

Das Solar-Wasserstoff-Projekt in Neunburg vorm Wald

SWB
Ein Unternehmen der
Bayernwerk-Gruppe



Schriftenreihe Solarer Wasserstoff

Wärme Nr. 18

Erschienen in VDI Berichte, Nr. 1201, 1995

Auslegung eines katalytischen CH₄- und H₂-Heizers der 10 kW-Klasse

Dr.- Ing. P. Bröckerhoff, Dr.- Ing. B. Emonts
Forschungszentrum Jülich GmbH

1. Einleitung

Im Jahr 1986 wurde unter Leitung des Bayernwerkes die Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH (SWB) gegründet. Partner waren die Firmen BMW, DASA, Linde und Siemens [1]. Die DASA-Anteile wurden inzwischen vom Bayernwerk übernommen. Hauptaufgabe dieser Gesellschaft war die Errichtung einer Solar-Wasserstoff-Demonstrationsanlage in Neunburg vorm Wald und deren Betrieb. Der mittels Photovoltaikmodulen aus Sonnenenergie erzeugte elektrische Strom wird in Elektrolyseanlagen zur Spaltung von Wasser eingesetzt. Die entstehenden Gase Wasserstoff und Sauerstoff werden in Druckbehältern gespeichert. Der Wasserstoff kann dann als Energieträger universell eingesetzt werden, wobei als Oxidator wahlweise der gespeicherte Sauerstoff oder auch Luft verwendet wird.

In zwei Projektphasen werden Photovoltaikmodule verschiedener Hersteller, die Leistungsaufbereitung, mehrere Gaserzeugungs- und -aufbereitungssysteme sowie Anwendungen untersucht. Zu den Anwendungen zählten in der ersten Phase Brennstoffzellen, zwei Gasheizkessel und ein mit Flüssigwasserstoff betriebenes Kraftfahrzeug. Im Rahmen der Konzeptfindung für die Projektphase I war als weitere Anwendung ein katalytischer Heizer vorgesehen. Dieser wird nun in der Ende 1996 zu Ende gehenden Projektphase II getestet. Dazu kommen noch eine katalytisch beheizte Absorptionskälteanlage und eine Brennstoffzelle, die einen Gabelstapler mit Strom versorgt.

Das Ziel der Firma SWB ist die Erprobung der vorstehend genannten Techniken in einem industriellen Maßstab [1]. Wenn vorhanden, sollen unterschiedliche Systeme eingesetzt und die gewonnenen Erfahrungen miteinander verglichen werden. Insgesamt soll das Zusammenwirken der Anlagenteile getestet werden. Ein Markt für Wasserstoffsysteme besteht nicht oder ist sehr klein, so daß fast jede in Neunburg eingesetzte Komponente eine Einzelentwicklung darstellt. In der Forschungszentrum GmbH (KFA) Jülich wurde im Jahre 1986 mit Arbeiten zur katalytischen Verbrennung begonnen. Als Brennstoff diente zu Beginn

Methanol, das zunächst im Labormaßstab, dann in einer größeren Anlage mit einer Tagesleistung von etwa 4000 l aus Erdgas hergestellt wurde. Vergleichende Messungen der Abgaszusammensetzung wurden an einem Flammrohr mit Heizöl EL, Erdgas und Methanol als Vorläufer für die Versuche zur katalytischen Verbrennung durchgeführt [2]. Der Katalytbrenner sowie Messungen und Ergebnisse sind in [3] ausführlich beschrieben. Der Kontakt zur Firma SWB wurde im Jahre 1990 aufgenommen. In den Gesprächen zeigte SWB Interesse an den Arbeiten zur katalytischen Verbrennung, besonders an den in der Zwischenzeit laufenden Messungen mit Erdgas. Daraus ergab sich nach Festlegung der Bedingungen ein Auftrag an die KFA zur Lieferung eines katalytischen Heizgerätes für die Solaranlage in Neunburg vorm Wald. Das Gerät wird im Sommer dieses Jahres ausgeliefert, montiert und im November an die Firma SWB übergeben.

2. Prinzip der katalytischen Verbrennung

Im Gegensatz zur konventionellen Verbrennung laufen die Reaktionen bei der katalytischen Verbrennung an festen Oberflächen ab, die mit katalytisch aktiven Materialien belegt sind. Die Reaktionen sind demzufolge heterogen katalysiert. In konventionellen Systemen kommt es in den Flammen zu Konzentrations- und damit Temperaturgradienten, die zu unvollständiger Verbrennung führen. Die Reaktionen sind homogen katalysiert. Bei der katalytischen Verbrennung lassen sich wegen der aktiven Katalysatoren merkliche Oxidationsraten bei Temperaturen erreichen, die deutlich unter denen bei homogener Reaktion liegen. Folglich sind die NO_x -Konzentrationen im Abgas gering. Merkliche Umsatzsteigerungen werden erreicht bei Erhöhung der Reaktionstemperaturen. Die Reaktionen finden sowohl an den Oberflächen als auch in der Gasphase infolge sich dort bildender gasförmiger Radikale statt. Dieser Vorgang wird katalytisch unterstützte Verbrennung genannt. Trotz der höheren Brennstoffumsätze laufen die Reaktionen wesentlich kontrollierter als bei der Flammenverbrennung ab. Auch führen die höheren Reaktionstemperaturen nicht zu unerwünscht hohen NO_x -Werten.

3. Konzepte

In den letzten Jahren wurde mit großer Intensität an der Entwicklung katalytischer Verbrennungssysteme gearbeitet. Dabei lag der Schwerpunkt der Aktivitäten auf der Anwendung der heterogenen Katalyse sowohl für Infrarotstrahler als auch stationäre Gasturbinen und Flugtriebwerke. Zur Markteinführung ist es jedoch nur bei einigen wenigen Konzepten gekommen, die auf vollständige Vormischung von Luft und Brennstoff verzichten.

Beim selbstbegrenzenden Brenner erfolgt die kontrollierte Umsetzung des zündfähigen Gemisches an der gasseitigen Fläche einer Wärmetauscherplatte, die mit einer Katalysatormatte belegt ist. Diese ist mit einem porösen Material, das als Diffusionsbarriere dient, abgedeckt. Sie gewährleistet eine gegensinnige Diffusion von Gemischgas und Abgas. Somit stabilisiert sich der Verbrennungsablauf selbst. Rückzündungen werden vermieden. Als Nachteil ist allerdings die geringe Leistungsdichte von 10 kW/m^2 bis 20 kW/m^2 anzusehen [4]. Diffusionsbrenner sind Systeme ohne Luftvormischung und mit teilweiser Vormischung. Die Luft überströmt die Katalysatorstruktur. Der Sauerstoff diffundiert aus der Grenzschicht in die poröse Struktur. In der oberflächennahen Zone kommt es mit dem Brenngas, das durch die Struktur tritt, zur Reaktion. Die entstehende Wärme wird infolge Strahlung abgeführt. Diese Systeme zeichnen sich durch hohe Betriebssicherheit aus, da sich keine zündfähigen Gemische bilden. Von Nachteil sind die erforderliche elektrische Vorheizung und die infolge unvollständiger Verbrennung hohen Emissionen [5]. Nach [6] arbeiten katalytische Hochtemperaturbrenner im Temperaturbereich zwischen $800 \text{ }^\circ\text{C}$ und $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. Brenngas und Luft werden vollständig vorgemischt. Als Katalysatorträger dienen meist monolithische Strukturen. Das in der KFA entwickelte Konzept ist in *Abb. 1* schematisch dargestellt. Es ist u. a. in [3] und [7] ausführlich beschrieben.

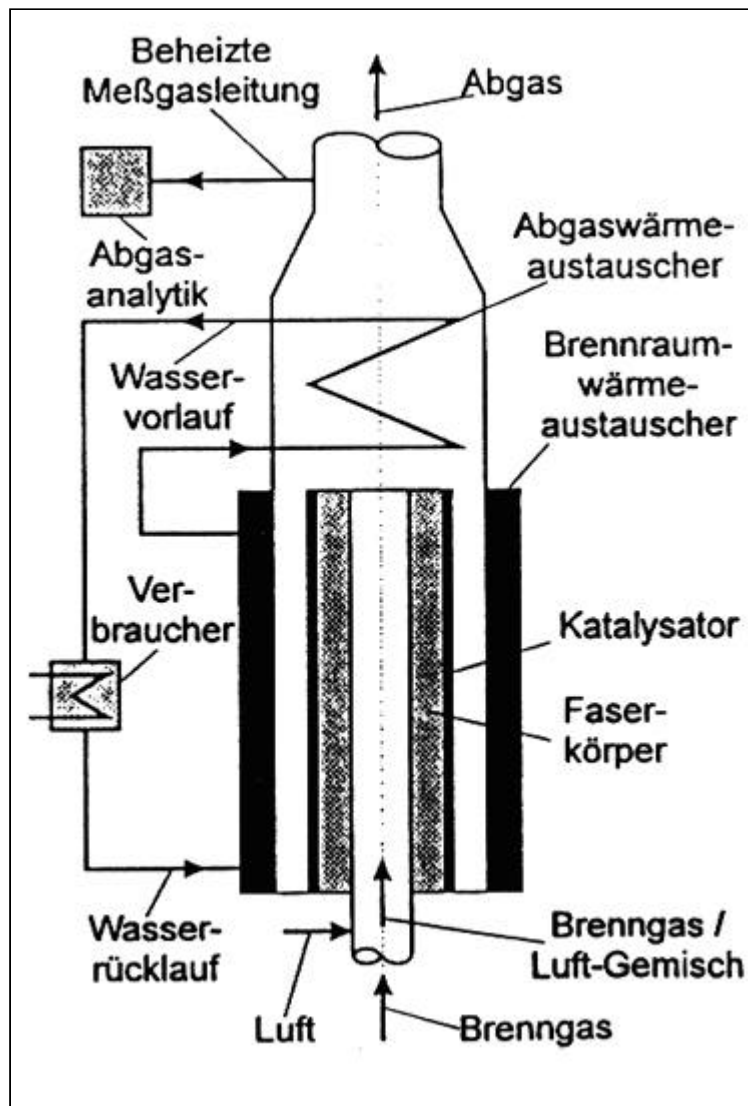


Abb. 1: Brennerprüfstand

Der Brennstoff wird in einem Mischer der Verbrennungsluft zugemischt. Bei Verwendung von Methanol wird dem Mischer ein Verdampfer vorgeschaltet. Das Brenngas/Luft-Gemisch durchströmt anschließend einen zylindrischen Körper aus keramischen Fasern. An der äußeren Oberfläche, die mit Edelmetallkatalysatoren belegt ist, findet die Reaktion statt. Die Wärme wird zum überwiegenden Teil infolge Strahlung an den gegenüberliegenden Wärmetauscher abgeben. Der Faserkörper soll nach Möglichkeit dafür sorgen, daß es nicht zu Rückzündungen kommt. Außerdem hat er die Aufgabe, das Gemisch möglichst homogen zu verteilen. Infolgedessen können sich einheitliche Reaktionsbedingungen mit verminderten Emissionen einstellen. Im nachgeschalteten Abgaswärmehaustauscher wird dem Abgas ein weiterer Teil der Wärme entzogen. Die Abgasanalytik ermöglicht die Bestimmung von Kohlenmonoxid und -dioxid (CO und CO₂), Sauerstoff (O₂), Stickoxide (NO, NO_x) und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (UHC). Diese können mittels diskontinuierlicher Meßverfahren - Gaschromatographie (GC) und Hochdruckflüssigkeitschromatographie (HPLC) - weiter auf Aldehyde, Ketone, Alkohole, Alkane und Wasserstoff analysiert werden. Außen- und Innendurchmesser des Brennerkörpers betragen im allgemeinen 100 mm bzw. 40 mm. Seine Höhe wird bei allen Versuchen mit 300 mm konstant gehalten. Die Körperdichten liegen etwa im Bereich zwischen 250 kg/m³ und 320 kg/m³.

4. Beschreibung des Heizgerätes

Im Herbst 1992 kam es zur Unterzeichnung des Vertrages zwischen SWB und KFA. Der Vertrag sieht die Lieferung eines kompletten katalytischen Heizgerätes für die Projektphase II durch KFA an SWB vor. Die auf den Brennwert bezogene maximale Feuerungsleistung ist mit

11,5 kW festgelegt. Das Gerät soll entweder mit Erdgas oder Mischungen aus Erdgas und Wasserstoff betrieben werden. Der höchste Volumenanteil des Wasserstoffs am Brenngas soll 50 % betragen. Die Nennluftzahl ist mit 1,15 festgelegt. Der Luftzahlbereich weist als obere und untere Grenzen 1,6 bzw. 1,05 auf. Für den Auslegungsfall - also die maximale Leistung von 11,5 kW und Luftzahl von 1,15 - sollen die Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen (NO_x) die Grenzwerte von 100 mg/kWh bzw. 20 mg/kWh nicht übersteigen. Zur Steigerung des Wirkungsgrades ist das Gerät als Brennwertkessel auszulegen.

Das im Institut getestete Heizgerät samt Steuerung usw. ist schematisch in *Abb. 2* dargestellt. Erdgas und Wasserstoff sowie die Verbrennungsluft werden dosiert zugegeben. Ihre Volumenströme werden vor Eintritt in den Kreuzstrommischer gemessen. Das Brenngas/Luft-Gemisch durchströmt anschließend den bereits oben genannten Faserkörper in radialer Richtung von innen nach außen. Der auf seiner äußeren Mantelfläche mit katalytisch aktivem Material belegte Körper ist im Gegensatz zu *Abb. 1* hängend im Brennwertkessel eingespannt. Die in der Reaktionszone entstehende Wärme wird überwiegend an den Brennraumwärmetauscher und ein weiterer Teil an den nachgeschalteten Rohrbündelwärmetauscher übertragen. Dabei wird das Abgas unter den Taupunkt abgekühlt, so daß ein Teil des mitgeführten Wassers kondensiert. Das Kondensat wird über das Abwassersystem abgeführt. Vor Verlassen des Abgases über das Abgassystem wird eine geringe Abgasmenge über eine beheizte Meßgasleitung der bereits in *Abb. 1* angedeuteten Analytik zugeführt und dort analysiert. Das Kühlwassersystem besteht aus einem geschlossenen und einem offenen Kreislauf. Das Wasser, das den geschlossenen Kühlkreislauf des Brennwertkessels durchströmt, gibt die dort aufgenommene Wärme über einen als Verbraucher bezeichneten Wärmetauscher an den offenen Kreislauf ab.

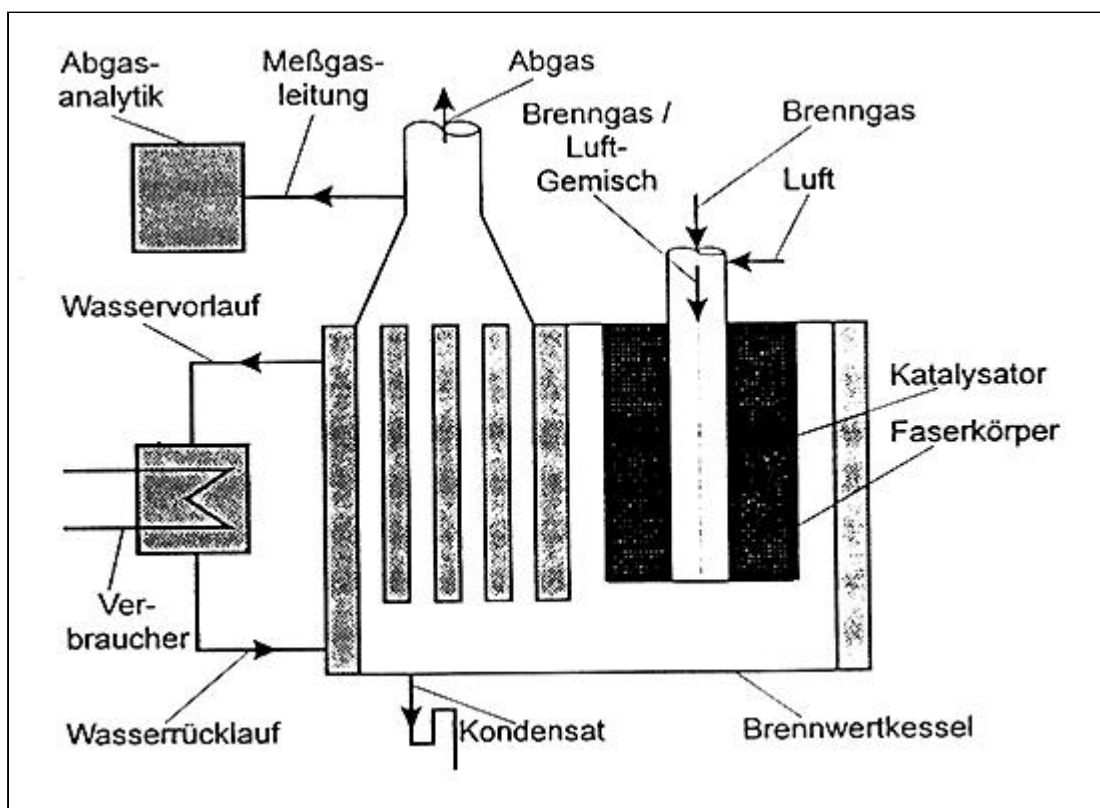


Abb. 2: Katalytisches Heizgerät

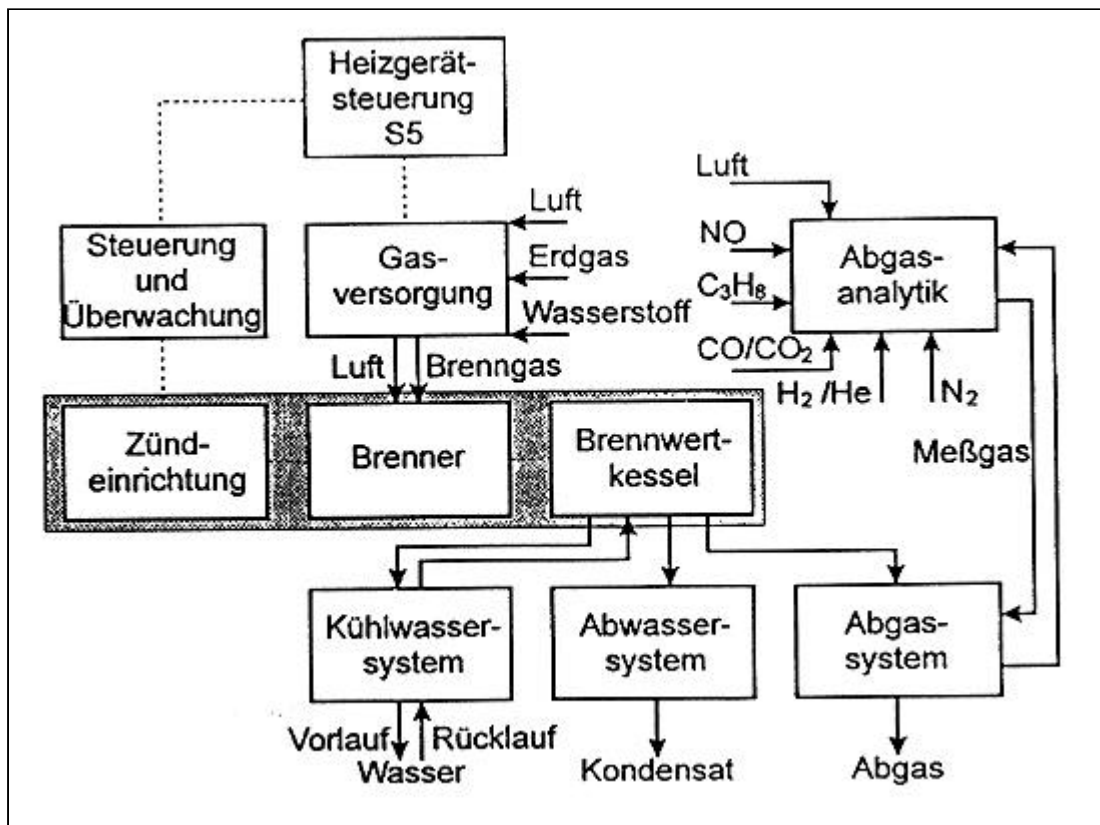


Abb. 3: Blockschaltbild

Im Blockschaltbild der Abb. 3 sind die Hauptkomponenten des Gerätes, wie es zur Zeit getestet wird und später in Neunburg vorm Wald betrieben werden soll, dargestellt. Eine softwareunterstützte Prozeßsteuerung der Firma Siemens Type S5, erfaßt alle Meßsignale, steuert und überwacht den Verbrennungsprozeß und regelt sowohl die Gas- als auch Kühlwassermengen. Zur fehlersicheren Steuerung und Überwachung ist der Gerätesteuerung S5 ein Feuerungsautomat nachgeschaltet. Dieser wirkt direkt auf die Zündeinrichtung.

5. Versuchsdurchführung

Das Betriebsverhalten des katalytischen Heizgerätes wurde bzw. wird in den in den Abbildungen 1 und 2 dargestellten Prüfständen als Funktion verschiedener Parameter untersucht. Für die Experimente standen mehrere Faserkörper mit unterschiedlicher Belegungsichte zur Verfügung. Als Katalysatormaterial diente meist Platin. In einigen Versuchsreihen wurde auch Palladium verwendet. Die Belegungsichte ist die auf die äußere Manteloberfläche des Faserkörpers bezogene Katalysatormenge. Diese betrug in zahlreichen Meßreihen zwischen $0,5 \text{ g/m}^2$ und $5,0 \text{ g/m}^2$.

Die Betriebsweisen der in den Abbildungen 1 und 2 gezeigten Geräte unterscheiden sich besonders in der Art der Gemischzuführung und Rauchgasabströmung. Bei der Prüfstandsversion Abb. 1 wird das Brennstoff/Luft-Gemisch von unten zugeführt. Das Abgas durchströmt den Ringspalt zwischen Faserkörper und Brennraumwärmetauscher sowie den nachfolgenden Abgaswärmetauscher und Kamin entgegen der Erdschwere. In dem für Neunburg vorm Wald realisierten Konzept Abb. 2 erfolgt die Gemischführung von oben nach unten. Das Abgas strömt zunächst in Richtung der Erdschwere, im nachgeschalteten Rohrbündelwärmetauscher entgegen der Erdschwere. Diese unterschiedliche Gasführung hat Konsequenzen, auf die sich einstellenden Reaktionstemperaturen, die über die Geometrie und Einbauten der Brennkammer angepaßt werden können.

Als wichtige Größe erwies sich der Durchmesser der Brennkammer. Dieser beträgt bei dem in Abb. 1 gezeigten Gerät jeweils 150 mm. Der Durchmesser des in Abb. 2 dargestellten Kessels betrug bei der ersten Version 200 mm. Aufgrund der damit erzielten niedrigen

Reaktionstemperaturen und folglich schlechten Brennstoffumsätze wurde ein zweites Gerät mit einem Brennkammerdurchmesser von ebenfalls 150 mm bestellt. Zur Wirkungsgradsteigerung mußte außerdem die Fläche des Rohrbündelwärmetauschers vergrößert werden. Seit einigen Wochen ist diese zweite Version in Betrieb. Bei den Versuchen dienen die Feuerungsleistung P_F bzw. die Leistungsdichte q , das Wasserstoffverhältnis m und die Luftzahl λ als Betriebsparameter. Die Leistungsdichte ist die auf die äußere Oberfläche des Faserkörpers bezogene Feuerungsleistung. Das Wasserstoffverhältnis bezeichnet das Verhältnis der Wasserstoffmenge zur Brenngasmenge. Bei Erdgasbetrieb, d. h. $m = 0$, wurden in beiden Versuchsanlagen die Luftzahlen zwischen 1,05 und 1,6 variiert. Zur qualitativen Beurteilung der Reaktionsraten infolge heterogen katalysierter Oberflächenreaktionen am Katalysator und homogener Gasphasenreaktionen in der Nachreaktionszone wurden bei Betrieb des in *Abb. 1* dargestellten Gerätes die Katalysator- und Gastemperaturen herangezogen. Die Katalysatortemperaturen wurden berührungslos mittels Pyrometer gemessen. Zu diesem Zweck weist die Brennraumwand drei Glasfenster auf. Die Empfindlichkeit des Pyrometers, die zwischen 2,0 μm und 2,5 μm liegt, wird über Filter eingestellt. Somit wird die Messung weder durch CO_2 - und H_2O -Atmosphäre noch Glas- oder Quarzfenster beeinflusst. Diese Art der Messung ist allerdings bei dem zu liefernden Gerät nicht möglich, da aus konstruktiven Gründen die Brennraumwand nicht durchbrochen werden darf. Zur Ermittlung der Gastemperaturen in der Nachreaktionszone werden in beiden Prüfständen NiCr-Ni- Thermoelemente verwendet.

Das Brennwertgerät ermöglicht die mit 1 und 2 bezeichneten Betriebsarten. Bei Betriebsart 1 wird die Rücklaufemperatur des Kesselwassers konstant gehalten. Dies läßt sich durch Einstellung des Mischers erreichen. Die Regelung der Leistung gestattet die für die Betriebsart 2 erforderlichen konstanten Vorlaufemperaturen.

6. Versuchsergebnisse

Im folgenden werden nur Ergebnisse vorgestellt, die mit der in *Abb. 2* gezeigten Anlage gewonnen wurden. Versuchsergebnisse aus Messungen am Gerät der *Abb. 1* wurden bereits an anderer Stelle diskutiert, siehe z. B. [7] und [8]. Die im folgenden gezeigten Werte gelten für die Betriebsart 1 mit Rücklaufemperaturen von 50 °C und die höchste Feuerungsleistung von 11,5 kW. Die Wassermenge wurde dabei auf eine Vorlaufemperatur von 70 °C eingestellt. Die Dichte des Faserkörpers betrug 317 kg/m^3 . Als Katalysatormaterial diente Palladium mit einer Belegungsdichte von 5 g/m^2 , d. h. die absolute Palladiummenge betrug 0,5 g.

Als wichtiges Ergebnis werde zu Anfang die Tatsache genannt, daß mit dem eingesetzten Brennerkörper und dem Gerät alle geforderten Betriebszustände ohne Rückzündung gefahren werden konnten.

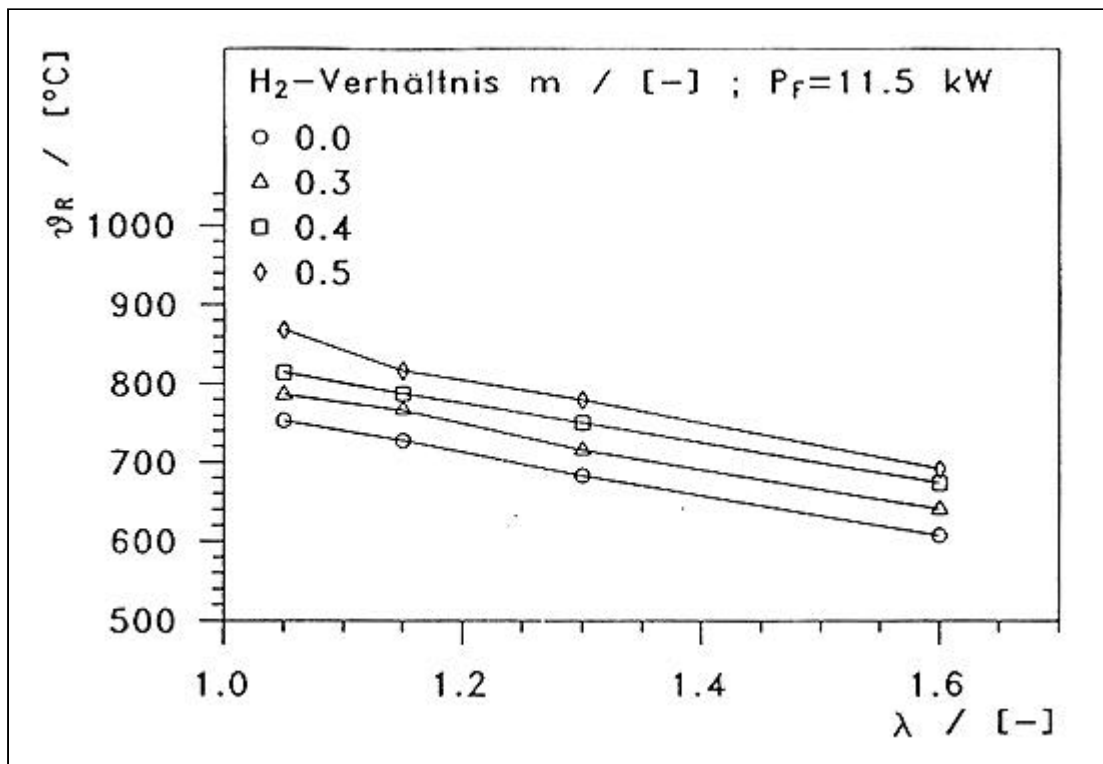


Abb. 4: Reaktionstemperaturen in Abhängigkeit von der Luftzahl

Abb. 4 zeigt die Reaktionstemperaturen in Abhängigkeit von der Luftzahl für die Nennleistung von 11,5 kW. Die Temperaturen stellen einen Mittelwert aus Meßwerten dar, die in drei Ebenen über die Höhe des Brennerkörpers ermittelt wurden. Es ergeben sich eindeutige Abstufungen mit dem Wasserstoffverhältnis m als Parameter. Im gesamten Luftzahlbereich ist die Temperaturspanne für die Extremwerte bei m = 0 bzw. m = 0,5 annähernd konstant etwa 90 K. Nur im Fall der untersten Luftzahl von 1,05 sind die Abweichungen mit 130 K größer. Der Abfall der Reaktionstemperaturen mit steigender Luftzahl ist auf die Kühlwirkung des erhöhten Stickstoffanteils zurückzuführen.

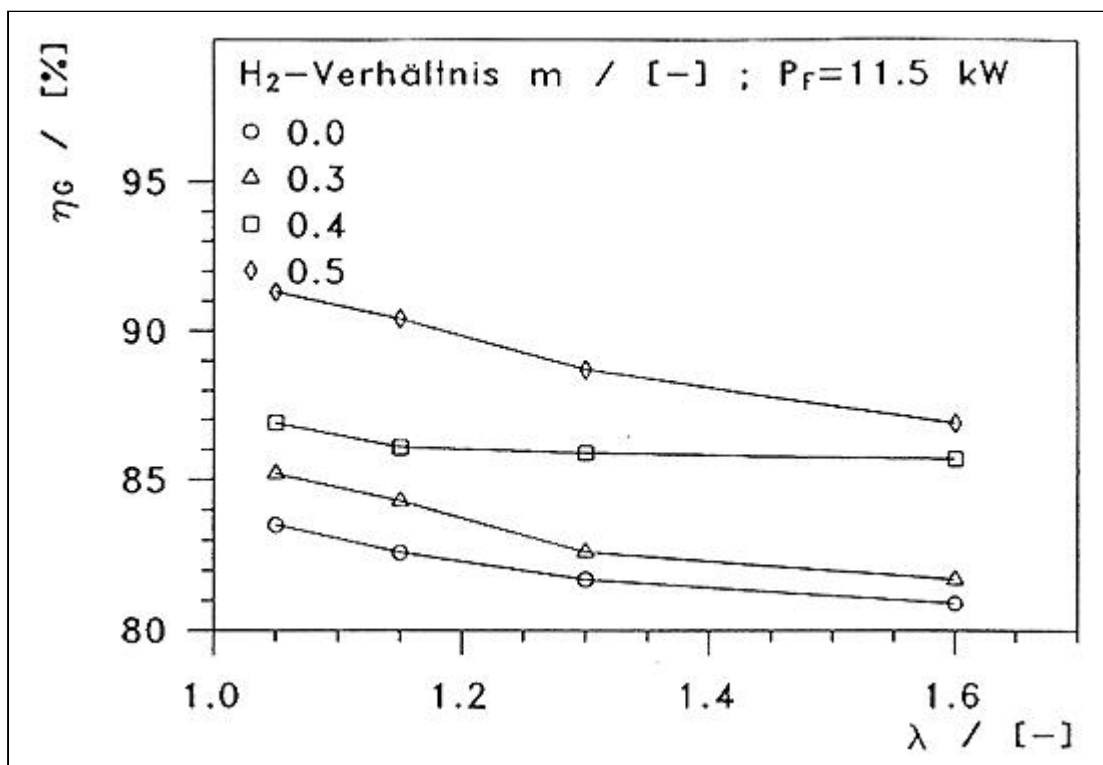


Abb. 5: Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Luftzahl

Ebenfalls mit steigender Luftzahl nehmen die Wirkungsgrade, wie in *Abb. 5* dargestellt ist, ab. Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis aus Kessel- und Feuerungsleistung. Mit Wirkungsgraden von 83,5 % und 81 % weist der Betrieb mit Erdgas die geringsten Werte auf. Die Wirkungsgrade nehmen mit steigendem Wasserstoffverhältnis zu. Bei der höchsten Wasserstoffmenge liegen sie zwischen 91,2 % und 87 %. Die Zunahme der Wirkungsgrade mit zunehmendem Wasserstoffverhältnis ist auf den erhöhten Kondensationsgrad zurückzuführen. Die Wirkungsgrade liegen unter Werten, die in Neunburg vorm Wald an den vorhandenen konventionellen Gasheizkesseln gemessen wurden, siehe [9]. Dies liegt einmal an zu großen Wärmeverlusten in den Stirnbereichen des Gerätes, dann aber auch an den höheren Vor- und Rücklauf Temperaturen, die eine geringere Kondensation des Wasserdampfes zulassen. In der Zwischenzeit wurden die Stirnseiten des Kessels isoliert.

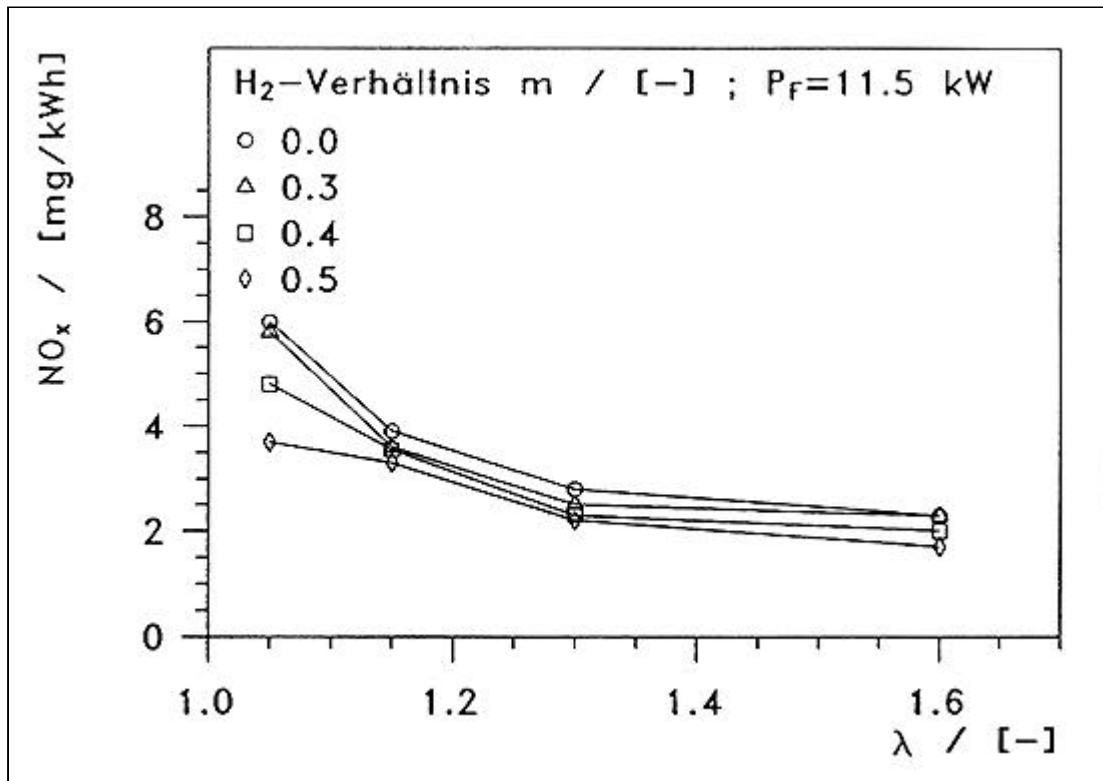


Abb. 6: Stickoxidemissionen in Abhängigkeit von der Luftzahl

Die in *Abb. 6* gezeigten NO_x-Emissionsfaktoren gelten für dieselben Bedingungen wie für die der zuvor besprochenen Abbildungen. Bis auf den nächststöchiometrischen Bereich liegen sie in einem schmalen Band von etwa 0,8 mg/kWh. Gemessen an den in [9] gezeigten Werten sind die hier dargestellten Emissionsfaktoren sehr niedrig, allerdings höher als aus eigenen früheren Untersuchungen bekannt. Die höchsten Werte wurden bei reinem Erdgasbetrieb gemessen. Mit zunehmender Wasserstoffmenge nehmen die NO_x-Werte ab. Dies scheint im Widerspruch zu den in *Abb. 4* gezeigten Reaktionstemperaturen zu stehen, die mit steigendem Wasserstoffanteil zunehmen. Die zur Messung dieser Temperaturen angebrachten Thermoelemente lagen direkt an der Körperoberfläche an. Der Wasserstoff wird bevorzugt in unmittelbarer Nähe der Reaktionszone, d. h. am Palladium, umgesetzt. Daher sind die Reaktionstemperaturen für diesen Fall auch am höchsten. Die hohen Emissionswerte bei der Verbrennung reinen Erdgases lassen auf hohe Temperaturen in der Nachreaktionszone schließen, die aber nicht gemessen werden konnten. Auch die absolute Höhe der NO_x-Emissionswerte läßt den Schluß auf Temperaturen in der Nachreaktionszone zu, die über denen bei heterogen katalysierter Umsetzung, also am Katalysator, liegen.

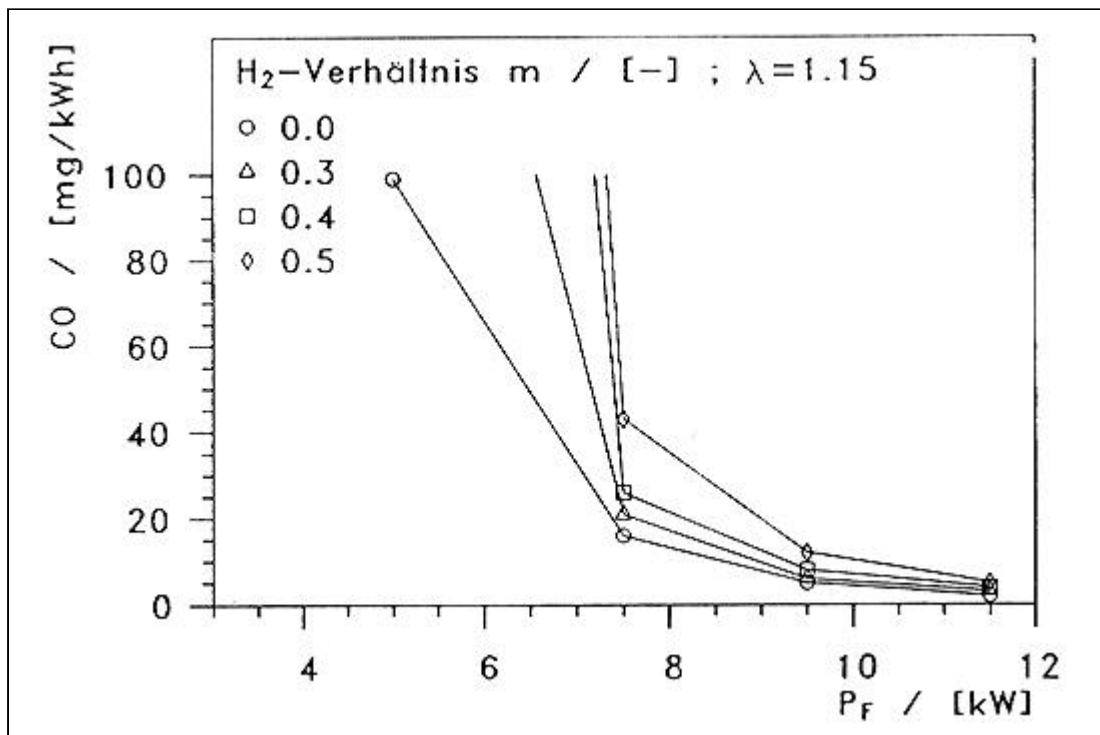


Abb. 7: Kohlenmonoxidemissionen in Abhängigkeit von der Feuerungsleistung

In Abb. 7 sind die Kohlenmonoxidemissionen in Abhängigkeit von der Feuerungsleistung für vier Wasserstoffverhältnisse und die Betriebsluftzahl von 1,15 dargestellt.

Als Grenzwert auf der Ordinate wurde der für den Auslegungsfall geltende Garantiewert von 100 mg/kWh festgelegt. Dieser Wert wurde bei reinem Erdgasbetrieb in allen Fällen unterschritten. Wasserstoffzumischung führt, zumindest im untersten Leistungsbereich, zu weitaus höheren Emissionswerten. Erst ab einer Feuerungsleistung von 7,5 kW wird der zu garantierende Wert unterschritten. Der Abfall der CO-Emissionen mit der Leistung ist auf die höheren Reaktionstemperaturen zurückzuführen. Bei maximaler Brennerleistung sind die Emissionen, selbst im Fall höchster Wasserstoffzumischung, mit Werten zwischen etwa 3 mg/kWh und 7 mg/kWh sehr niedrig. Für den Auslegungsfall werden damit in etwa Ergebnisse erzielt, wie sie in [9] beschrieben werden. Bei Teillast sind sie allerdings deutlich höher. In diesem Bereich bietet der katalytische Brenner zur Zeit noch keinen Vorteil gegen über konventionellen Systemen.

7. Zusammenfassung

Nach einer Beschreibung der Einzelkomponenten, die die Firma Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH (SWB) in einer Solaranlage in Neunburg vorm Wald getestet hat bzw. in einer weiteren Projektphase testen wird, wird ein katalytisches Heizgerät vorgestellt, das in der KFA Jülich entwickelt wurde und im Laufe dieses Jahres an SWB ausgeliefert werden muß. Dieses Gerät soll während der Projektphase II unter realistischen Betriebsbedingungen in Neunburg vorm Wald untersucht werden.

Während der Planungs- und Bauphase wurden in der KFA in zwei Prüfständen zahlreiche Versuche an ausgewählten Brennereinsätzen durchgeführt. Als Versuchsparameter dienten neben der Katalysatormenge pro Flächeneinheit das Wasserstoffverhältnis m , die Luftzahl λ und die Leistungsdichte q . Modifikationen an dem auszuliefernden Brennwertgerät lieferten zufriedenstellende Versuchsergebnisse. Das bezieht sich sowohl auf den rückzündungssicheren Betrieb, und das nicht nur für den Betriebspunkt, als auch auf die niedrigen Emissionswerte. Die Wasserstoffzugabe führt zu höheren Oberflächentemperaturen am Brennerkörper, d. h. der Wasserstoff wird am verwendeten Palladium gut umgesetzt. Die Stickoxidemissionen sind im gesamten untersuchten Bereich mit weniger als 6 mg/kWh recht niedrig. Ein Betrieb bis auf 50 % Teillast ist durchaus möglich. Bei kleinster Leistung und beim

Betrieb mit Wasserstoff liegen die Kohlenmonoxidemissionen jedoch oberhalb des für den Auslegungsfall zu garantierenden Wertes von 100 mg/kWh. Die Reaktionstemperaturen reichen für höhere Umsätze nicht aus. Allerdings wurden die Garantiewerte deutlich unterschritten.

8. Literaturverzeichnis

- [1] *Fuchs, M.*: Wasserstoff aus (Sonnen-) Strom, Ergebnisse und Folgerungen aus einem Demonstrationsprojekt. VGB Kraftwerkstechnik 75, Heft 2, 1995, 101/106.
- [2] *Bröckerhoff, P., Emonts B.*: Flue Gas Emission Characteristics from Methanol, Natural Gas, and Oil Fuelled Burners. Proc. of the 2nd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Vilamoura/Portugal, Vol. II, 1991.
- [3] *Emonts, B.*: Entwicklung und Untersuchung eines katalytischen Strahlungsbrenners zur NO_x-armen Verbrennung von Methanol. D82, Dissertation RWTH Aachen, JÜL-2275 (1989)
- [4] *Ledjeff, K.*: Wasserstoffnutzung durch katalytische Verbrennung. BWK, 39, Nr. 7/8, 1979, 370/374.
- [5] *Trimm, D. L., Lam, Ch. W.*: The Combustion of Methane on Platinum-Alumina Fibre Catalysts-I, Kinetics and Mechanism. Chemical Engineering Science 35, 1980, 1405/1413.
- [6] *Pfefferle, W. C.*: The Catalytic Combustor: An Approach to Cleaner Combustion. J. Energy, 2, No. 3, 1978, 142/146.
- [7] *Bröckerhoff, P., Emonts B.*: Catalytic Combustion of Natural Gas for Heating Appliances. Natural Gas Conversion Conference 1990, Holmen et al. (Editors), Elsevier Science Publishers B. V.; Amsterdam, 1991, 557/563
- [8] *Bröckerhoff, P., Emonts B.*: Use of Hydrogen as an Additive to Natural Gas in a Catalytic Burner. Proc. of the 10th World Hydrogen Energy Conference, Cocoa Beach, Florida/USA 1994, Eds.: Block, D. J.; Veziroglu T. N., Band 3, 1994, 1581/1589.
- [9] *Hoelzner, K., Szyszka A.*: Heizen mit Wasserstoff-Erdgas-Gemischen, Neunburg vorm Wald: erste Versuchsergebnisse aus der Phase 1. Energie, Jahrgang 45, Nr. 6, 1993, 38/44.