

PIV Messungen in einer Brennkammer bei der katalytischen Verbrennung von Wasserstoff

Thomas Panten, Janusz A. Szymczyk
Fachhochschule Stralsund, University of Applied Sciences
Fachgebiet für Strömungslehre und Strömungsmaschinen
18435 Stralsund, Zur Schwedenschanze 15

Abstract

Gegenstand dieser Arbeit ist die Untersuchung der Strömungsvorgänge in einer Brennkammer bei der katalytischen Verbrennung von Wasserstoff. Die Art der Strömung ist entscheidend für den Wärmetransport und somit für die Ausbildung der Temperaturen im Nahbereich der Brennkammer. Für die Untersuchungen wurden bei verschiedenen Verbrennungsparametern die Geschwindigkeitsfelder und die Temperaturfelder, die beim Ausströmen des Wasserstoffes durch die Poren der Brennkammer entstehen, ermittelt.

1. Einleitung

Bei der katalytischen Reaktion des Wasserstoffes mit dem Sauerstoff aus der zugeführten Verbrennungsluft kommt es zu unterschiedlich ausgebildeten Reaktionszonen auf der Oberfläche der porösen Brennkammer. Durch die mit Platin dotierte Brennkammer wird die Starttemperatur der Verbrennung und auch die Reaktionstemperatur bei der thermischen Umsetzung von Wasserstoff herabgesetzt. Bei diesen geringeren Temperaturen wird die Bildung von thermischen Stickoxiden minimiert oder ganz verhindert.

Die Katalytische Verbrennung stellt damit auch einen Teil bei der nachhaltigen Nutzung von regenerativen Energien dar. In der Erzeugung von Warmwasser für die Heizung können modifizierte Kessel eingesetzt werden. Ein Entwicklungsschwerpunkt ist die Reduzierung der Anzahl der Brennkammern bei einer vergleichbaren Leistung, um so die Investitionskosten für diese Anlagen zu senken.

2. Versuchsaufbau

In den Versuchen erfolgt die gleichzeitige Messung der Geschwindigkeitsfelder mit der Particle Image Velocimetry und die Erfassung der Temperaturfelder mit einer Infrarotkamera. Für die Temperaturmessungen in der Umgebung der Brennkammer werden Thermoelemente eingesetzt, um die Ausbreitung der Wärme in die Umgebung zu untersuchen. Für die Messung der Temperatur auf der Oberfläche der Brennkammer wird eine Infrarotkamera eingesetzt, die neben der statischen Ausbreitung der Wärme durch die Wärmeleitung in der Lage ist durch die hohe Bildfolgefrequenz die sich verändernden Reaktionszonen darzustellen. Die Untersuchungen werden bei verschiedenen Verbrennungsluftverhältnissen und damit unterschiedlichen Wasserstoffvolumenströmen durchgeführt. Durch die eingestellten Verbrennungsparameter wird sichergestellt, dass die Verbrennung im Bereich der kontrollierten katalytischen Verbrennung stattfindet.



Abb. 1: Versuchstand Prozess und PIV - Messtechnik



Abb.2: Versuchstand Prozess und Infrarot - Messtechnik

3. Durchführung der Experimente

Für die Bestimmung der Geschwindigkeitsfelder wird der Nahbereich um die Brennerkerze ausgewählt, in dem durch den Umsatz des Wasserstoffes in Wärme die kinetische Energie der Strömung zunimmt. Dazu werden verschiedene Versuchsbedingungen eingestellt. Die Versuche werden mit einem Wasserstoffvolumenstrom von $Q_{H_2} = 1$ l/min bis zu $Q_{H_2} = 4$ l/min und einem Luftvolumenstrom von $Q_{Air} = 6$ l/min durchgeführt. Das Verbrennungsluftverhältnis λ für die Verbrennung stellte sich bei den unterschiedlichen Bedingungen zwischen 2,5 und 7,5 ein. Diese Parameter und die gemessene Temperatur in dem nahen Feld der Brennerkerzen sind vergleichbar mit den Werten, die in früheren Arbeiten an einem realen Brennkessel ermittelt wurden.

Die Experimente werden bei der reinen Luftströmung um die Kerze, bei dem Ausströmen des kalten Wasserstoffes durch die Brennerkerze und bei den realen Verbrennungsbedingungen durchgeführt.

Die Aufnahme der Messwerte bei der Verbrennung erfolgt nach dem Einstellen eines stabilen Arbeitspunktes, der bei der Verbrennung nach wenigen Minuten erreicht war. Durch die Erwärmung der Brennerkerze nimmt die Porengröße des Brenners ab und es kommt zu einer Verminderung des Wasserstoffvolumenstromes. Ist die homogene Verbrennungstemperatur erreicht, werden mit den Thermoelementen und der Infrarotkamera die Temperaturen auf der Oberfläche bestimmt. Gleichzeitig zu diesen Messungen wird das Geschwindigkeitsfeld um die Brennerkerze ermittelt.

Als Partikel kommen Titandioxidteilchen mit einem Durchmesser von $10 \mu\text{m}$ zum Einsatz. Die Partikel werden mit einem Feststoffdispersierer erzeugt und der Verbrennungsluft zugeführt. In der unmittelbaren Nähe der Brennerkerze entsteht bei der Verbrennung eine Grenzschicht, in der die mit Partikeln versetzte Verbrennungsluft von dem austretenden Reaktionsgemisch verdrängt wird. Es hat sich gezeigt dass die resultierende Geschwindigkeit in dieser Zone durch den erhöhten Energieeintrag, verursacht durch die Verbrennung, maßgeblich beeinflusst wird.

3.1 Messungen mit der Infrarotkamera

Die Infrarotmessungen erfolgten mit einem Thermographiesystem Jade III MWIR der Firma Infratec. Dieses System ist in der Lage Thermographieaufnahmen mit einer Bildfolgefrequenz von bis zu 800 Hz zu arbeiten und erfasst die Infrarotstrahlung in einem Spektralbereich von 3 bis 5 μm . In diesem Bereich wird die Transmission der

Strahlen durch die Quarzglasfenster der Brennkammer sichergestellt. Die hohe thermische Auflösung mit bis 30 mK bei 25°C wird durch den InSb-Hybrid Detektor sichergestellt.

Die zeitliche Auflösung erlaubt die Messung der Temperaturverteilung auf der Oberfläche der Brennkammer. Die Veränderung der Reaktionszonen wird durch die Porengröße und die Oberflächentemperatur maßgeblich beeinflusst. Die Reaktionszonen stellen die Bereiche auf der Brennkammeroberfläche dar, in denen es zu der Reaktion des Wasserstoffes mit dem Luftsauerstoff kommt.

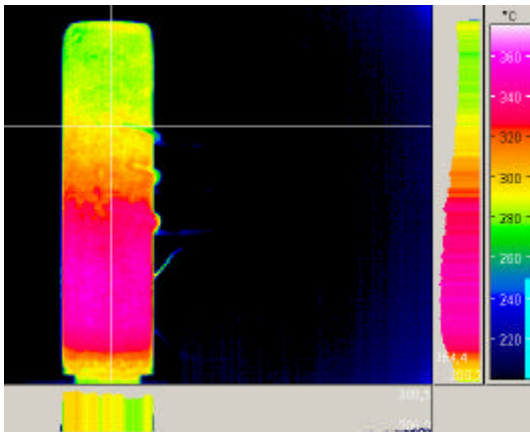


Abb. 3: Infrarotaufnahme bei $Q_{H_2} = 1$ l/min

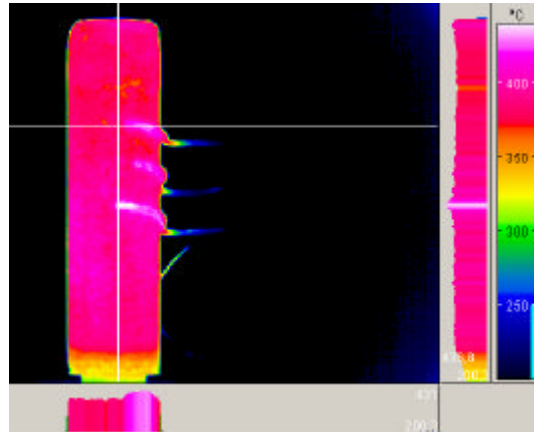


Abb.4. Infrarotaufnahme bei $Q_{H_2} = 2$ l/min

In den Abb.3 und Abb. 4 ist ersichtlich, dass sich bei unterschiedlichen Wasserstoffvolumenströmen das Temperaturniveau auf der Oberfläche der Brennkammer verändert. Bei dem höheren Wasserstoffvolumenstrom stellt sich eine homogene Erhitzung der Brennkammer ein (Abb.4). Am effektivsten wird der Wasserstoff im unteren Bereich der Brennkammer umgesetzt. Die Reaktionstemperatur ist deutlich höher als am oberen Ende der Brennkammer, wodurch die Reaktionszonen unterschiedlich ausgebildet werden. Das lässt auf ein ungleichmäßiges Ausströmen des Wasserstoffes in den unterschiedlichen Reaktionszonen schließen. Die ungleiche Verteilung der Reaktionszonen kann durch eine Veränderung der Brennergeometrie und des inneren Aufbaus ausgeglichen werden. Der Längsschnitt durch die Brennkammer wird in den folgenden Diagrammen (Abb.5) veranschaulicht.

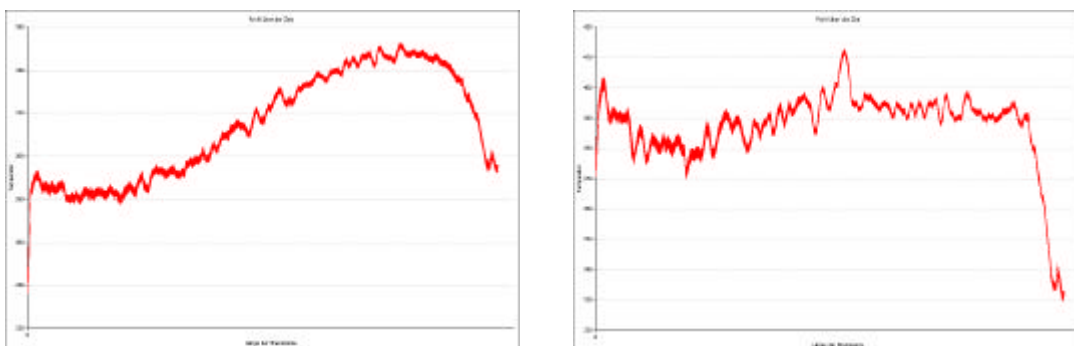


Abb. 5: Temperaturprofile im Längsschnitt der Brennkammer bei $Q_{H_2} = 1$ l/min und $Q_{H_2} = 2$ l/min

Die Temperaturprofile ergeben sich bei Berechnung aus mindestens 10 aufeinanderfolgenden Aufnahmen, die im Abstand von einer Sekunde mit einer Infrarotkamera aufgenommen wurden. In dieser Abbildung lässt sich auch erkennen, dass der Verlauf der Temperaturen in der Längsachse eine Ungleichverteilung erkennbar ist.

3.2 Messungen mit der Particle Image Velocimetry

Für die Messungen wird das PIV 200 System der Firma TSI eingesetzt. Dieses PIV-System arbeitet mit einer mittleren Leistung von 160 mJ pro Puls bei einer Pulslänge von 10 ns und einer Frequenz von 7,5 Hz. Bei den Experimenten wurden die Aufnahmen mit der Kreuzkorrelationskamera PIV 10/30 aufgenommen und die Auswertung erfolgte über die Kreuzkorrelation der beiden Aufnahmen. Die Auswertung der Strömung in der unmittelbaren Umgebung der Brennerkerze stellt ein Schwerpunkt der Untersuchungen dar.

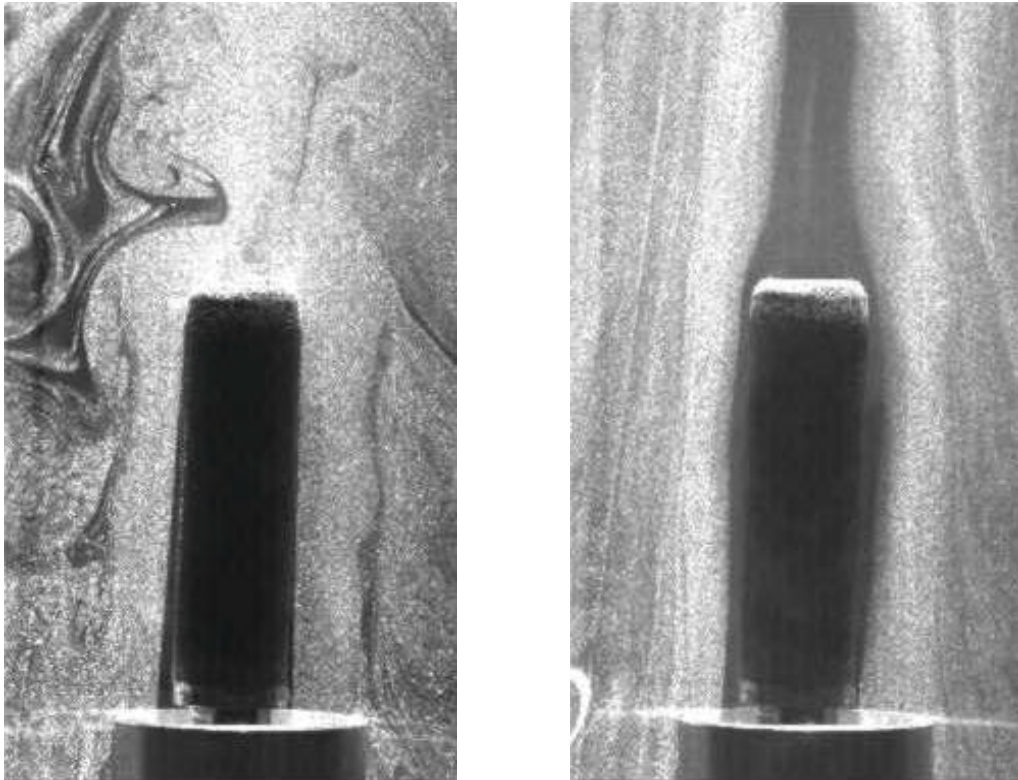


Abb. 6: Strömungsfeld um die Brennerkerze mit und ohne Verbrennung

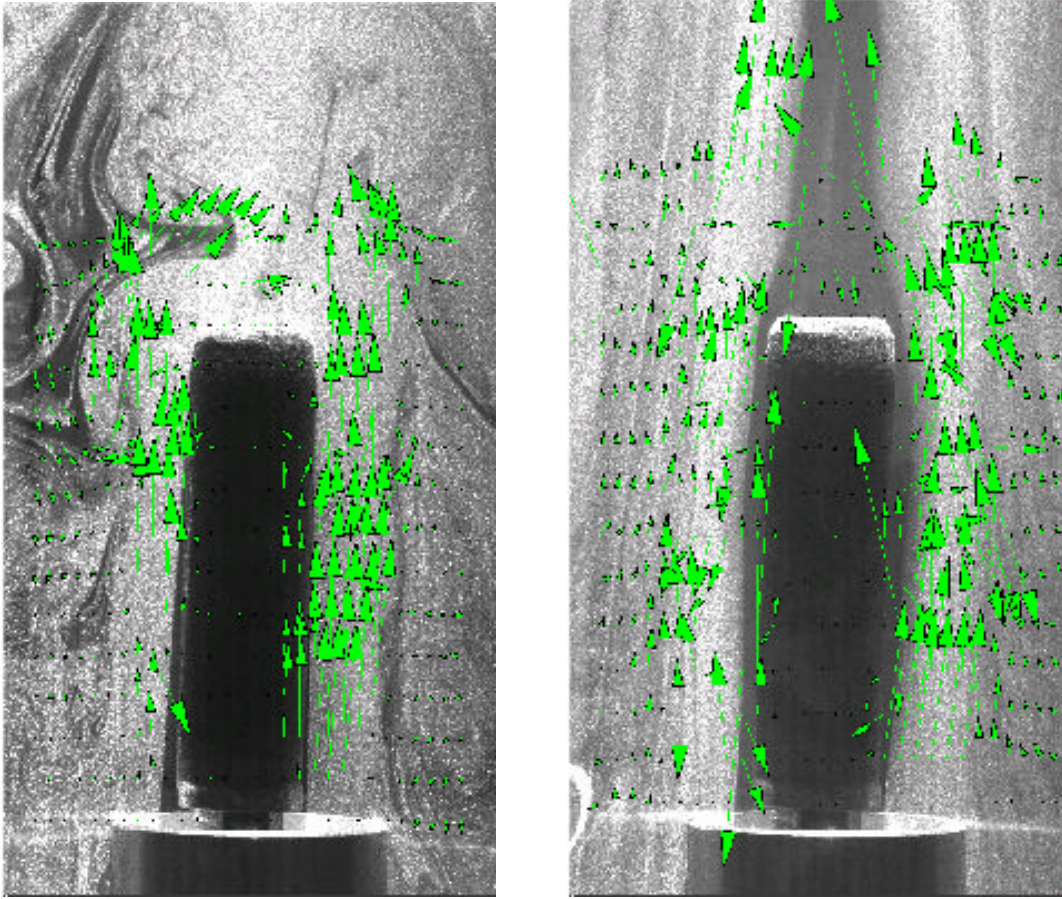


Abb. 7: Strömungsfeld und Vektorfeld um die Brennerkerze ohne und mit Verbrennung

Bei den Strömungsfeldern (Abb. 7) ist zu erkennen, dass bei der Verbrennung dem entstehenden Reaktionsgemisch, bei der katalytischen Verbrennung ist es Wasserdampf, Wärmeenergie zugeführt wird. Diese äußert sich in einer Zunahme der Geschwindigkeit in der direkten Umgebung der Brennerkerze.

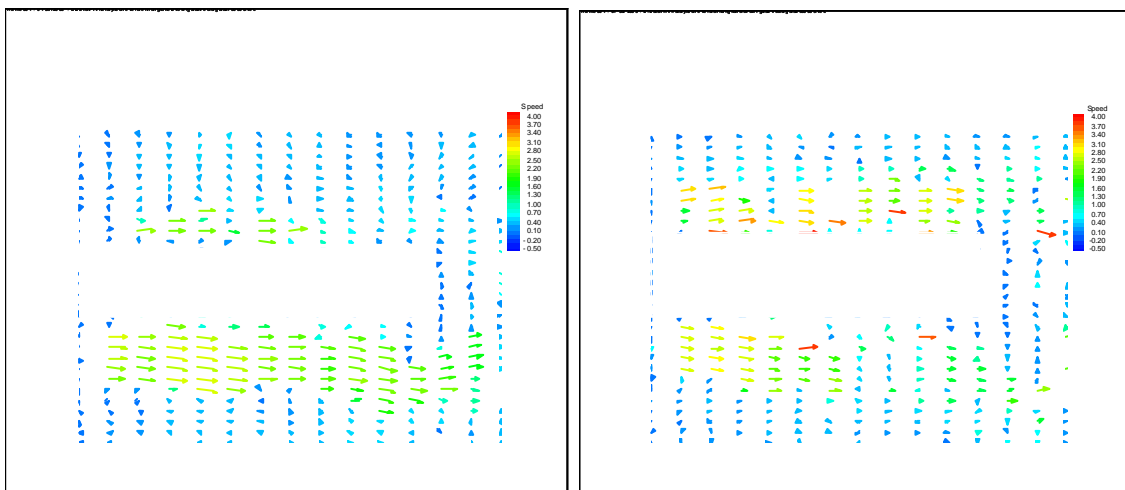


Abb. 8: Geschwindigkeitsfelder mit und ohne Verbrennung

Die starke Verzerrung der Strömung ist auf die nicht homogene Verbrennung und dem ungleichen Ausströmen des Reaktionsgemisches zurückzuführen. In dem Nah-

bereich der Brennkerze ist eine Abnahme der Partikelintensität zu erkennen, welche die Auswertung in diesem Bereich erschwert, da nicht genügend Information aus der Partikelverschiebung zur Verfügung stehen. Durch die Zuführung an Wärmeenergie kommt es zu den höheren Strömungsgeschwindigkeiten. Dieses ist mit dem erhöhten Auftrieb des Reaktionsgemisches zu erklären

4. Zusammenfassung

Bei den durchgeführten Versuchen wurde eine katalytische Verbrennung an zylindrischen Brennkerzen durchgeführt. Es wurden die Temperaturfelder mit einer Infrarotkamera und mit Thermoelementen bestimmt. Bei den Untersuchungen mit unterschiedlichen Wasserstoffvolumenströmen wurden unterschiedliche Ausbreitungen der optimalen Reaktionszonen auf der Oberfläche der Brennkerze und im Nahbereich des Brenners wie erwartet festgestellt.

Mit einer Veränderung der Brennkerzengeometrie in eine Kegelform lassen sich in den Bereichen mit einem geringeren Wasserstoffvolumenstrom und damit ebenso geringerer Reaktionstemperatur bessere Ergebnisse erzielen.

5. Ausblick auf weitere Untersuchungen

Diese Ergebnisse werden in folgenden Versuchen quantitativ bestimmt, wobei die Wärmestrahlung der Brennkerze bei unterschiedlichen Temperaturen bestimmt wird.

Die Lage der Brennkerzen wird einen weiteren Schwerpunkt der Untersuchungen darstellen, um mit dieser Veränderung den Einfluss der Gravitation auf die Reaktionszonen zu untersuchen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Kultusministerium des Landes Mecklenburg Vorpommern und dem Institut für Energie und Umwelt e.V. für die Förderung des Projektes.

Literatur

- [1] *Ledjeff-Hey, K.*: „A catalytic Hydrogen-oxygen heater a self limitation reaction“ World Hydrogen Energy Conference, Toronto 1984
- [2] *C.-J. Winter, J. Nitsch.*: „Wasserstoff als Energieträger“ Technik, Systeme, Wirtschaft – Berlin Heidelberg, New York 1988
- [3] *Pfefferle, L.D.; Pfefferle W.C.*: „Catalysis in Combustion“ Catal. Rev-Sci. Eng 1987
- [4] *Blazowski W.S. Walsh. D.E.*: „Catalytic combustion: An important consideration for future applications.“ Combustion Science and Technologie 10 1975