzen die technischen Größen des Regelkreises die folgende Bedeutung:

Bezeichnung	Zeichen	Beschreibung
Führungsgröße	$w(t)$	$O_2$ -Sollwert
Regelgröße, gemessen	$y(t), y_g(t)$	$O_2$ -Istwert
Stellgröße (Stellglied)	$u(t)$	Gebläsedrehzahl
Stellsignal (Regler)	$u_R(t)$	Steuerspannung der Motorsteuerung
bleibende Regelabweichung	$e(t)$	$e(t) = w(t) - y(t)$
Regeldifferenz	$e_d(t)$	$e_d(t) = w(t) - y_g(t)$
Störgröße	$z(t)$	z.B. Brennstoffvariation, Anlagenverhalten usw.

Die Regelung bewirkt, dass die Regelgröße der Führungsgröße angepasst wird, d.h.  $y(t) = w(t)$ , in dem sie durch die Rückkopplung (Regelung) die Regelabweichung beseitigt. Um diese zu gewährleisten, bildet der Regler aus der Regeldifferenz  $e_d(t) = w(t) - y_g(t)$  das Stellsignal  $u_R(t)$ . Das Stellsignal  $u_R(t)$  beeinflusst die Regelstrecke über das Stellglied mit der Stellgröße  $u(t)$ . So soll die Differenz zwischen der Regelgröße  $y(t)$  und der Führungsgröße  $w(t)$  schnell und genau minimiert werden. Um die Regelung auszulegen ist ein Reglergesetz notwendig. Das wird mathematisch oder empirisch bestimmt. Typisch ist dabei der Einsatz eines PID-Reglers. Ein PID-Regler besteht aus drei Anteilen. Dabei entspricht das P-Glied dem wirkenden proportionalen Anteil, das I-Glied dem wirkenden integralen Anteil und das D-Glied dem wirkenden differentiellen Anteil des Reglers. Die Summe aus diesen drei Anteilen beschreibt die Stellgröße  $u_R(t)$  mit

$$u_R(t) = K_R \cdot e(t) + K_I \int_0^t e(T) dT + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Der P-Anteil der Stellgröße  $u_R(t)$  ist proportional zur Regelabweichung  $e(t)$ . Die Zeitdauer wird im I-Anteil erfasst. Das bedeutet, dass mit der Dauer der Regelabweichung, der I-Anteil an der Stellgröße wächst. Über den D-Anteil der Stellgröße fließt die Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung in den differentiellen Anteil der Stellgröße ein.

### 5.3 Validierung der Regelstrategie ohne Reformer

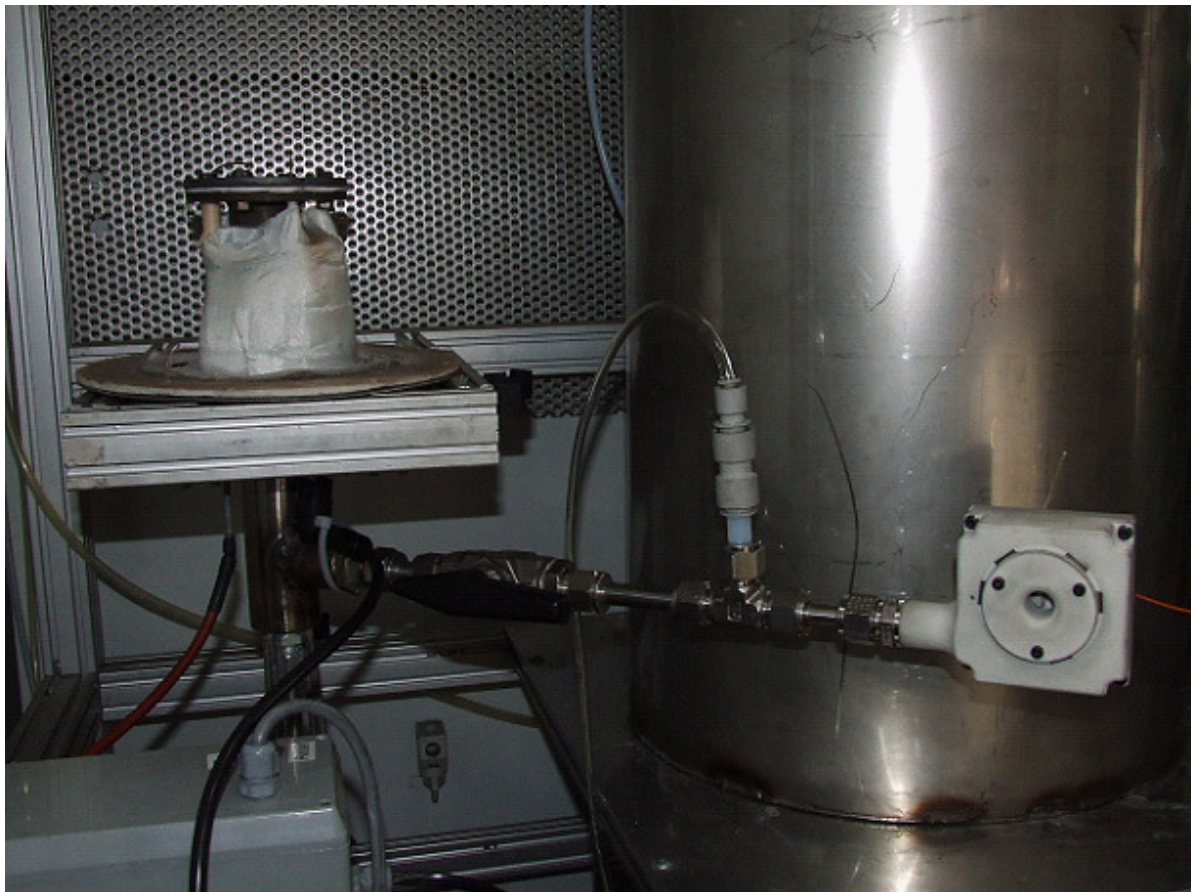
Die Ermittlung der Regelparameter erfolgte direkt nach dem Einbau der Gebläse-Brenner-Kombination in die reale Reformerumgebung mit Hilfe der Regelstrecke, die durch den Reformer gegeben ist. Dabei wurde auch die Regelstrategie erfolgreich validiert. Die Beschreibung der Messungen befindet sich in Kapitel 7.1.



## 6 Brenner-System

### 6.1 Fertigstellung eines Funktionsmusters der Gebläse-Brenner-Kombination

Um ein Funktionsmuster der Gebläse-Brenner-Kombination zu erhalten, wurde das mittels Rapid Prototyping hergestellte Gebläse der 3. Generation nun über Rohre mit dem Verbrennungsluftanschluss des vom GWI entwickelten Flächenbrenners verbunden. Zwischen den beiden Hauptkomponenten wurden eine Druckmessstelle und ein Nadelventil zum gezielten Einstellen der Betriebsparameter installiert. Dabei wurde darauf geachtet, den Strömungsquerschnitt vor und hinter der Druckmessstelle so wenig wie möglich zu reduzieren, um zusätzliche Druckverluste zu vermeiden. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, dass die Abmaße des Funktionsmusters der Gebläse-Brenner-Kombination eine leichte Integration in den Reformerteststand erlaubt.

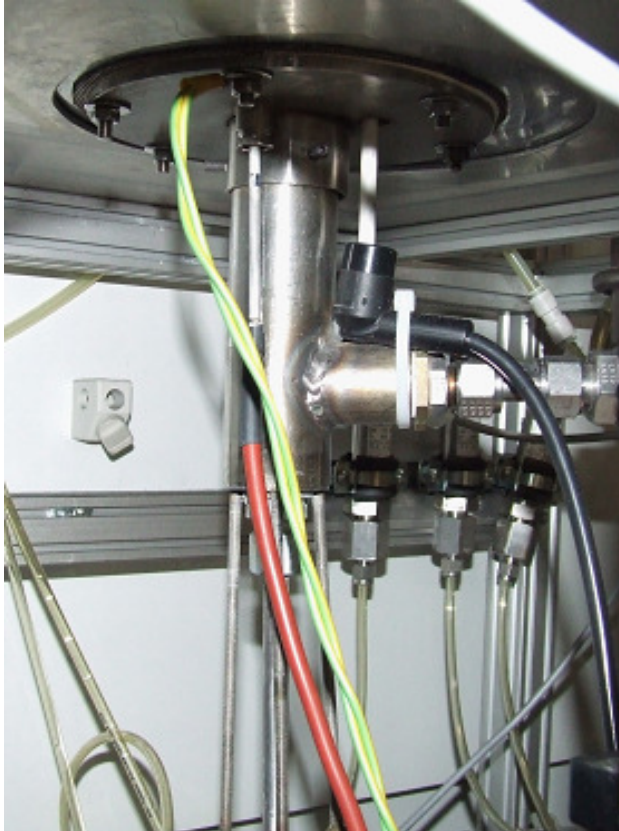


**Abbildung 6.1.1:** Funktionsmuster der Gebläse-Brenner-Kombination vor dem Reformereinbau

Abbildung 6.1.1 zeigt das Funktionsmuster der Gebläse-Brenner-Kombination im Teststand der UDE vor dem Einbau in den Reformier.

## 7 Brenner-System im Reformer

### 7.1 Einbau der Gebläse-Brennerkombination in den Reformer



**Abbildung 7.1.1:** Einbau der Gebläse-Brennerkombination in den Reformer

Da der Flächenbrenner ja bereits während der Untersuchungen zum Arbeitspaket 2 im Reformer betrieben wurde, verfügte das Funktionsmuster des Brenners bereits über einen passenden Flansch, der eine leichte Integration der Gebläse-Brennerkombination in die Brennkammer des Reformers erlaubt. Das Brennersystem wurde außerdem explizit auf eine gute Integrierbarkeit in den Teststand dimensioniert, weshalb keine weiteren baulichen Veränderungen am Reformerteststand notwendig wurden. Das Brennersystem wurde von unten in die Brennkammer des Reformers eingeführt, mit Hilfe von sechs

Schrauben befestigt und über eine Keramikkfaserdichtung gegen austretende Gase abgedichtet (s. Abb.7.1.1).

Bevor die eigentlichen Experimente durchgeführt werden konnten, musste außerdem die Verbrennungsluftregelung auf das Reformersystem angepasst werden. Zunächst wurde die Einstellmethode nach der Stabilitätsgrenze von Ziegler/Nichols getestet. Dazu wurde der PID-Regler im ersten Schritt als reiner P-Regler eingestellt, d.h. I- und D-Anteil werden außer Kraft gesetzt

( $T_n = \infty$ , und  $T_v = 0$ ). Dann

<b>Einstellregeln nach Ziegler/Nichols:</b>			
<b>Regler</b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>T_n</math></b>	<b><math>T_v</math></b>
<b>P</b>	$0,5 \cdot K_{p_{krit}}$		
<b>PI</b>	$0,45 \cdot K_{p_{krit}}$	$0,85 \cdot T_{krit}$	
<b>PID</b>	$0,6 \cdot K_{p_{krit}}$	$0,5 \cdot T_{krit}$	$0,12 \cdot T_{krit}$

**Tabelle 7.1.1:** PID-Reglereinstellung nach Ziegler/Nichols

wurde der P-Anteil, angefangen bei kleinen Werten, so lange vergrößert bis der geschlossene Regelkreis Dauerschwingungen ausführte. Der  $K_p$ -Wert des P-Anteils entspricht dabei  $K_{p_{krit}}$ . Nun wurde die Periodendauer der Dauerschwingung  $T_{krit}$  ermittelt und die Parameter des PID-Reglers mit Hilfe der Tab. 7.1.1 berechnet.

Die mit Hilfe dieser Methode ermittelten Parameter führten jedoch zu deutlichen Über- und Unterschwingern bei Lastwechseln und einem sehr unruhigen Regelverhalten in stationären Zuständen.

Bessere Resultate lieferte die Reglereinstellung über die Sprungantwort. Bei dieser Methode wird die Sprungantwort der Regelstrecke aufgenommen (siehe Abb. 7.1.2).

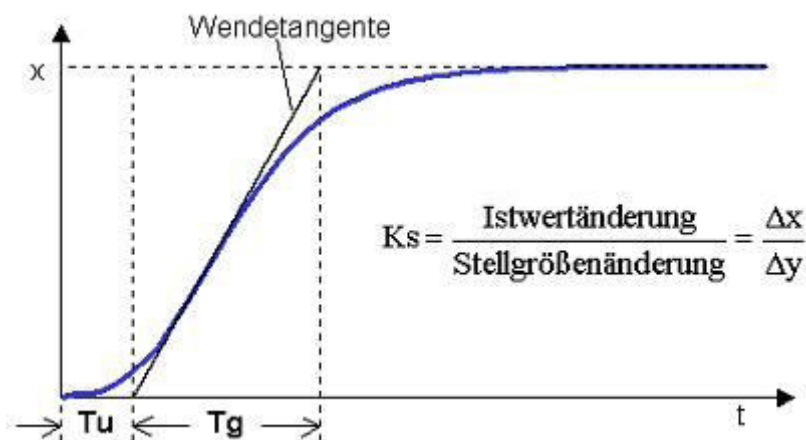


Abbildung 7.1.2: Reglereinstellung nach der Sprungantwort

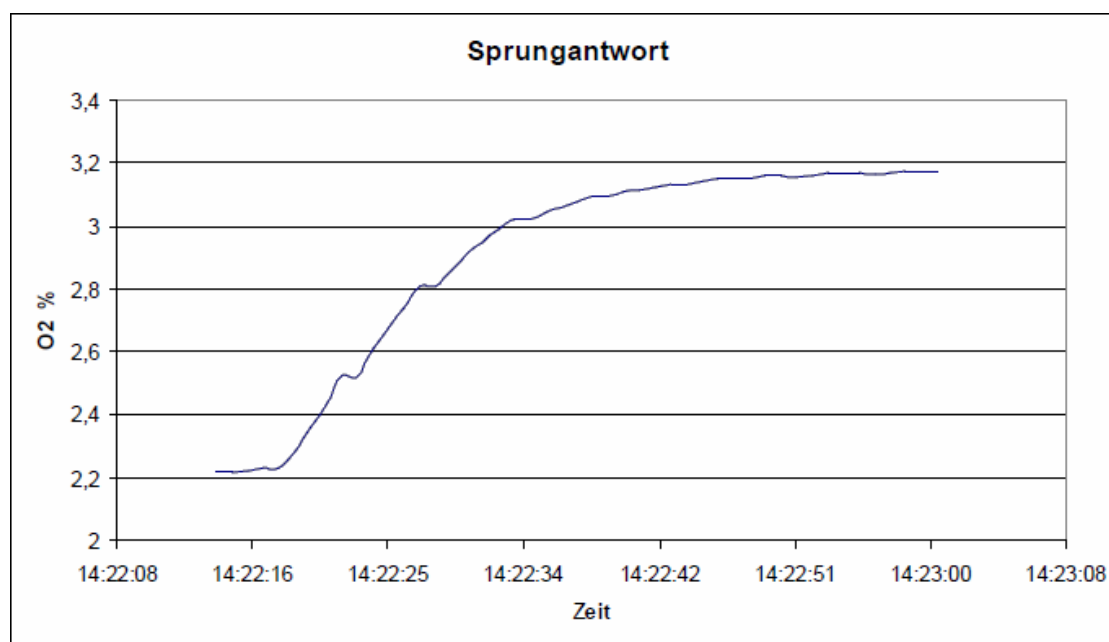


Abbildung 7.1.3: Sprungantwort des Gebläse-Brennersystems im Reformer

Der Regelkreis bleibt dabei geöffnet. In die graphisch dargestellte Sprungantwort wird die Wendetangente eingezeichnet. Dann werden die Verzugszeit  $T_u$  und die Ausgleichszeit  $T_g$  grafisch bestimmt. Anschließend werden die einzustellenden Reglerwerte mit Hilfe der Tab. 7.1.2 ermittelt. Dies kann entweder nach Ziegler/Nichols oder nach Chien/Hrones/Reswick geschehen. Die konkret gewählte Reglereinstellung ist in Tab. 7.1.3 zusammengestellt.

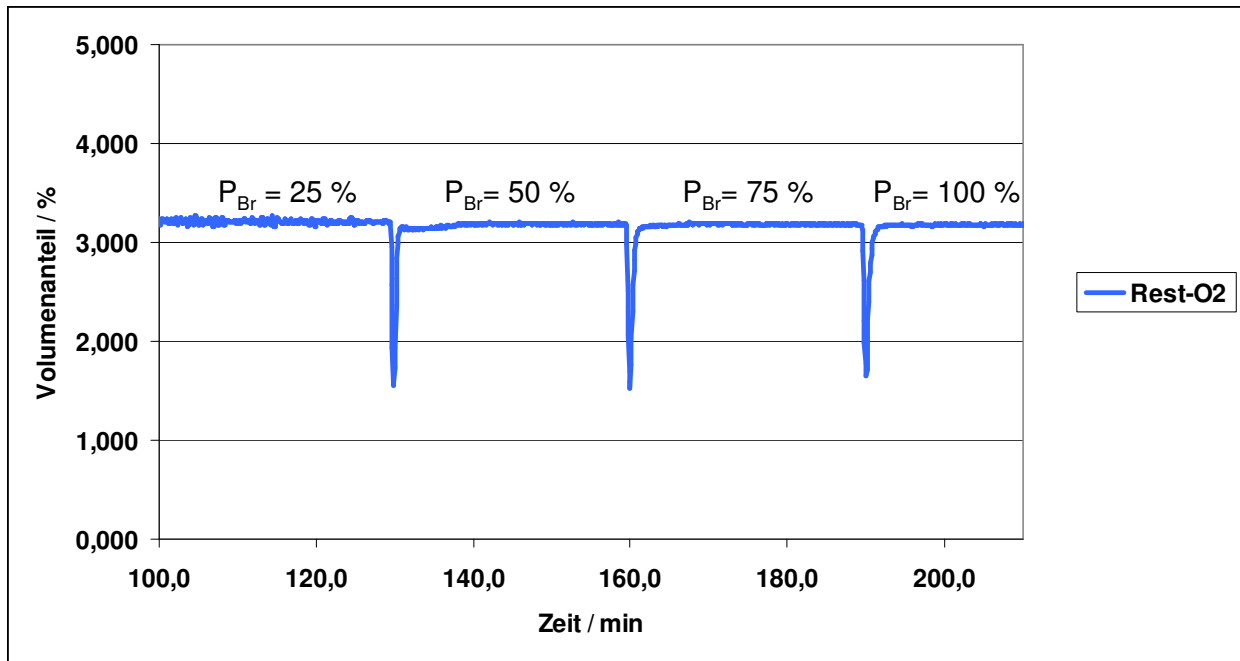
Einstellregeln nach Ziegler/Nichols:				Einstellregeln nach Chien/Hrones/Reswick		
Regler	$K_p$	$T_n$	$T_v$	$K_p$	$T_n$	$T_v$
P	$\frac{1}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$			$\frac{0,3}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$		
PI	$\frac{0,9}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$3,3 \cdot T_u$		$\frac{0,35}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$1,2 \cdot T_g$	
PID	$\frac{1,2}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$2 \cdot T_u$	$0,5 \cdot T_u$	$\frac{0,6}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$T_g$	$0,5 \cdot T_u$

**Tabelle 7.1.2:** PID-Parameter nach Ziegler/Nichols bzw. Chien/Hrones/Reswick

Einstellregeln nach Ziegler/Nichols:				Einstellregeln nach Chien/Hrones/Reswick		
Regler	$K_p = P$	$T_n = I$	$T_v = D$	$K_p = P$	$T_n = I$	$T_v = D$
PID	0,313	0,1667	0,0416	0,157	0,2	0,04166

**Tabelle 7.1.3:** Konkrete Regler-Parameter nach der Sprungantwortmethode

Die Versuche mit Parametern nach Ziegler/Nichols zeigten dabei ein sehr stabiles aber auch sehr träges Regelverhalten. Daher wurden für die Gebläse-Brenner-Kombinations-Versuche im Reformer die Einstellparameter nach Chien/Hrones/Reswick genutzt. Diese führten zwar zu einem unwesentlich unruhigeren Regelverhalten in stationären Breichen, ermöglichten aber auch schnelle Lastwechsel in weniger als 30 Sekunden ohne dass sich unterstöchiometrische Verbrennungsbedingungen einstellen. Der Restsauerstoffgehalt bei dem gewählten  $\lambda$  von 1,2 war auch während des Lastwechsels immer größer als 1 %, wie der Abb. 7.1.4 entnommen werden kann.



**Abbildung 7.1.4:** Restsauerstoffgehalt im Brennerabgas bei schnellen Lastwechseln (30 Sekunden)

## 7.2 Experimentelle Charakterisierung des Brenner-Systems im Reformier

Im Mittelpunkt der experimentellen Charakterisierung der Gebläse-Brenner-Kombination standen wie bei der Überprüfung der generellen Tauglichkeit des Brenners in Kapitel 4.2 die **Wärmeeinbringung** in den Reformier, die Qualität der Verbrennung und die damit verbundenen **Abgasemissionen** des Brenners sowie die **Modulierbarkeit** des Systems. Angeregt durch den projektbegleitenden Ausschuss wurden zusätzlich Versuche zum **Lastabwurf** bei Teil- und Vollast durchgeführt. Lastabwurf bedeutet, dass bei einem störungsbedingten, schnellen Abschalten der Brennstoffzelle des BZH der Wasserstoffverbrauch kurzfristig entfällt und dann das gesamte vom Reformier produzierte Reformatgas vom Brennersystem verarbeitet werden muss.

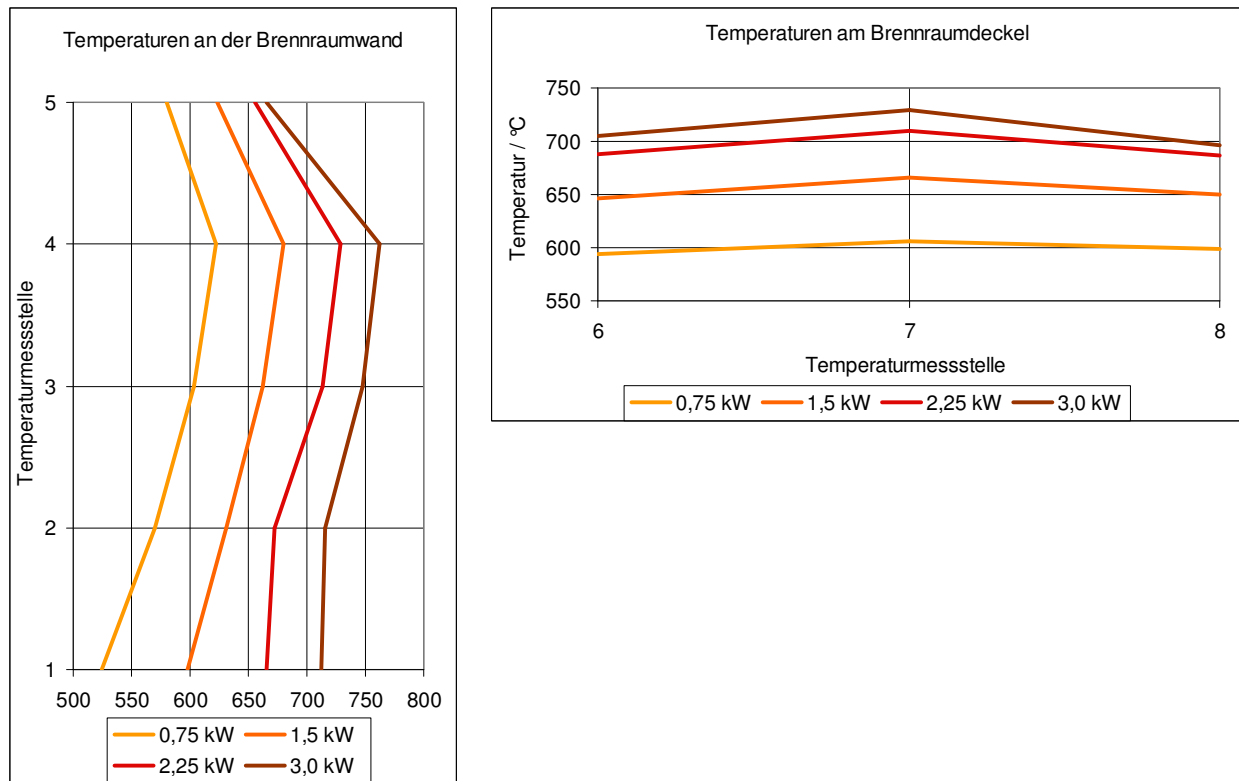
Um ein differenziertes Bild von der Eignung des Brennersystems zu erhalten, wurden die Versuche wieder mit verschiedenen Gaszusammensetzungen und Brennerleistungen durchgeführt. Die einzelnen Gasqualitäten entsprachen den simulierten Ergebnissen des Arbeitspaketes 1 für die Anodenrestgase (ARG) mit einer Fuel Utilisation (FU) von 60, 70 und 80 Prozent. Die Messpunkte für das Brennersystem entsprechen exakt den in der Tab. 3.4.1 zusammengestellten

12 Hauptmesspunkten für den Brenner im Reformer, um einerseits repräsentative Betriebsparameter zu verwenden und andererseits das Brennersystem, bestehend aus Flächenbrenner, Gebläse und Regelung mittels Lambda-Sonde Bosch LSU [Bos2001], mit den Messdaten des Brenner, versorgt durch die Mass Flow Controller der Laborumgebung, zu vergleichen. Die Verbrennungsgase wurden dem Brennersystem wieder vorgewärmt und mit einem repräsentativen Feuchtegehalt (Sättigung bei 40°C) zugeführt, um ein reales ARG zu simulieren. Sämtliche Versuche wurden wieder mit einem Luftverhältnis  $\lambda$  von 1,2 durchgeführt. Die Einstellung dieses stöchiometrischen Wertes hat sich in den Experimenten bewährt. Das Wasserdampf/Kohlenstoffverhältnis (S/C) wurde zu 3,4 eingestellt. Die Brennerleistung und die Reformerleistung wurden wiederum für jede Gaszusammensetzungen von 25 bis 100 Prozent variiert (s. Tab. 3.4.1).

Die Temperaturüberwachung des Reformers erfolgte auch in diesem Arbeitspaket mit Hilfe der sechs Einfach- und der zwei Fünffach-Thermoelemente, die an der Brennkammerwand und am Brennkammerdeckel angebracht wurden (s. Abb. 3.4.1).

Die Temperaturverteilung in der Brennkammer wird am Beispiel eines Anodenrestgases eines Brennstoffzellen-Umsatzgrades von 70 Prozent in Abbildung 7.2.1 dargestellt und beinhaltet vier unterschiedliche Leistungen. Auch in den hier dargestellten Versuchen mit Gebläse-Brenner-System stellten sich die Temperaturen im gleichen Bereich von ca. 600 bis 700 °C an den Brennkammerwänden und am Deckel ein, wie dies schon bei der Untersuchung des Brenners mit Versorgung durch die Laborinfrastruktur der Fall war. Die Abbildungen 3.4.2 und 7.2.1 unterscheiden sich nur unwesentlich. Die Wärmeeinbringung und die sich einstellenden Reformertemperaturen reichen in jedem Fall aus, um eine stabile Reformierung zu gewährleisten.

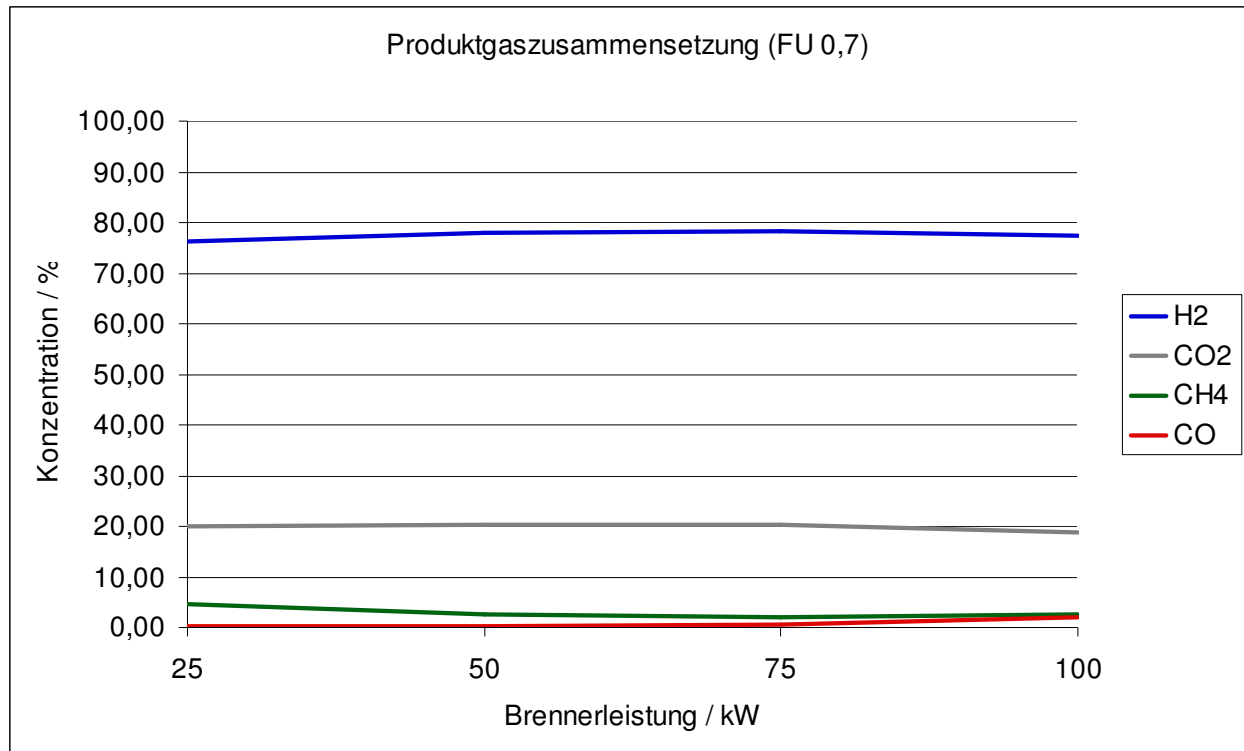
Die acht Versuche mit den Anodenrestgasen der Umsatzgrade von 60 % und 80 % lieferten ebenso vergleichbare Ergebnisse, die im Anhang dargestellt sind. Aufgrund der steigenden Verbrennungstemperatur bei steigendem Wasserstoffgehalt im Anodenrestgas ergeben sich auch in den Versuchen mit Gebläse-Brenner-Kombination leicht sinkende Brennraumtemperaturen mit steigendem Umsatzgrad der Brennstoffzelle, da dann weniger Wasserstoff im ARG verbleibt.



**Abbildung 7.2.1:** Temperaturverteilung an der Brennkammerwand und am Brennraumdeckel

Dass die in den Reformer eingebrachte Wärmeleistung für einen stabilen Reformierungsprozess ausreicht, lässt sich anhand der Zusammensetzung des Produktgases in Abb. 7.2.2 belegen. Diese Darstellung für das Brennersystem entspricht mit hoher Genauigkeit der Abb. 3.4.3 für den Brenner in Laborumgebung. Das Methan wird wieder bis auf einen Restgehalt von ca. 3 Volumen-Prozent in Wasserstoff und Kohlenmonoxid bzw. Kohlenstoffdioxid umgesetzt. Erfahrungsgemäß liegt der Restmethangehalt bei einem neuwertigen Katalysator bei dem hier gemessenen Temperaturprofil bei etwa 1 %. Der bei den Experimenten aufgetretene Restmethangehalt von etwa 3 % ist nicht auf eine mangelnde Wärmeeinbringung des Brennersystems zurückzuführen als vielmehr auf die bereits erfolgte Alterung des in der Reformerstufe eingesetzten Nickel-Katalysators.

Die dargestellte Produktgaszusammensetzung wurde für das Anodenrestgas bei einer Fuel Utilisation FU von 70 % gemessen. Die Messungen für die Brenngasausnutzungsgrade von 60 und 80 Prozent lieferten wieder nahezu identische Ergebnisse, so dass diese Messwerte hier nicht dargestellt sind.



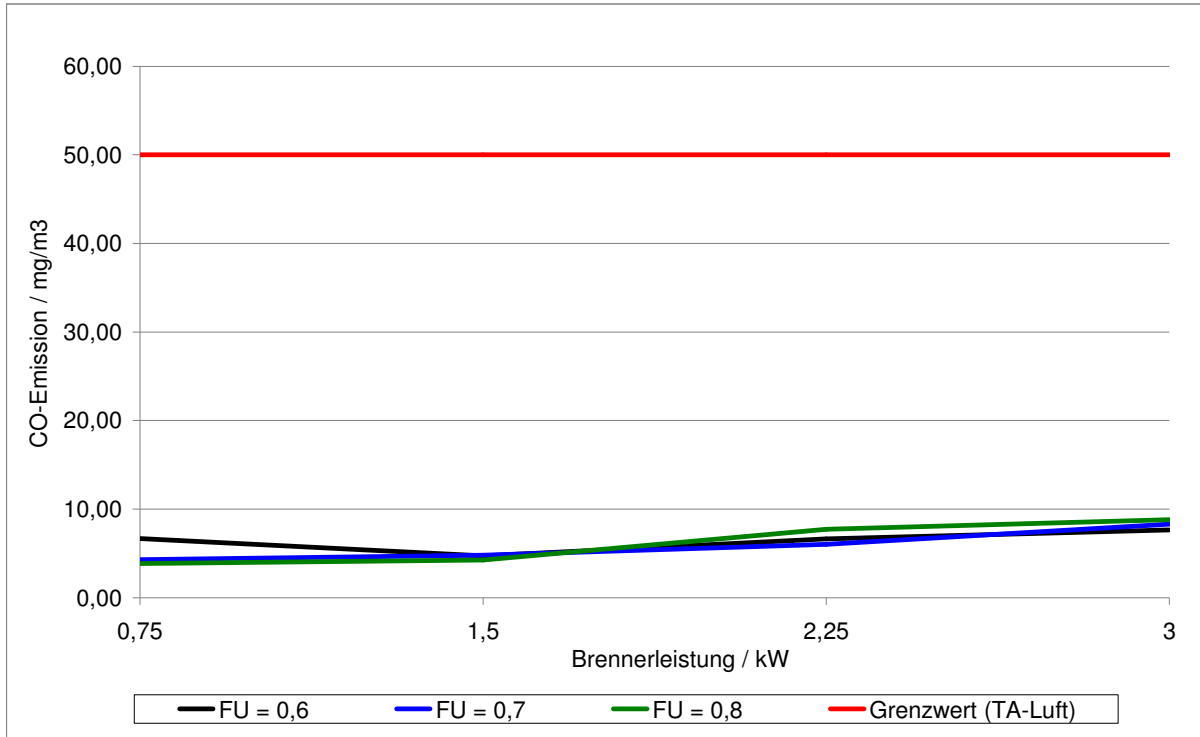
**Abbildung 7.2.2:** Produktgaszusammensetzung bei FU=0,7

Für eine Charakterisierung und abschließende Beurteilung der Gebläse-Brenner-Kombination spielen neben **Modulierbarkeit** und der **Wärmeeinbringung** in den Reformer vor allem die **Schadstoffemissionen** des Brenners die entscheidende Rolle. Wie schon in Kap. 3.4 ausgeführt, müssen sie in jedem Fall die gesetzlichen Vorgaben erfüllen und sollten die Werte aktueller und alternativer Anlagen für die Hausenergieversorgung, wie zum Beispiel Gas-Brennwertgeräte, möglichst nicht überschreiten bzw. sich in deren Größenordnung bewegen. Die folgenden Abbildungen 7.2.3 und 7.2.4 zeigen die volumenbezogenen, unmittelbaren Messwerte von CO und NO<sub>x</sub> in Abhängigkeit der Brennerleistung für die drei gewählten Brenngasausnutzungsgrade (FU). Wie die Abbildungen zeigen, werden wiederum die gesetzlichen Grenzwerte (hier nach TA Luft) eingehalten bzw. deutlich unterschritten.

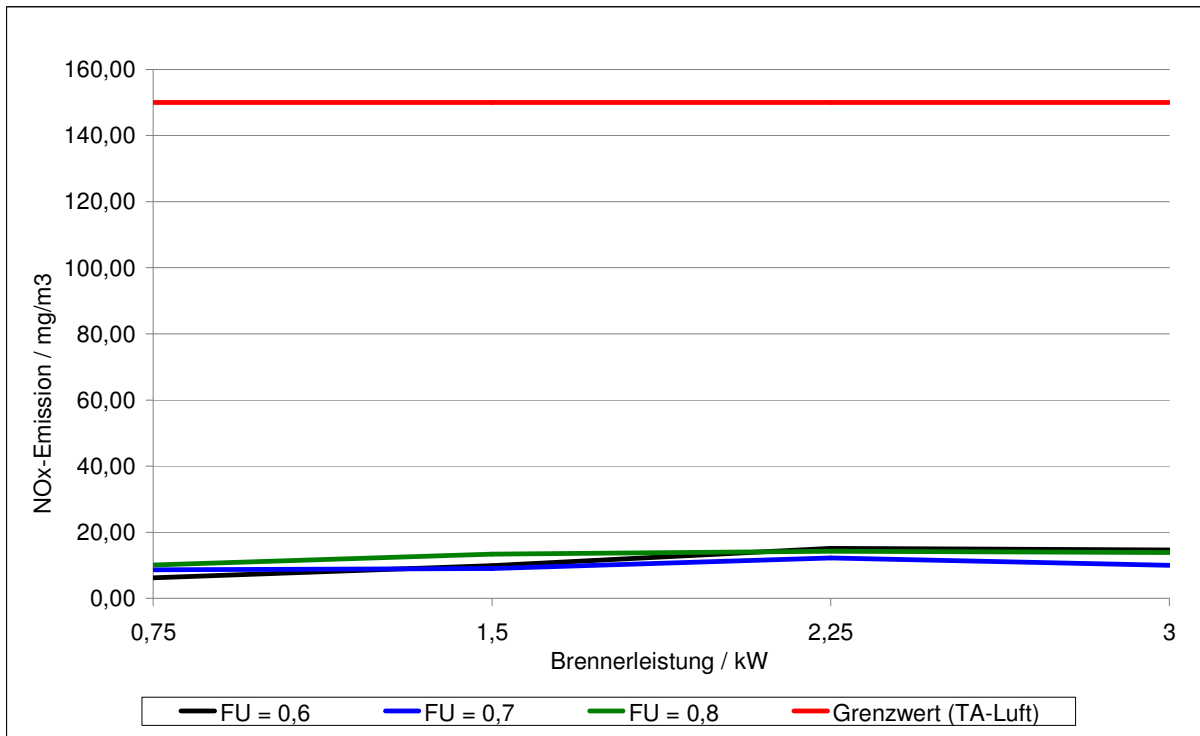
Die auf das Rauchgasvolumen bezogenen Messdaten wurden wieder nach der VDI-Richtlinie 4660 in brennstoffenergiebezogene Werte umgerechnet und in den beiden folgenden Abbildungen 7.2.5 und 7.2.6 ebenfalls als Funktion der Brennerleistung aufgetragen. Zusätzlich wurden gesetzliche Grenzwerte und die Werte aktueller Heizkessel zur Orientierung mit eingetragen. Auch bei dieser Form der Darstellung



wird deutlich, dass die Emissionswerte des im Projekt entwickelten Flächenbrenners erheblich unter den gesetzlichen Grenzwerten liegen.



**Abbildung 7.2.3:** Rauchgasvolumenbezogene CO-Emissionen mit Grenzwert nach TA Luft



**Abbildung 7.2.4:** Rauchgasvolumenbezogene NOx-Emissionen mit Grenzwert nach TA Luft

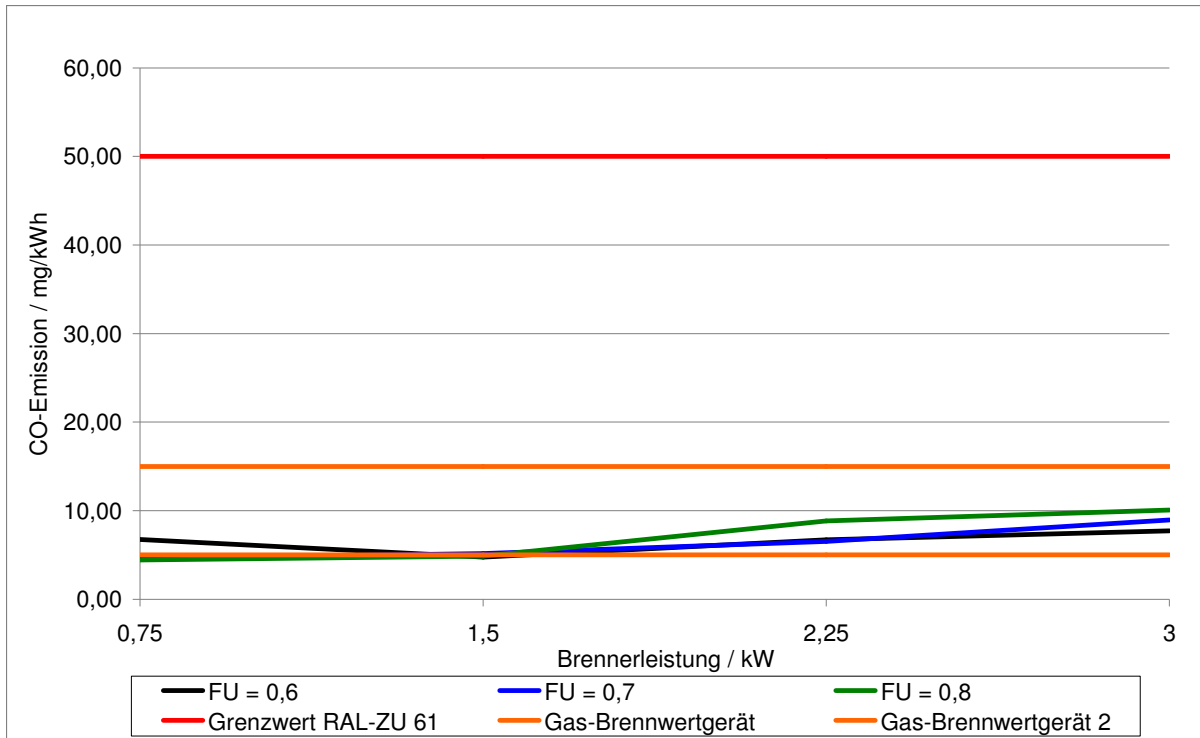


Abbildung 7.2.5: Brennstoffenergiebezogene CO-Emissionen mit Grenz- und Vergleichswerten

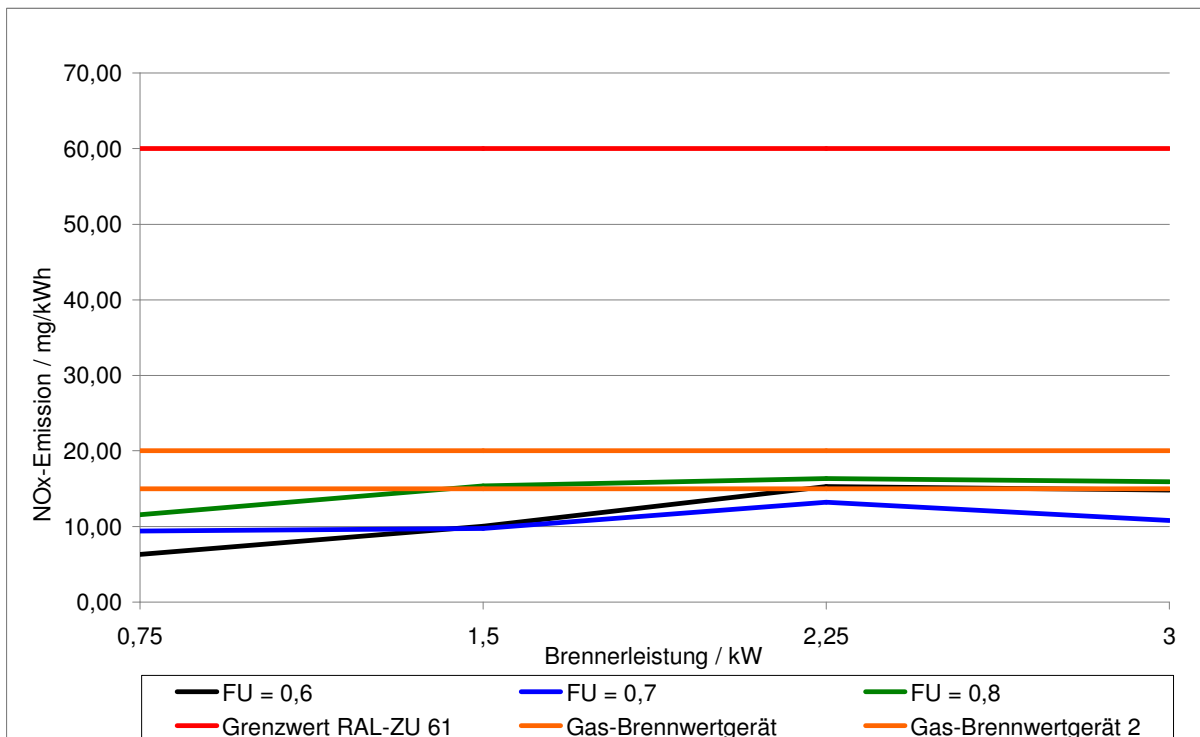


Abbildung 7.2.6: Brennstoffenergiebezogene NOx-Emissionen mit Grenz- und Vergleichswerten

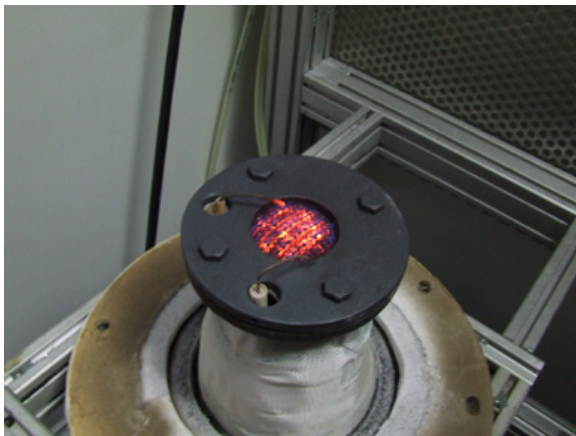
Der Vergleich mit modernen Heizkesseln wie z.B. Gas-Brennwertgeräten zeigt, dass die Schadstoffemissionen der Gebläse-Brenner-Kombination im Reformer ähnliche

Werte erreichen wie die aktueller Heizkessel (s. Tabelle 3.4.4 in Kapitel 3.4). Damit erfüllt das Brennersystem seine ursprünglich formulierten Anforderungen. Das Brennersystem erbringt eine thermische Leistung von 3 kW und ist in der Lage, die benötigte Wärme für den Reformerprozess zur Verfügung zu stellen. Die erforderliche Wärmeeinbringung in die Reformerstufe gelingt sehr gut, wie die gemessenen Temperaturprofile ausweisen. Die Schadgasemissionen bezüglich CO und NO<sub>x</sub> durch das Brennerrauchgas liegen dabei im Bereich moderner Heizkessel. Die ursprünglich im Projektantrag angestrebte Leistungsmodulation des Brenners von 1/10 musste und konnte jedoch noch nicht realisiert werden. Da der Reformer lediglich in einem Leistungsbereich von 25 Teillast bis 100 % Volllast stabil betrieben werden konnte und bei kleineren Leistungen durch Auskühlen der oberhalb der Reformerstufe befindlichen Shift-Stufe unzulässige Gasqualitäten mit zu hohen CO-Gehalten liefert, wurde ursprünglich der Brenner und später auch das Brennersystem (also reformerbedingt) lediglich mit einer Modulation von 1 zu 4 im Reformer bei den gewählten 12 Hauptmesspunkten betrieben.

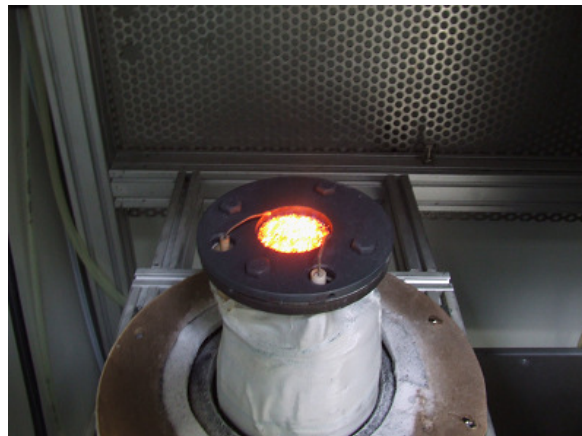
Zusätzlich zu den 12 stationären Hauptmesspunkten wurde nun noch weitere Versuche im Bereich der Lastwechsel und des Lastabwurfes durchgeführt. Der Lastabwurf bezeichnet in diesem Fall den Ausfall der Brennstoffzelle, z.B. weil das elektrische Netz nicht mehr zur Verfügung steht. Damit muss das Brennersystem das komplette, nicht umgesetzte Reformat umsetzen. Ein BZH kann auf diesen Lastfall reagieren, in dem es sofort abgeschaltet wird. Dies führt jedoch zu aufwendigen Abfahr- und bei Wiederherstellung der Last bzw. des Netzanschlusses auch zu aufwendigen Anfahrprozeduren. Daher ist es hilfreich, wenn für einen gewissen Zeitraum, der noch durch Experimente zu definieren ist, das gesamte Reformatgas über den Reformerbrenner umgesetzt werden kann. In diesem Zeitraum kann bei Wiederherstellung des Lastfalls das BZH sofort und ohne Anfahrprozedur wieder in den Normalbetrieb umgeschaltet werden.

Je nach aktuellem Leistungsbereich, in dem der Reformer und der Reformerbrenner gerade betrieben werden, kann ein solcher Lastabwurf entweder zu einem Flammenrückschlag im Brenner (bei Teillast) oder zu einer schnellen Überhitzung des Reformers (bei Volllast) führen. Um die Folgen eines solchen Lastabwurfs für das Reformersystem abschätzen zu können, wurden Versuche mit zwei verschiedenen Brennerlaststufen, bei 25 % Teillast und bei 100 % Volllast durchgeführt. Ein Lastabwurf bewirkt eine signifikante Veränderung der

Brenngaszusammensetzung. Der Wasserstoffanteil im Brenngas steigt erheblich an und führt zu einer deutlich erhöhten Flammausbreitungsgeschwindigkeit, wie der Tab. 2.3.1 entnommen werden kann. Dies kann bei niedriger Brennerlast aufgrund der dann auch niedrigen Strömungsgeschwindigkeit der Brenngase prinzipiell zu einem Flammenrückschlag im Brenner führen. Die folgende Abbildungen 7.2.7 zeigt den im Projekt entwickelten Flächenbrenner bei 25 % der Auslegungsleistung. Abbildung 7.2.8 zeigt den Flächenbrenner bei einer Brenngasqualität und Menge, die dem Lastabwurf bei 25 % entspricht und zwar jeweils im Teststand ohne Reformer (Freibrand). Es wird deutlich, dass die Flamme beim Lastabwurf wegen der steigenden Flammengeschwindigkeit in das Vlies wandert und es zum Glühen bringt. Ein Rückschlagen der Flamme unter das Vlies und eine Verbrennung des vorgemischten Brenngas-Luft-Gemisches unterhalb des als Flammensperre fungierenden Vlieses konnte nicht festgestellt werden.



**Abbildung 7.2.7:** 25 % Brennerleistung



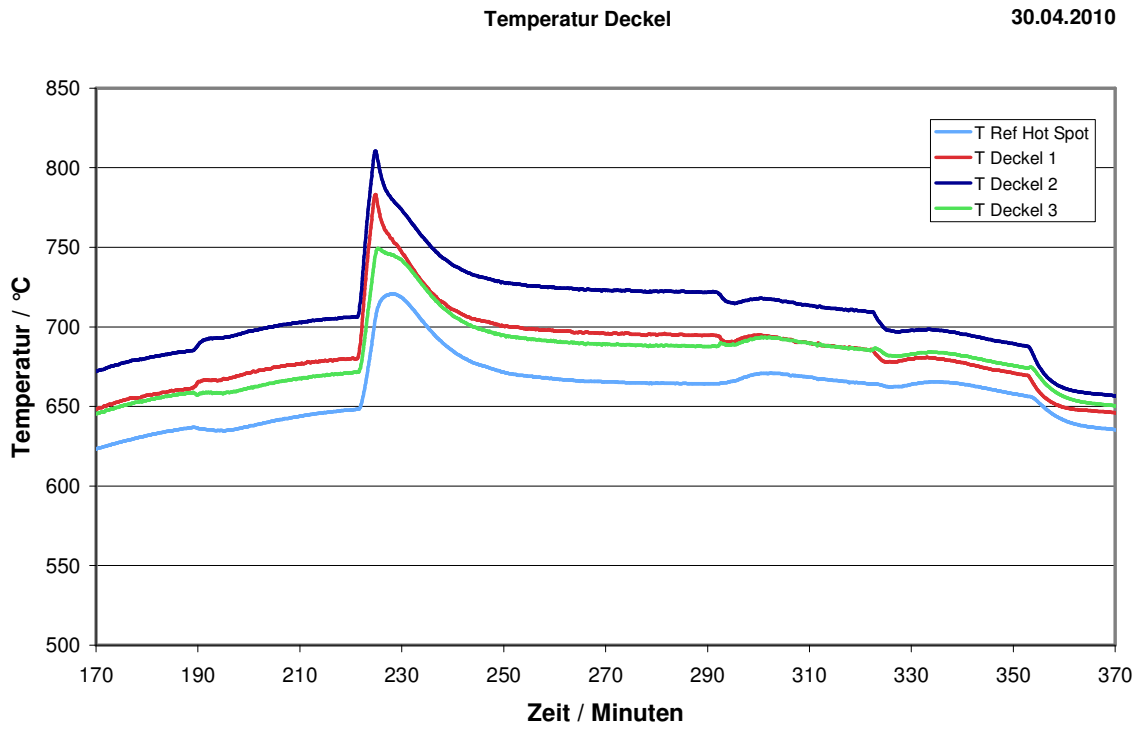
**Abbildung 7.2.8:** Lastabwurf ( $P_{BR}=25\%$ )

Im Freibrand ohne Reformer war es auch möglich, nachdem die Gasqualität wieder zu einem simulierten Anodenrestgas verändert wurde und damit quasi das BZH wieder seinen Betrieb aufnahm, das ursprüngliche Flammenbild wiederherzustellen. Ob dies bei 25 % Teillast im Reformerbetrieb ebenfalls möglich ist, konnte allerdings nicht abschließend geklärt werden. Da die Umgebungstemperaturen für den Brenner im Reformer deutlich höher sind als im hier dargestellten Freibrand kann die Flamme wegen der dann noch höheren Flammengeschwindigkeit gegebenenfalls doch zurückschlagen und so könnte es auch unterhalb des Vlieses zu einer Verbrennung kommen. Falls dies geschieht, gelangt aufgrund der Strömungsverhältnisse im Brenner die Flamme bei Wiedereinschalten der Brennstoffzelle nicht mehr oberhalb des Vlieses. Das System müsste abgeschaltet und neu gestartet werden. Da der

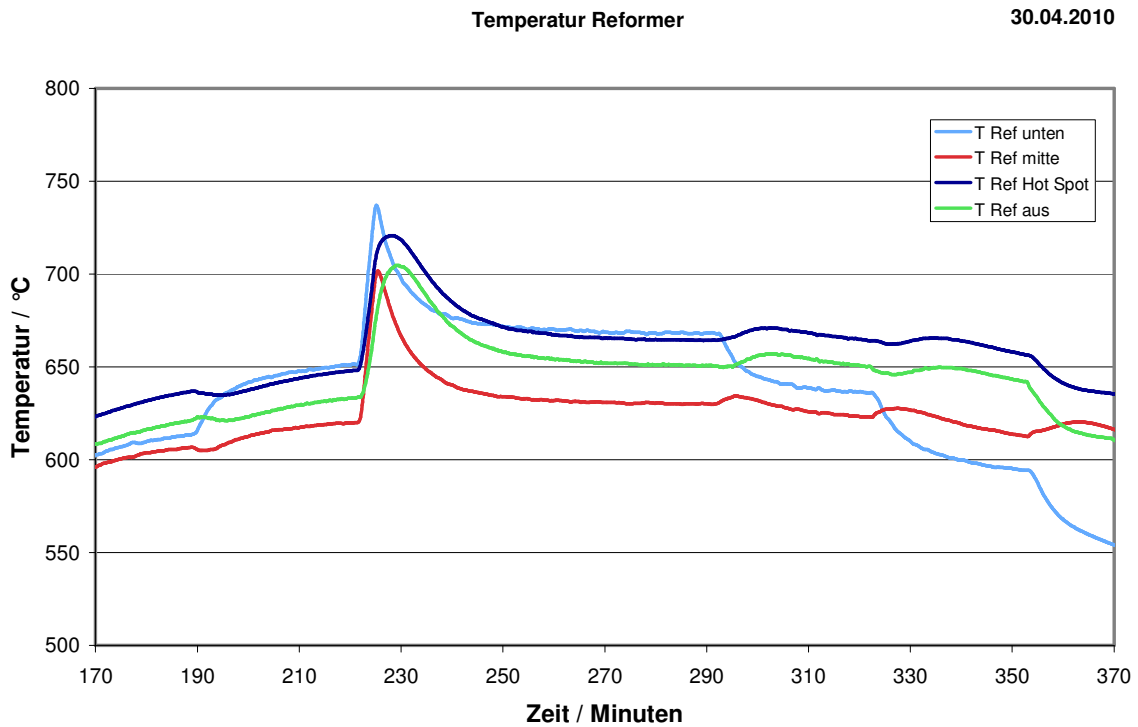
Flächenbrenner über keine Temperaturmessstelle unterhalb des Vlieses verfügt, die dann Rückschlüsse über die Position der Flamme zugelassen hätte, konnte der Lastabwurf bei einer Brennerleistung von 25 % leider nicht im Reformer getestet werden.

Liegt die aktuelle Reformer- bzw. Brennerleistung beim Lastabwurf allerdings bereits bei 100 % der Auslegungsleistung, so liegt die Gefahr des Lastabwurfes wegen der dann ausreichend hohen Strömungsgeschwindigkeiten nicht in einem möglichen Flammenrückschlag, sondern in einer Überhitzung des Reformersystems durch die stark ansteigende Brennerleistung. Erfahrungsgemäß sollte eine Materialtemperatur von 810 bis 850 °C nicht überschritten werden. Außerdem muss der Brenner dann bei einer thermischen Leistung betrieben werden, die etwa dem Doppelten seiner Auslegungsleistung entspricht (bei 6 kW anstelle von 3 kW). Abbildung 7.2.9 zeigt die Temperaturverteilung am Brennkammerdeckel und Abbildung 7.2.10 an der Reformerwand während eines solchen Experiments zum Lastabwurf. Die Brennerleistung wurde dabei zunächst schrittweise 100 % erhöht. Als die Temperaturen näherungsweise denen des stationären Betriebs entsprachen (aus Zeitgründen wurde hier anders als bei den Messungen im Kap. 2.4 und 7.2 nicht über mehrere Stunden ein Betriebspunkt eingestellt und das Einstellen eines konstanten Temperaturprofils abgewartet) wurde der Lastabwurf simuliert und die gesamte thermische Reformatgasleistung auf das Brennersystem geleitet. Nachdem für ca. 4 Minuten die vollständige Reformatgasmenge durch den Brenner umgesetzt wurde und in diesem Zeitraum die Temperaturen im Deckelbereich (bis etwa 810 °C) sowie auch an der Reformerwand deutlich angestiegen sind, wurde dann wieder auf den normalen Betrieb mit Anodenrestgas zurückgeschaltet. Ein Betrieb bei Lastabwurf von mehr als 5 Minuten würde also unweigerlich zu einer Überhitzung des Reformermaterials führen.

Mit Hilfe dieses Experiments konnte jedoch nachgewiesen werden, dass der Reformer einen kurzzeitigen Ausfall der Brennstoffzelle bis zu einigen Minuten unbeschadet überstehen kann. Bei länger andauernden Ausfällen des Netzes bzw. der Brennstoffzelle ist dann eine Abschaltung des Systems allerdings unumgänglich. Eine weitere wichtige Erkenntnis dieses Versuches ist die Tatsache, dass das Gebläse-Brenner-System in der Lage ist, auch das gesamte Reformatgasleistung erfolgreich zu verbrennen.

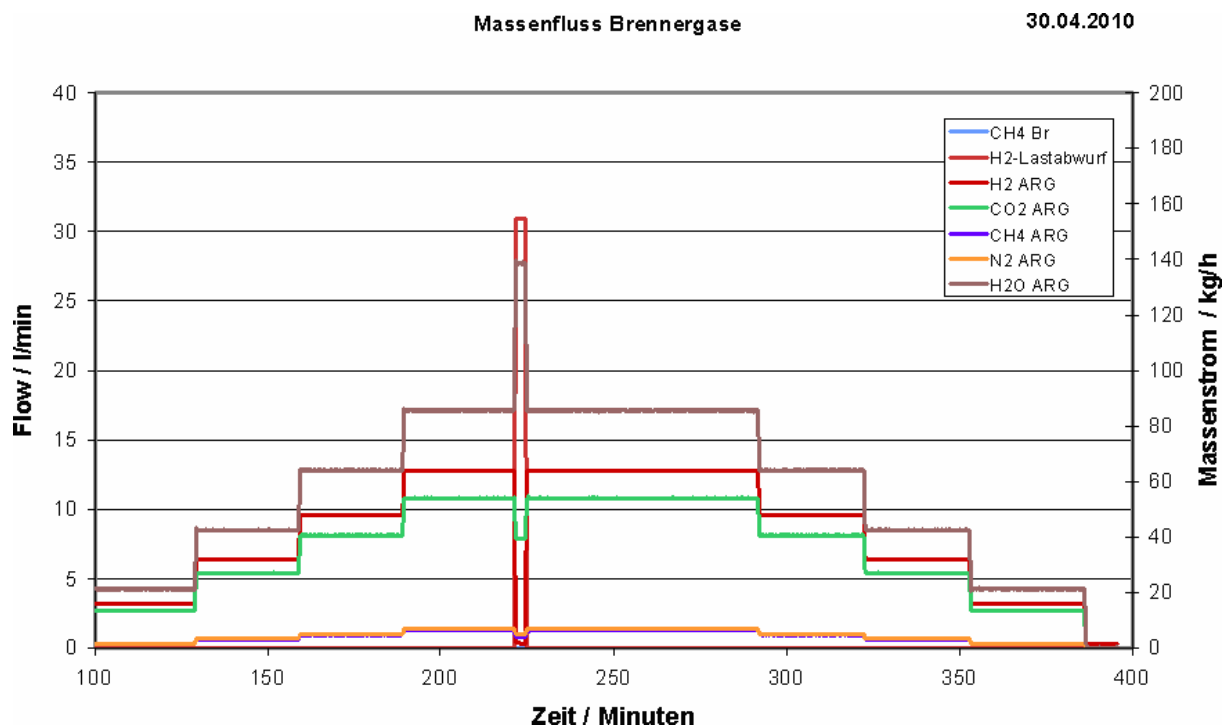


**Abbildung 7.2.9:** Temperaturverteilung beim Lastabwurf ( $P_{BR}=100\%$ ) am Brennkammerdeckel



**Abbildung 7.2.10:** Temperaturverteilung beim Lastabwurf ( $P_{BR}=100\%$ ) an der Reformerwand

Der abschließende Aspekt zur Charakterisierung des Gebläse-Brenner-Systems ist die Modularität und die Durchführung von Lastwechselvorgängen. Da die Versuche zum Standby-Verhalten mit einer Brennerleistung von 10 bis 15 Prozent zu einer Auskühlung der Reformer-Shiftstufen führten und daher eingestellt werden mussten, konnte durch die Experimente zum Lastabwurf der weite Modulationsbereich des Brennersystems nachgewiesen werden. Durch die 12 Hauptmesspunkte mit einer Brennerleistung von 25 bis 100 Prozent konnte aber bereits eine Modulation von 1 zu 4 erfolgreich dargestellt werden. Abbildung 7.2.11 zeigt die Brenngasvolumenströme eines Versuches, bei dem die vier Laststufen von 25 % bis zunächst 100 % eingestellt wurden. Die Lastwechsel erfolgen innerhalb von etwa einer Minute ohne Überschwingen. Bei 100 % Volllast wurde dann für 4 Minuten der Lastabwurf getestet und in diesem Zeitraum wurde das Brennersystem mit 200 % der eigentlichen Nennleistung erfolgreich betrieben.



**Abbildung 7.2.11:** Brenngasströme bei Lastwechseln (25 bis 100 %) und Lastabwurf bei 100 %

Durch den Lastabwurf bei 100 % der eigentlichen Auslegungsleistung des Brenners, der dann zu einer tatsächlichen Brennerleistung von 200 % führt, wurde erfolgreich auch eine Modulation von 1 zu 8 für das Brennersystem und insbesondere für das entwickelte Gebläse nachgewiesen.

### 7.3 Bewertung und Optimierung der Systemkette

Im Rahmen des Projektes wurden sämtliche im Projektantrag vorgesehenen Arbeitspakete bearbeitet. Das Ergebnis des Projektes ist das Funktionsmuster einer Gebläse-Brenner-Kombination, die nahezu allen Anforderungen, die im Antrag formuliert wurden, gerecht werden kann.

Der Brenner ist in der Lage sehr unterschiedliche **Brenngasqualitäten**, von reinem Methan (als Ersatz für Erdgas) über die je nach in der Brennstoffzelle eingestellten Umsatzgrad möglichen, diversen Anodenrestgase bis zum überaus wasserstoffreichen, reinen Reformatgas zu verbrennen.

Die nachgewiesene **Modulierbarkeit** der thermischen Leistung der Gebläse-Brenner-Kombination von 1 zu 8 bildet die im Projekt vorgefundenen Einsatzmöglichkeiten im Reformerbetrieb ab. Die Modulation des Reformers wurde durch die Reformer-Shiftstufe nach unten auf 25 % begrenzt. Die ursprünglich angestrebte Modulation von 1 zu 10 des Reformers konnte mit dem Brennersystem durch den Betriebsfall Lastabwurf zumindest näherungsweise realisiert werden. Ohne Reformer (im Freibrand) ist ein noch größerer Modulationsbereich des Brennersystems, insbesondere durch das Einstellen noch kleinerer Leistungen möglich.

Die **Schadstoffemissionen** liegen in allen Lastfällen weit unter den gesetzlichen und freiwilligen Richtlinien und sind vergleichbar mit modernen Alternativsystemen wie aktuellen Gas-Brennwertgeräten. In allen Lastfällen ist es dem Projektbrenner möglich, durch eine gleichmäßige und effiziente **Wärmeeinbringung** in den Reformer einen stabilen Reformierungsprozess zu gewährleisten, was durch Temperaturprofile des Reformers und Produktgasanalysen belegt werden konnte. Optimierungen und weitere Untersuchungen sind vor allem im Bereich der Lebensdauer, der Sicherheit [EN 676] und der Kosten denkbar. Insbesondere das für die Oberfläche eingesetzte Vlies muss noch hinsichtlich der erreichbaren Lebensdauer im Reformerbetrieb untersucht werden. Da das Material insbesondere bei niedrigen Laststufen stark (thermisch) beansprucht wurde, ist gegebenenfalls auch der Ersatz des Metallfaservlieses durch keramische Vliese zu erwägen.



## 8 Nutzen der Forschungsergebnisse

### 8.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Die aktuelle Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserstofferzeugung zeigt einen deutlichen Trend in Richtung kleinerer Anlagen für die dezentrale Bereitstellung dieses Zukunftsenergieträgers. Aktuell angebotene bzw. in der Entwicklung befindliche Systeme in diesem Leistungsbereich ermöglichen jedoch in der Regel nur eine sehr geringe Leistungsspreizung und eine eingeschränkte Dynamik. Das Potenzial dieser Technologie kann somit nicht voll ausgeschöpft werden. Aus Gesprächen mit Herstellern sowie mit potenziellen Betreibern von Wasserstofferzeugungssystemen ist bekannt, dass gerade diese Kriterien ein Hindernis für die Markteinführung darstellen. Die Entwicklungsergebnisse aus diesem Vorhaben tragen maßgeblich dazu bei, die Chancen der Markteinführung zu steigern, denn einerseits wird durch die hohe Modulierbarkeit der Anlagenkomponenten die mögliche Leistungsspreizung des Systems vergrößert und andererseits wird durch eine angepasste Regelstrategie das Zusammenspiel dieser Komponenten mit dem Reformer optimiert und somit die Dynamik des Gesamtsystems erhöht. Diese Verbesserungen können in allen Bereichen der dezentralen Wasserstofferzeugung genutzt werden. Besonders wirkungsvoll treten diese Vorteile bei der Anwendung in Brennstoffzellenheizgeräten zur Energieversorgung von Einfamilienhäusern durch die so genannte Kraft-Wärme-Kopplung in Erscheinung, da hier der Trend bedingt durch die Energieeinsparverordnung ebenfalls zu immer niedrigeren Grundlasten geht (Niedrigenergiehaus) und eine weite Leistungsmodulation unerlässlich ist.

Zusätzlich ist eine Nutzung einzelner Komponenten und Erfahrungen aus dieser Forschungsarbeit in anderen, artverwandten Bereichen der Technik denkbar. Die aufgezeigte Methodik der Entwicklungsarbeiten zur Erweiterung des Leistungsbereiches kann beispielsweise in der konventionellen Heiztechnik angewendet werden. Auch hier sind die erzielbaren Vorteile Erhöhung der Einsatzbereitschaft, Verlängerung der Lebensdauer und Verringerung der Schadstoffemissionen von besonderem Interesse. Hoch modulierbare Gebläse sind hier direkt einsetzbar. Des Weiteren kann der Einsatz der multigaskompatiblen Brennerstrecke inklusive der Sensorik und der Regelung leicht auf andere

Anwendungsbereiche übertragen werden. Eine mögliche Anwendung ist die Verbrennung von Sondergasen wie z.B. Bio-, Gruben- oder Deponiegas.

Die angestrebten Forschungsergebnisse werden voraussichtlich in den folgenden Fachgebieten und Wirtschaftszweigen Erfolg versprechende Verwendung finden:

Fachgebiete: Verfahrenstechnik;

Umwelttechnik;

Elektrotechnik, Mikrosystemtechnik, Medizintechnik;

Mess-, Regel, Automatisierungstechnik;

Informations- und Kommunikationstechnik

Wirtschaftszweige: (27/28) Metallherzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallzeugnissen;

(29) Maschinenbau;

(30/31/32/33) Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräte,

Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik;

(40/41) Energie- und Wasserversorgung

## 8.2 Wirtschaftlicher Nutzen für KMU

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfordern einen hohen Kapitalaufwand, der im Allgemeinen nur von großen Unternehmen aufgebracht werden kann. Kleine und mittelständische Unternehmen (kmU) sind in ihrem Entwicklungspotential hingegen eingeschränkt. Die Methodik der Entwicklung einer hoch modulierenden, emissionsarmen Gebläse-Brenner-Kombination wird durch dieses Projekt kleinen und mittelständischen Unternehmen zugänglich gemacht und so der Entwicklungsaufwand einer Reformbeheizung für die potentiellen Hersteller deutlich reduziert. Die erweiterte Modularität und die damit verbundene gesteigerte Effizienz und erhöhte Lebensdauer des Gesamtsystems stellt ein positives Marketing-Argument dar, welches die bereits heute erwarteten hohen Produktionszahlen weiter steigern kann. Daneben können kleine und mittelständische Unternehmen aus dem Bereich der Herstellung von Gebläsen und

Brennern als Zulieferer von Reformersystemen ihre Produktpalette erweitern und ihre Wettbewerbschancen auch in der konventionellen Heiztechnik deutlich erhöhen.

## 9 Plan zum Ergebnistransfer

	Zeitraum/ Termin	Maßnahme	Ziel/Bemerkung
Während der Projektlaufzeit 01.08.2008-31.07.2010	jährlich	Beratung des projektbegleitenden Ausschusses (PbA)	Letztes Meeting Jul. 2010
	jährlich	Tätigkeitsbericht in der Zeitschrift GASWÄRME International	Bericht über den Fortschritt öffentlich geförderter Projekte am Gaswärme-Institut e.V. Essen
	2010	Abschlussbericht	Zusammenstellung der Ergebnisse und Bereitstellung für PbA
Nach Abschluss des Projektes	2010	Homepage des GWI <a href="http://www.gwi-essen.de/">http://www.gwi-essen.de/</a>	Abschlussbericht
	2010	Veröffentlichung in Fachzeitschriften GASWÄRME International, GWF	Vorstellung der erzielten Ergebnisse

## 10 Schutzrechte

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden keine Schutzrechte erworben.

## 11 Danksagung

Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle bei den Projektpartnern, durch deren Mitarbeit das Projekt erfolgreich durchgeführt werden konnte. Der Dank gilt auch der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die finanzielle Unterstützung durch Haushaltsmittel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

## 12 Literaturverzeichnis

- [Bra2005] H. Brandt, A. Heinzl, J. Roes  
*Increasing the electric efficiency of a fuel cell system by recirculating the anodic offgas*  
Journal of Power Sources, 145:312–318, 2005
- [Mat2003] J. Mathiak  
*Verfahrensanalyse zur dezentralen Hausenergieversorgung auf Basis von PEM-Brennstoffzellen*  
Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2003
- [VDI4660] Verein Deutscher Ingenieure  
*Umrechnung spezifischer Emissionen bei der Energieumwandlung*  
VDI-Richtlinie 4660, Blatt 1, VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2000
- [ECO2005] ECO PHYSICS AG  
*Messprinzip Stickoxiddmessung*  
[http://www.ecophysics.de/products/ecophysics/meas\\_principle.htm](http://www.ecophysics.de/products/ecophysics/meas_principle.htm)  
ECO PHYSICS GmbH, München, 2005
- [ABB2001] ABB Automation Products GmbH  
Betriebsanleitung Advance Optima, Modulares Prozessanalytensystem  
ABB Asea Brown Boveri Ltd, Zürich, Switzerland, 2001
- [Die2006] S. Diezinger  
Mehrstofffähige Brenner auf Basis der Porenbrennertechnik für den Einsatz in Brennstoffzellensystemen  
Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2006
- [Wue2006] J. Wüning  
FLOX - flameless combustion  
Thermoprocess Symposium, 2003
- [BlmSchV] 1. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Fassung von 2001
- [TAL2002] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
*Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft)*  
Carl Heymanns Verlag KG, Köln, 2002
- [RAL-UZ] RAL gGmbH und Umweltbundesamt  
Umweltzeichen Blauer Engel  
[www.blauer-engel.de](http://www.blauer-engel.de), Sankt Augustin, 2009
- [War1997] J. Warnatz, U. Maas, R.W. Dibble  
*Verbrennung*  
2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1997
- [EN 676] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Herausgeber)  
Automatische Brenner mit Gebläse für gasförmige Brennstoffe  
Deutsche Fassung EN 676, Berlin, 2003
- [EN50465] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Herausgeber)  
Brennstoffzellengasheizgeräte mit einer Nennwärmebelastung kleiner

oder gleich 70 kW  
Deutsche Fassung DIN EN 50465, Berlin, 2009

[Fis1986] W. Fister  
Fluidenergiemaschinen  
ISBN 3-540-15478-7, Springer Verlag, Berlin, 1986

[Bos2001] Robert Bosch GmbH  
Technische Kundenunterlagen Bosch Lambda-Sonde LSU 4.9  
Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 2001

## A Anhang

In den folgenden Tabellen 1 bis 30 sind die Volumenströme bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen für die Verbrennungsluft sowie für das Brenngas (Methan und Anodenrestgas) in Abhängigkeit von der Leistung und der Luftzahl aufgeführt.

Tabelle 1: $Q$ (kW) = 0,3 $\lambda$ = 1,1		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	4,5748	0,2745	0,0000	0,0000	2,8082	0,1685
10	90	4,6426	0,2786	0,0501	0,0030	2,5274	0,1516
20	80	4,7105	0,2826	0,1003	0,0060	2,2466	0,1348
30	70	4,7784	0,2867	0,1504	0,0090	1,9658	0,1179
40	60	4,8462	0,2908	0,2006	0,0120	1,6849	0,1011
50	50	4,9141	0,2948	0,2507	0,0150	1,4041	0,0842
60	40	4,9820	0,2989	0,3009	0,0181	1,1233	0,0674
70	30	5,0498	0,3030	0,3510	0,0211	0,8425	0,0505
80	20	5,1177	0,3071	0,4012	0,0241	0,5616	0,0337
90	10	5,1856	0,3111	0,4513	0,0271	0,2808	0,0168
100	0	5,2535	0,3152	0,5015	0,0301	0,0000	0,0000

Tabelle 2: $Q$ (kW) = 0,3 $\lambda$ = 1,2		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	4,9906	0,2994	0,0000	0,0000	2,8082	0,1685
10	90	5,0647	0,3039	0,0501	0,0030	2,5274	0,1516
20	80	5,1387	0,3083	0,1003	0,0060	2,2466	0,1348
30	70	5,2128	0,3128	0,1504	0,0090	1,9658	0,1179
40	60	5,2868	0,3172	0,2006	0,0120	1,6849	0,1011
50	50	5,3608	0,3217	0,2507	0,0150	1,4041	0,0842
60	40	5,4349	0,3261	0,3009	0,0181	1,1233	0,0674
70	30	5,5089	0,3305	0,3510	0,0211	0,8425	0,0505
80	20	5,5830	0,3350	0,4012	0,0241	0,5616	0,0337
90	10	5,6570	0,3394	0,4513	0,0271	0,2808	0,0168
100	0	5,7310	0,3439	0,5015	0,0301	0,0000	0,0000

Tabelle 3: $Q$ (kW) = 0,3 $\lambda$ = 1,3		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	5,4065	0,3244	0,0000	0,0000	2,8082	0,1685
10	90	5,4867	0,3292	0,0501	0,0030	2,5274	0,1516
20	80	5,5670	0,3340	0,1003	0,0060	2,2466	0,1348
30	70	5,6472	0,3388	0,1504	0,0090	1,9658	0,1179
40	60	5,7274	0,3436	0,2006	0,0120	1,6849	0,1011
50	50	5,8076	0,3485	0,2507	0,0150	1,4041	0,0842
60	40	5,8878	0,3533	0,3009	0,0181	1,1233	0,0674
70	30	5,9680	0,3581	0,3510	0,0211	0,8425	0,0505
80	20	6,0482	0,3629	0,4012	0,0241	0,5616	0,0337
90	10	6,1284	0,3677	0,4513	0,0271	0,2808	0,0168
100	0	6,2086	0,3725	0,5015	0,0301	0,0000	0,0000

Tabelle 4: $Q$ (kW) = 0,6 $\lambda$ = 1,1		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol. Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	9,1495	0,5490	0,0000	0,0000	5,6165	0,3370
10	90	9,2853	0,5571	0,1003	0,0060	5,0548	0,3033
20	80	9,4210	0,5653	0,2006	0,0120	4,4932	0,2696
30	70	9,5567	0,5734	0,3009	0,0181	3,9315	0,2359
40	60	9,6925	0,5815	0,4012	0,0241	3,3699	0,2022
50	50	9,8282	0,5897	0,5015	0,0301	2,8082	0,1685
60	40	9,9640	0,5978	0,6018	0,0361	2,2466	0,1348
70	30	10,0997	0,6060	0,7021	0,0421	1,6849	0,1011
80	20	10,2354	0,6141	0,8023	0,0481	1,1233	0,0674
90	10	10,3712	0,6223	0,9026	0,0542	0,5616	0,0337
100	0	10,5069	0,6304	1,0029	0,0602	0,0000	0,0000

Tabelle 5: $Q$ (kW) = 0,6 $\lambda$ = 1,2		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol. Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	9,9813	0,5989	0,0000	0,0000	5,6165	0,3370
10	90	10,1294	0,6078	0,1003	0,0060	5,0548	0,3033
20	80	10,2775	0,6166	0,2006	0,0120	4,4932	0,2696
30	70	10,4255	0,6255	0,3009	0,0181	3,9315	0,2359
40	60	10,5736	0,6344	0,4012	0,0241	3,3699	0,2022
50	50	10,7217	0,6433	0,5015	0,0301	2,8082	0,1685
60	40	10,8698	0,6522	0,6018	0,0361	2,2466	0,1348
70	30	11,0178	0,6611	0,7021	0,0421	1,6849	0,1011
80	20	11,1659	0,6700	0,8023	0,0481	1,1233	0,0674
90	10	11,3140	0,6788	0,9026	0,0542	0,5616	0,0337
100	0	11,4621	0,6877	1,0029	0,0602	0,0000	0,0000

Tabelle 6: $Q$ (kW) = 0,6 $\lambda$ = 1,3		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol. Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	10,8131	0,6488	0,0000	0,0000	5,6165	0,3370
10	90	10,9735	0,6584	0,1003	0,0060	5,0548	0,3033
20	80	11,1339	0,6680	0,2006	0,0120	4,4932	0,2696
30	70	11,2943	0,6777	0,3009	0,0181	3,9315	0,2359
40	60	11,4547	0,6873	0,4012	0,0241	3,3699	0,2022
50	50	11,6152	0,6969	0,5015	0,0301	2,8082	0,1685
60	40	11,7756	0,7065	0,6018	0,0361	2,2466	0,1348
70	30	11,9360	0,7162	0,7021	0,0421	1,6849	0,1011
80	20	12,0964	0,7258	0,8023	0,0481	1,1233	0,0674
90	10	12,2568	0,7354	0,9026	0,0542	0,5616	0,0337
100	0	12,4173	0,7450	1,0029	0,0602	0,0000	0,0000



Tabelle 7: $Q$ (kW) =		0,9					
$\lambda$ =		1,1					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	13,7243	0,8235	0,0000	0,0000	8,4247	0,5055
10	90	13,9279	0,8357	0,1504	0,0090	7,5823	0,4549
20	80	14,1315	0,8479	0,3009	0,0181	6,7398	0,4044
30	70	14,3351	0,8601	0,4513	0,0271	5,8973	0,3538
40	60	14,5387	0,8723	0,6018	0,0361	5,0548	0,3033
50	50	14,7423	0,8845	0,7522	0,0451	4,2124	0,2527
60	40	14,9459	0,8968	0,9026	0,0542	3,3699	0,2022
70	30	15,1495	0,9090	1,0531	0,0632	2,5274	0,1516
80	20	15,3531	0,9212	1,2035	0,0722	1,6849	0,1011
90	10	15,5568	0,9334	1,3540	0,0812	0,8425	0,0505
100	0	15,7604	0,9456	1,5044	0,0903	0,0000	0,0000

Tabelle 8: $Q$ (kW) =		0,9					
$\lambda$ =		1,2					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	14,9719	0,8983	0,0000	0,0000	8,4247	0,5055
10	90	15,1941	0,9116	0,1504	0,0090	7,5823	0,4549
20	80	15,4162	0,9250	0,3009	0,0181	6,7398	0,4044
30	70	15,6383	0,9383	0,4513	0,0271	5,8973	0,3538
40	60	15,8604	0,9516	0,6018	0,0361	5,0548	0,3033
50	50	16,0825	0,9650	0,7522	0,0451	4,2124	0,2527
60	40	16,3047	0,9783	0,9026	0,0542	3,3699	0,2022
70	30	16,5268	0,9916	1,0531	0,0632	2,5274	0,1516
80	20	16,7489	1,0049	1,2035	0,0722	1,6849	0,1011
90	10	16,9710	1,0183	1,3540	0,0812	0,8425	0,0505
100	0	17,1931	1,0316	1,5044	0,0903	0,0000	0,0000

Tabelle 9: $Q$ (kW) =		0,9					
$\lambda$ =		1,3					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	16,2196	0,9732	0,0000	0,0000	8,4247	0,5055
10	90	16,4602	0,9876	0,1504	0,0090	7,5823	0,4549
20	80	16,7009	1,0021	0,3009	0,0181	6,7398	0,4044
30	70	16,9415	1,0165	0,4513	0,0271	5,8973	0,3538
40	60	17,1821	1,0309	0,6018	0,0361	5,0548	0,3033
50	50	17,4227	1,0454	0,7522	0,0451	4,2124	0,2527
60	40	17,6634	1,0598	0,9026	0,0542	3,3699	0,2022
70	30	17,9040	1,0742	1,0531	0,0632	2,5274	0,1516
80	20	18,1446	1,0887	1,2035	0,0722	1,6849	0,1011
90	10	18,3853	1,1031	1,3540	0,0812	0,8425	0,0505
100	0	18,6259	1,1176	1,5044	0,0903	0,0000	0,0000

Tabelle 10: $Q$ (kW) =		1,2					
$\lambda$ =		1,1					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	18,2990	1,0979	0,0000	0,0000	11,2330	0,6740
10	90	18,5705	1,1142	0,2006	0,0120	10,1097	0,6066
20	80	18,8420	1,1305	0,4012	0,0241	8,9864	0,5392
30	70	19,1135	1,1468	0,6018	0,0361	7,8631	0,4718
40	60	19,3850	1,1631	0,8023	0,0481	6,7398	0,4044
50	50	19,6564	1,1794	1,0029	0,0602	5,6165	0,3370
60	40	19,9279	1,1957	1,2035	0,0722	4,4932	0,2696
70	30	20,1994	1,2120	1,4041	0,0842	3,3699	0,2022
80	20	20,4709	1,2283	1,6047	0,0963	2,2466	0,1348
90	10	20,7423	1,2445	1,8053	0,1083	1,1233	0,0674
100	0	21,0138	1,2608	2,0059	0,1204	0,0000	0,0000

Tabelle 11: $Q$ (kW) =		1,2					
$\lambda$ =		1,2					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	19,9626	1,1978	0,0000	0,0000	11,2330	0,6740
10	90	20,2588	1,2155	0,2006	0,0120	10,1097	0,6066
20	80	20,5549	1,2333	0,4012	0,0241	8,9864	0,5392
30	70	20,8511	1,2511	0,6018	0,0361	7,8631	0,4718
40	60	21,1472	1,2688	0,8023	0,0481	6,7398	0,4044
50	50	21,4434	1,2866	1,0029	0,0602	5,6165	0,3370
60	40	21,7395	1,3044	1,2035	0,0722	4,4932	0,2696
70	30	22,0357	1,3221	1,4041	0,0842	3,3699	0,2022
80	20	22,3319	1,3399	1,6047	0,0963	2,2466	0,1348
90	10	22,6280	1,3577	1,8053	0,1083	1,1233	0,0674
100	0	22,9242	1,3755	2,0059	0,1204	0,0000	0,0000

Tabelle 12: $Q$ (kW) =		1,2					
$\lambda$ =		1,3					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	21,6261	1,2976	0,0000	0,0000	11,2330	0,6740
10	90	21,9470	1,3168	0,2006	0,0120	10,1097	0,6066
20	80	22,2678	1,3361	0,4012	0,0241	8,9864	0,5392
30	70	22,5887	1,3553	0,6018	0,0361	7,8631	0,4718
40	60	22,9095	1,3746	0,8023	0,0481	6,7398	0,4044
50	50	23,2303	1,3938	1,0029	0,0602	5,6165	0,3370
60	40	23,5512	1,4131	1,2035	0,0722	4,4932	0,2696
70	30	23,8720	1,4323	1,4041	0,0842	3,3699	0,2022
80	20	24,1928	1,4516	1,6047	0,0963	2,2466	0,1348
90	10	24,5137	1,4708	1,8053	0,1083	1,1233	0,0674
100	0	24,8345	1,4901	2,0059	0,1204	0,0000	0,0000

Tabelle 13: $Q$ (kW) =		1,5					
		$\lambda =$		1,1			
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	22,8738	1,3724	0,0000	0,0000	14,0412	0,8425
10	90	23,2132	1,3928	0,2507	0,0150	12,6371	0,7582
20	80	23,5525	1,4132	0,5015	0,0301	11,2330	0,6740
30	70	23,8918	1,4335	0,7522	0,0451	9,8288	0,5897
40	60	24,2312	1,4539	1,0029	0,0602	8,4247	0,5055
50	50	24,5705	1,4742	1,2537	0,0752	7,0206	0,4212
60	40	24,9099	1,4946	1,5044	0,0903	5,6165	0,3370
70	30	25,2492	1,5150	1,7551	0,1053	4,2124	0,2527
80	20	25,5886	1,5353	2,0059	0,1204	2,8082	0,1685
90	10	25,9279	1,5557	2,2566	0,1354	1,4041	0,0842
100	0	26,2673	1,5760	2,5073	0,1504	0,0000	0,0000

Tabelle 14: $Q$ (kW) =		1,5					
		$\lambda =$		1,2			
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	24,9532	1,4972	0,0000	0,0000	14,0412	0,8425
10	90	25,3234	1,5194	0,2507	0,0150	12,6371	0,7582
20	80	25,6936	1,5416	0,5015	0,0301	11,2330	0,6740
30	70	26,0638	1,5638	0,7522	0,0451	9,8288	0,5897
40	60	26,4340	1,5860	1,0029	0,0602	8,4247	0,5055
50	50	26,8042	1,6083	1,2537	0,0752	7,0206	0,4212
60	40	27,1744	1,6305	1,5044	0,0903	5,6165	0,3370
70	30	27,5446	1,6527	1,7551	0,1053	4,2124	0,2527
80	20	27,9148	1,6749	2,0059	0,1204	2,8082	0,1685
90	10	28,2850	1,6971	2,2566	0,1354	1,4041	0,0842
100	0	28,6552	1,7193	2,5073	0,1504	0,0000	0,0000

Tabelle 15: $Q$ (kW) =		1,5					
		$\lambda =$		1,3			
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	27,0327	1,6220	0,0000	0,0000	14,0412	0,8425
10	90	27,4337	1,6460	0,2507	0,0150	12,6371	0,7582
20	80	27,8348	1,6701	0,5015	0,0301	11,2330	0,6740
30	70	28,2358	1,6941	0,7522	0,0451	9,8288	0,5897
40	60	28,6369	1,7182	1,0029	0,0602	8,4247	0,5055
50	50	29,0379	1,7423	1,2537	0,0752	7,0206	0,4212
60	40	29,4390	1,7663	1,5044	0,0903	5,6165	0,3370
70	30	29,8400	1,7904	1,7551	0,1053	4,2124	0,2527
80	20	30,2411	1,8145	2,0059	0,1204	2,8082	0,1685
90	10	30,6421	1,8385	2,2566	0,1354	1,4041	0,0842
100	0	31,0431	1,8626	2,5073	0,1504	0,0000	0,0000

Tabelle 16: $Q$ (kW) =		1,8					
		$\lambda =$		1,1			
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	27,4486	1,6469	0,0000	0,0000	16,8495	1,0110
10	90	27,8558	1,6713	0,3009	0,0181	15,1645	0,9099
20	80	28,2630	1,6958	0,6018	0,0361	13,4796	0,8088
30	70	28,6702	1,7202	0,9026	0,0542	11,7946	0,7077
40	60	29,0774	1,7446	1,2035	0,0722	10,1097	0,6066
50	50	29,4847	1,7691	1,5044	0,0903	8,4247	0,5055
60	40	29,8919	1,7935	1,8053	0,1083	6,7398	0,4044
70	30	30,2991	1,8179	2,1062	0,1264	5,0548	0,3033
80	20	30,7063	1,8424	2,4070	0,1444	3,3699	0,2022
90	10	31,1135	1,8668	2,7079	0,1625	1,6849	0,1011
100	0	31,5207	1,8912	3,0088	0,1805	0,0000	0,0000

Tabelle 17: $Q$ (kW) =		1,8					
		$\lambda =$		1,2			
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	29,9439	1,7966	0,0000	0,0000	16,8495	1,0110
10	90	30,3881	1,8233	0,3009	0,0181	15,1645	0,9099
20	80	30,8324	1,8499	0,6018	0,0361	13,4796	0,8088
30	70	31,2766	1,8766	0,9026	0,0542	11,7946	0,7077
40	60	31,7208	1,9033	1,2035	0,0722	10,1097	0,6066
50	50	32,1651	1,9299	1,5044	0,0903	8,4247	0,5055
60	40	32,6093	1,9566	1,8053	0,1083	6,7398	0,4044
70	30	33,0535	1,9832	2,1062	0,1264	5,0548	0,3033
80	20	33,4978	2,0099	2,4070	0,1444	3,3699	0,2022
90	10	33,9420	2,0365	2,7079	0,1625	1,6849	0,1011
100	0	34,3863	2,0632	3,0088	0,1805	0,0000	0,0000

Tabelle 18: $Q$ (kW) =		1,8					
		$\lambda =$		1,3			
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	32,4392	1,9464	0,0000	0,0000	16,8495	1,0110
10	90	32,9205	1,9752	0,3009	0,0181	15,1645	0,9099
20	80	33,4017	2,0041	0,6018	0,0361	13,4796	0,8088
30	70	33,8830	2,0330	0,9026	0,0542	11,7946	0,7077
40	60	34,3642	2,0619	1,2035	0,0722	10,1097	0,6066
50	50	34,8455	2,0907	1,5044	0,0903	8,4247	0,5055
60	40	35,3268	2,1196	1,8053	0,1083	6,7398	0,4044
70	30	35,8080	2,1485	2,1062	0,1264	5,0548	0,3033
80	20	36,2893	2,1774	2,4070	0,1444	3,3699	0,2022
90	10	36,7705	2,2062	2,7079	0,1625	1,6849	0,1011
100	0	37,2518	2,2351	3,0088	0,1805	0,0000	0,0000

Tabelle 19: $Q$ (kW) =		2,1					
$\lambda$ =		1,1					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	32,0233	1,9214	0,0000	0,0000	19,6577	1,1795
10	90	32,4984	1,9499	0,3510	0,0211	17,6919	1,0615
20	80	32,9735	1,9784	0,7021	0,0421	15,7262	0,9436
30	70	33,4486	2,0069	1,0531	0,0632	13,7604	0,8256
40	60	33,9237	2,0354	1,4041	0,0842	11,7946	0,7077
50	50	34,3988	2,0639	1,7551	0,1053	9,8288	0,5897
60	40	34,8738	2,0924	2,1062	0,1264	7,8631	0,4718
70	30	35,3489	2,1209	2,4572	0,1474	5,8973	0,3538
80	20	35,8240	2,1494	2,8082	0,1685	3,9315	0,2359
90	10	36,2991	2,1779	3,1592	0,1896	1,9658	0,1179
100	0	36,7742	2,2065	3,5103	0,2106	0,0000	0,0000

Tabelle 20: $Q$ (kW) =		2,1					
$\lambda$ =		1,2					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	34,9345	2,0961	0,0000	0,0000	19,6577	1,1795
10	90	35,4528	2,1272	0,3510	0,0211	17,6919	1,0615
20	80	35,9711	2,1583	0,7021	0,0421	15,7262	0,9436
30	70	36,4894	2,1894	1,0531	0,0632	13,7604	0,8256
40	60	37,0076	2,2205	1,4041	0,0842	11,7946	0,7077
50	50	37,5259	2,2516	1,7551	0,1053	9,8288	0,5897
60	40	38,0442	2,2827	2,1062	0,1264	7,8631	0,4718
70	30	38,5625	2,3137	2,4572	0,1474	5,8973	0,3538
80	20	39,0807	2,3448	2,8082	0,1685	3,9315	0,2359
90	10	39,5990	2,3759	3,1592	0,1896	1,9658	0,1179
100	0	40,1173	2,4070	3,5103	0,2106	0,0000	0,0000

Tabelle 21: $Q$ (kW) =		2,1					
$\lambda$ =		1,3					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	37,8458	2,2707	0,0000	0,0000	19,6577	1,1795
10	90	38,4072	2,3044	0,3510	0,0211	17,6919	1,0615
20	80	38,9687	2,3381	0,7021	0,0421	15,7262	0,9436
30	70	39,5301	2,3718	1,0531	0,0632	13,7604	0,8256
40	60	40,0916	2,4055	1,4041	0,0842	11,7946	0,7077
50	50	40,6531	2,4392	1,7551	0,1053	9,8288	0,5897
60	40	41,2145	2,4729	2,1062	0,1264	7,8631	0,4718
70	30	41,7760	2,5066	2,4572	0,1474	5,8973	0,3538
80	20	42,3375	2,5402	2,8082	0,1685	3,9315	0,2359
90	10	42,8989	2,5739	3,1592	0,1896	1,9658	0,1179
100	0	43,4604	2,6076	3,5103	0,2106	0,0000	0,0000

Tabelle 22: Q (kW) = 2,4		λ = 1,1					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	36,5981	2,1959	0,0000	0,0000	22,4659	1,3480
10	90	37,1410	2,2285	0,4012	0,0241	20,2193	1,2132
20	80	37,6840	2,2610	0,8023	0,0481	17,9728	1,0784
30	70	38,2270	2,2936	1,2035	0,0722	15,7262	0,9436
40	60	38,7699	2,3262	1,6047	0,0963	13,4796	0,8088
50	50	39,3129	2,3588	2,0059	0,1204	11,2330	0,6740
60	40	39,8558	2,3913	2,4070	0,1444	8,9864	0,5392
70	30	40,3988	2,4239	2,8082	0,1685	6,7398	0,4044
80	20	40,9417	2,4565	3,2094	0,1926	4,4932	0,2696
90	10	41,4847	2,4891	3,6106	0,2166	2,2466	0,1348
100	0	42,0276	2,5217	4,0117	0,2407	0,0000	0,0000

Tabelle 23: Q (kW) = 2,4		λ = 1,2					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	39,9252	2,3955	0,0000	0,0000	22,4659	1,3480
10	90	40,5175	2,4311	0,4012	0,0241	20,2193	1,2132
20	80	41,1098	2,4666	0,8023	0,0481	17,9728	1,0784
30	70	41,7021	2,5021	1,2035	0,0722	15,7262	0,9436
40	60	42,2944	2,5377	1,6047	0,0963	13,4796	0,8088
50	50	42,8868	2,5732	2,0059	0,1204	11,2330	0,6740
60	40	43,4791	2,6087	2,4070	0,1444	8,9864	0,5392
70	30	44,0714	2,6443	2,8082	0,1685	6,7398	0,4044
80	20	44,6637	2,6798	3,2094	0,1926	4,4932	0,2696
90	10	45,2560	2,7154	3,6106	0,2166	2,2466	0,1348
100	0	45,8483	2,7509	4,0117	0,2407	0,0000	0,0000

Tabelle 24: Q (kW) = 2,4		λ = 1,3					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	43,2523	2,5951	0,0000	0,0000	22,4659	1,3480
10	90	43,8940	2,6336	0,4012	0,0241	20,2193	1,2132
20	80	44,5356	2,6721	0,8023	0,0481	17,9728	1,0784
30	70	45,1773	2,7106	1,2035	0,0722	15,7262	0,9436
40	60	45,8190	2,7491	1,6047	0,0963	13,4796	0,8088
50	50	46,4607	2,7876	2,0059	0,1204	11,2330	0,6740
60	40	47,1023	2,8261	2,4070	0,1444	8,9864	0,5392
70	30	47,7440	2,8646	2,8082	0,1685	6,7398	0,4044
80	20	48,3857	2,9031	3,2094	0,1926	4,4932	0,2696
90	10	49,0274	2,9416	3,6106	0,2166	2,2466	0,1348
100	0	49,6690	2,9801	4,0117	0,2407	0,0000	0,0000

Tabelle 25: Q (kW) = 2,7		λ = 1,1					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	41,1729	2,4704	0,0000	0,0000	25,2742	1,5165
10	90	41,7837	2,5070	0,4513	0,0271	22,7468	1,3648
20	80	42,3945	2,5437	0,9026	0,0542	20,2193	1,2132
30	70	43,0053	2,5803	1,3540	0,0812	17,6919	1,0615
40	60	43,6162	2,6170	1,8053	0,1083	15,1645	0,9099
50	50	44,2270	2,6536	2,2566	0,1354	12,6371	0,7582
60	40	44,8378	2,6903	2,7079	0,1625	10,1097	0,6066
70	30	45,4486	2,7269	3,1592	0,1896	7,5823	0,4549
80	20	46,0594	2,7636	3,6106	0,2166	5,0548	0,3033
90	10	46,6703	2,8002	4,0619	0,2437	2,5274	0,1516
100	0	47,2811	2,8369	4,5132	0,2708	0,0000	0,0000

Tabelle 26: Q (kW) = 2,7		λ = 1,2					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	44,9158	2,6950	0,0000	0,0000	25,2742	1,5165
10	90	45,5822	2,7349	0,4513	0,0271	22,7468	1,3648
20	80	46,2485	2,7749	0,9026	0,0542	20,2193	1,2132
30	70	46,9149	2,8149	1,3540	0,0812	17,6919	1,0615
40	60	47,5813	2,8549	1,8053	0,1083	15,1645	0,9099
50	50	48,2476	2,8949	2,2566	0,1354	12,6371	0,7582
60	40	48,9140	2,9348	2,7079	0,1625	10,1097	0,6066
70	30	49,5803	2,9748	3,1592	0,1896	7,5823	0,4549
80	20	50,2467	3,0148	3,6106	0,2166	5,0548	0,3033
90	10	50,9130	3,0548	4,0619	0,2437	2,5274	0,1516
100	0	51,5794	3,0948	4,5132	0,2708	0,0000	0,0000

Tabelle 27: Q (kW) = 2,7		λ = 1,3					
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	48,6588	2,9195	0,0000	0,0000	25,2742	1,5165
10	90	49,3807	2,9628	0,4513	0,0271	22,7468	1,3648
20	80	50,1026	3,0062	0,9026	0,0542	20,2193	1,2132
30	70	50,8245	3,0495	1,3540	0,0812	17,6919	1,0615
40	60	51,5464	3,0928	1,8053	0,1083	15,1645	0,9099
50	50	52,2682	3,1361	2,2566	0,1354	12,6371	0,7582
60	40	52,9901	3,1794	2,7079	0,1625	10,1097	0,6066
70	30	53,7120	3,2227	3,1592	0,1896	7,5823	0,4549
80	20	54,4339	3,2660	3,6106	0,2166	5,0548	0,3033
90	10	55,1558	3,3093	4,0619	0,2437	2,5274	0,1516
100	0	55,8777	3,3527	4,5132	0,2708	0,0000	0,0000

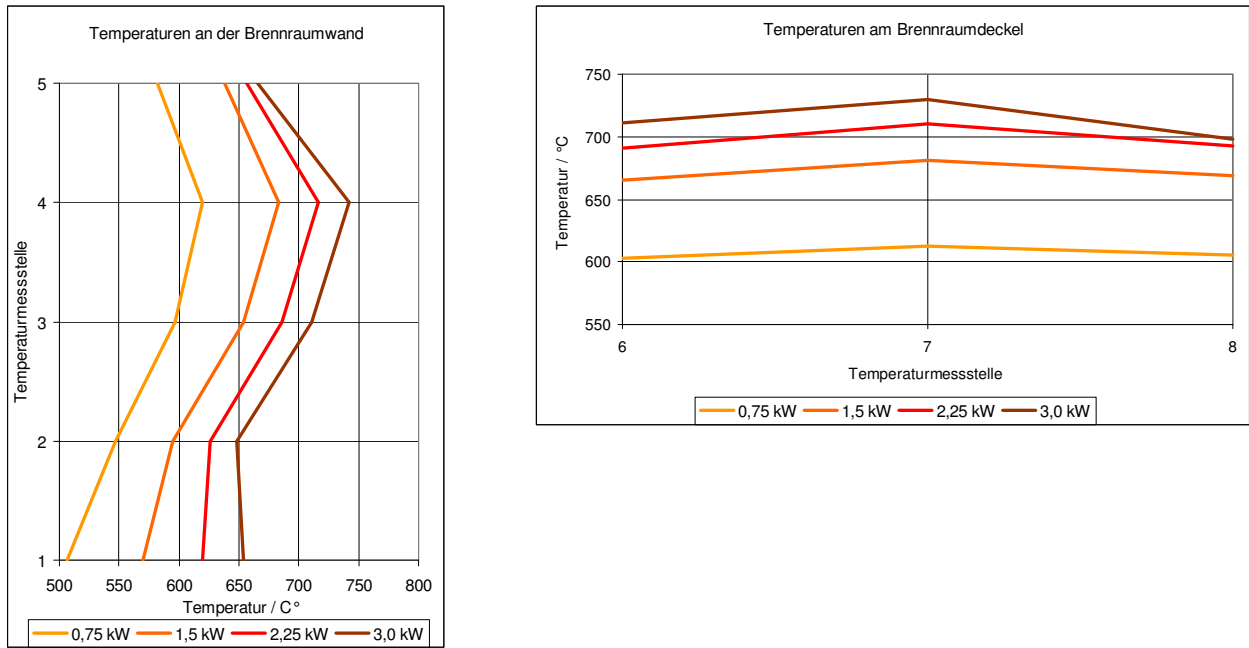
Tabelle 28: $Q$ (kW) =		3,0					
		$\lambda =$		1,1			
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	45,7476	2,7449	0,0000	0,0000	28,0824	1,6849
10	90	46,4263	2,7856	0,5015	0,0301	25,2742	1,5165
20	80	47,1050	2,8263	1,0029	0,0602	22,4659	1,3480
30	70	47,7837	2,8670	1,5044	0,0903	19,6577	1,1795
40	60	48,4624	2,9077	2,0059	0,1204	16,8495	1,0110
50	50	49,1411	2,9485	2,5073	0,1504	14,0412	0,8425
60	40	49,8198	2,9892	3,0088	0,1805	11,2330	0,6740
70	30	50,4985	3,0299	3,5103	0,2106	8,4247	0,5055
80	20	51,1772	3,0706	4,0117	0,2407	5,6165	0,3370
90	10	51,8559	3,1114	4,5132	0,2708	2,8082	0,1685
100	0	52,5346	3,1521	5,0147	0,3009	0,0000	0,0000

Tabelle 29: $Q$ (kW) =		3,0					
		$\lambda =$		1,2			
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	49,9065	2,9944	0,0000	0,0000	28,0824	1,6849
10	90	50,6469	3,0388	0,5015	0,0301	25,2742	1,5165
20	80	51,3873	3,0832	1,0029	0,0602	22,4659	1,3480
30	70	52,1277	3,1277	1,5044	0,0903	19,6577	1,1795
40	60	52,8681	3,1721	2,0059	0,1204	16,8495	1,0110
50	50	53,6085	3,2165	2,5073	0,1504	14,0412	0,8425
60	40	54,3488	3,2609	3,0088	0,1805	11,2330	0,6740
70	30	55,0892	3,3054	3,5103	0,2106	8,4247	0,5055
80	20	55,8296	3,3498	4,0117	0,2407	5,6165	0,3370
90	10	56,5700	3,3942	4,5132	0,2708	2,8082	0,1685
100	0	57,3104	3,4386	5,0147	0,3009	0,0000	0,0000

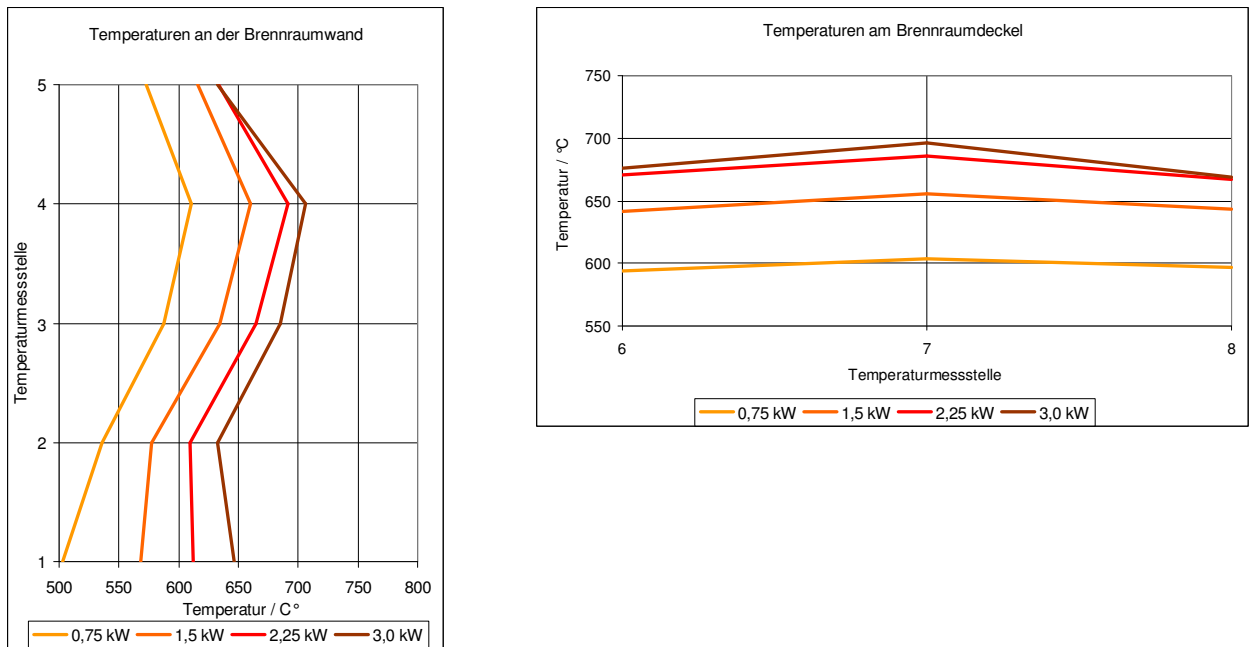
Tabelle 30: $Q$ (kW) =		3,0					
		$\lambda =$		1,3			
		Verbrennungsluft		Brenngas			
Vol.Anteil (in %)		Luft		Methan		ARG	
Methan (CH <sub>4</sub> )	ARG	V [l/min.]	V [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [l/min.]	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ARG</sub> [l/min.]	V <sub>ARG</sub> [m <sup>3</sup> /h]
0	100	54,0654	3,2439	0,0000	0,0000	28,0824	1,6849
10	90	54,8675	3,2920	0,5015	0,0301	25,2742	1,5165
20	80	55,6695	3,3402	1,0029	0,0602	22,4659	1,3480
30	70	56,4716	3,3883	1,5044	0,0903	19,6577	1,1795
40	60	57,2737	3,4364	2,0059	0,1204	16,8495	1,0110
50	50	58,0758	3,4845	2,5073	0,1504	14,0412	0,8425
60	40	58,8779	3,5327	3,0088	0,1805	11,2330	0,6740
70	30	59,6800	3,5808	3,5103	0,2106	8,4247	0,5055
80	20	60,4821	3,6289	4,0117	0,2407	5,6165	0,3370
90	10	61,2842	3,6771	4,5132	0,2708	2,8082	0,1685
100	0	62,0863	3,7252	5,0147	0,3009	0,0000	0,0000



## Temperaturverteilungen in der Brennkammer nur Brenner

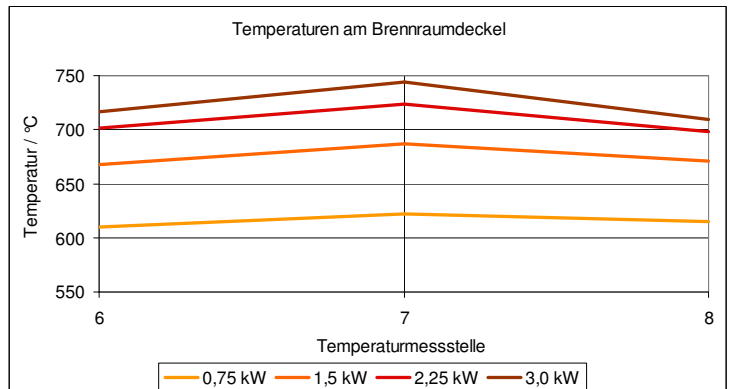
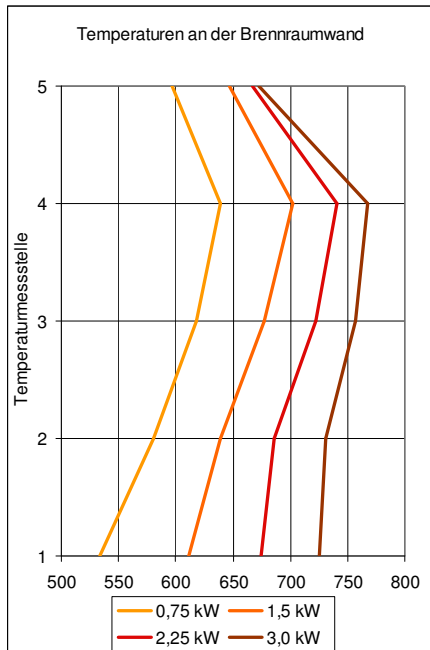


**Abbildung A 1:** Temperaturverteilung in der Brennkammer (FU = 0,6), nur Brenner

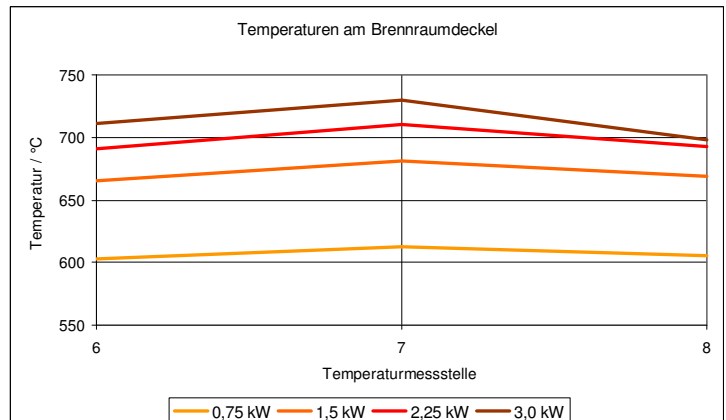
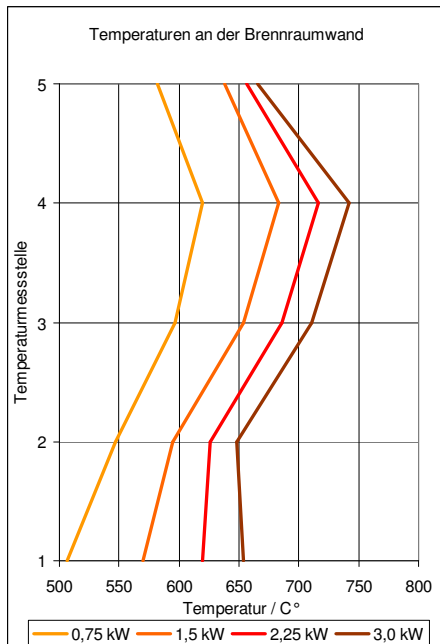


**Abbildung A 2:** Temperaturverteilung in der Brennkammer (FU = 0,8), nur Brenner

### Temperaturverteilungen in der Brennkammer Gebläse-Brenner-Kombination



**Abbildung A 3:** Temperaturverteilung in der Brennkammer (FU = 0,6), Gebläse-Brenner-Kombination



**Abbildung A 4:** Temperaturverteilung in der Brennkammer (FU = 0,8), Gebläse-Brenner-Kombination