

# Numerische Untersuchung einer schadstoffarmen Wasserstoffbrennkammer für Kleingasturbinen

**Oliver Borm, Kurt Eckerstorfer**, Technische Universität Graz, Graz

## Kurzfassung

Bei der Verbrennung von Wasserstoff mit Luft in einer Kleingasturbine besteht die Wesentliche Herausforderung darin lokale Temperaturspitzen sowie eine lange Verweilzeit in diesen Bereichen zu vermeiden, da beides zusammen ursächlich für hohe Stickoxidemissionen sind. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein innovatives Verbrennungskonzept basierend auf einem Micro-Mixer numerisch analysiert. Die Brennstoff-Luft-Mischung erfolgt in mehreren Einzeldüsen, dadurch kann die Mischstrecke verkürzt sowie eine kompakte Flamme mit niedrigen Verweilzeiten erzeugt werden. Dies führt schlussendlich zu niedrigeren  $\text{NO}_x$  Emissionen.

## 1. Einleitung

In den vergangenen Jahren kam es zu einem rasanten Ausbau der erneuerbaren Energien. Etwa 45% der in Deutschland installierten Kraftwerksleistung von insgesamt ca. 195 GW entfallen auf erneuerbare Energien, jedoch werden von den 590 TWh Strom nur 25% durch diese bereitgestellt. Im Wesentlichen besteht also die Diskrepanz zwischen dem aktuellen Strombedarf sowie der aktuell vorhandenen Produktionsmenge, da Wind und Sonne natürlichen Schwankungen unterliegen. Der volatile Anteil am Strommix wird daher zukünftig weiter ansteigen. Da sich Strom langfristig nicht direkt speichern lässt, besteht eine Möglichkeit darin überschüssigen Strom mithilfe der Power-to-Gas Technologie durch Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff aufzutrennen. Der so gewonnene Wasserstoff kann anschließend in einer Kleingasturbine zur bedarfsgerechten Stromerzeugung genutzt werden. Bei der Verbrennung von Wasserstoff mit Luft können nur Stickoxidemissionen auftreten. Um diese möglichst gering zu halten wird im Rahmen dieser Arbeit ein geeignetes Brennkammerkonzept numerisch analysiert.

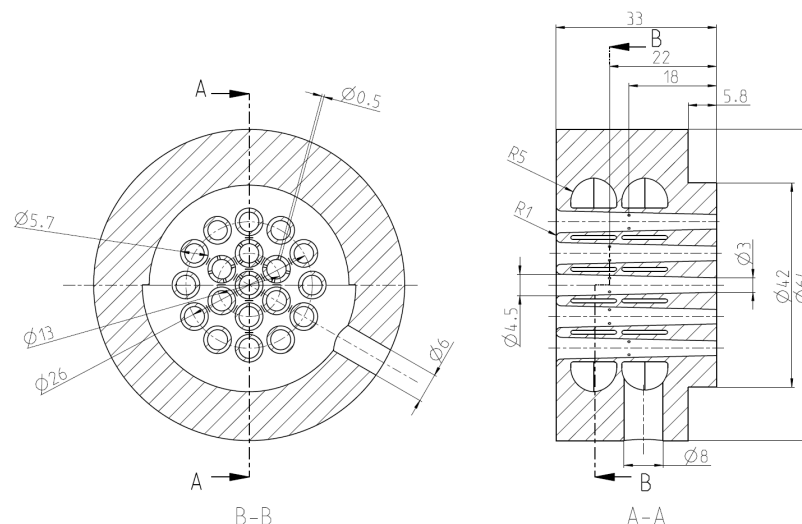
## 2. Geometrie

Der Micro-Mixer, ein neuartiger Mischer zur Eindüsung von wasserstoffreichen Brennstoffen wurde in ähnlicher Weise bereits von Marek et al. [1] und York et al. [2] beschrieben. Bei diesem Konzept wurde vor allem auf einen akzeptablen Druckverlust sowie ein rückzündfreies Betriebsverhalten geachtet. Realisiert wird das Ganze durch die Verwendung

mehrerer Düsen mit geringen Durchmessern, in denen durch kleine Bohrungen in den Wänden der Brennstoff in die vorbeiströmende Luft eingebracht wird. Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft muss dabei über der turbulenten Brenngeschwindigkeit der Mischung liegen, um einen Flammenrückschlag und die damit verbundene Zerstörung des Mixers zu verhindern. Zur Erreichung einer entsprechenden Durchmischung des Brennstoffs und der Verbrennungsluft innerhalb der Düse, sollte die Länge ab der Position der Brennstoffinjektion bis zum Düsenaustritt bezogen auf den Düsendurchmesser einen Wert zwischen 1 und 10 ergeben. Um den Mischer fertigungsgerecht auslegen zu können, wurde mit der Fa. Anton Paar ShapeTec, welche Metallwerkstücke in 3D Druck fertigen können, Rücksprache gehalten. Bei dem 3D Druckverfahren können Wandstärken sowie Lochdurchmesser bis zu einem Minimalwert von 0,5 mm fehlerfrei abgebildet werden. Die Aufteilung der Düsen wurde hinsichtlich folgender Parameter ausgelegt:

- Anströmdurchmesser (33mm)
- Maximaler Düsendurchmesser am Eintritt
- Maximale Düsenanzahl
- Geringe Mischerlänge

Des Weiteren sollten, um schon bei der Injektion des Wasserstoffs eine gute Verteilung zu erreichen, eine möglichst große Anzahl an Düsen verwendet werden. Um den Druckverlust des Micro-Mixers zu minimieren, wurde auf eine möglichst geringe Querschnittsverengung am Eintritt des Mixers geachtet. Zusätzlich sollte eine geringe Länge gewählt werden.



**Abbildung 1: Abmessungen Micro-Mixer**

Das Ergebnis dieser Optimierung ist in Abbildung 1 zu sehen. Innerhalb der vorgegebenen Querschnittsfläche befinden sich nun 19 Düsen mit einem Eintrittsdurchmesser von 4,5 mm. Der Austrittsdurchmesser wurde mit 3 mm vorgegeben. Durch die kegelige Form soll die Strömung beschleunigt und somit ein Flammrückschlag in den Micro-Mixer verhindert werden. Zwischen den Düsen wurde noch genügend Platz vorgesehen, sodass sich der Wasserstoff ungehindert ausbreiten kann. Des Weiteren wurde jede der einzelnen Düsen mit

4 kleinen Wasserstoffinjektionslöchern ( $\varnothing$  0,5 mm) versehen. Die Versorgung der 19 Düsen wurde, wie weiters im rechten Bildteil zu sehen, auf zwei separate Kammern aufgeteilt, um prinzipiell eine gestufte Verbrennung zu ermöglichen. Dabei werden die 12 Düsen im äußeren Ring durch die stromab liegende und die sechs Düsen des inneren Rings sowie die mittlere Düse durch die stromauf liegende Kammer versorgt. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Längen für die Mischstrecke. Die Wasserstoffinjektionslöcher haben Abstände von 18 mm bzw. 22 mm bis zum Düsenaustritt wodurch sich Längen zu Durchmesser Verhältnisse (bezogen auf den Austrittsdurchmesser) von 6 bzw. 7,3 ergeben. Durch die Annahme, dass die mittleren Düsen schon aufgrund der Anströmung mit einer höheren Geschwindigkeit, bzw. einem höheren Impuls der Verbrennungsluft durchströmt werden, wurde hier die längere Mischstrecke vorgesehen. Um für eine sanfte Einströmung der Verbrennungsluft zu sorgen, sind die Düsen am Einlauf (rechter Bildteil, linke Seite) leicht abgerundet.

### 3. CFD Modell

Der Micro-Mixer wird an eine generische Rechteckbrennkammer mit einer quadratischen Grundfläche (60x60mm) angeflanscht, damit im späteren Versuchsbetrieb ein optischer Zugang realisiert werden kann. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 2 zu sehen. Das Rechengebiet ist mit einem Polyedernetz mit 6,1 Mio. Zellen vernetzt. Als CFD Löser wird OpenFOAM mit einem FGM Verbrennungsmodell verwendet. Dieses wurde am KIT von Kern [3], Galeazzo et al. [4] sowie Eiberger et al. [5] entwickelt. Dabei wurden folgende Randbedingungen gesetzt:

- $P_{th} = 100$  kW
- $\lambda = 2$
- $T_{Luft,in} = 509,69$  K
- $T_{H_2,in} = 300$  K
- $p_{out} = 589010$  Pa
- k-omega SST Turbulenzmodell
- Adiabate Wandrandbedingungen
- Periodische Randbedingungen
- $H_2$  Mechanismus von Conaire [6]

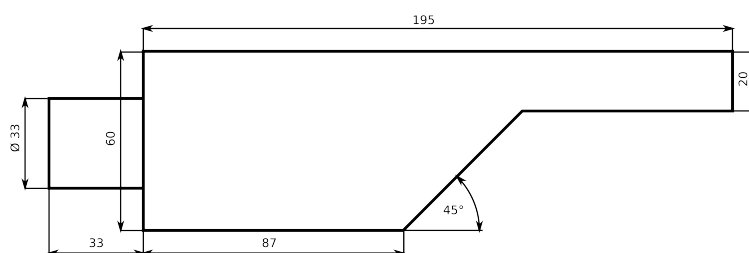


Abbildung 2: Geometrie Rechteckbrennkammer

Die tabellierte Chemie des FGM Modells enthält keinen  $\text{NO}_x$  Submechanismus. Um die  $\text{NO}_x$  Emissionen trotzdem abschätzen zu können, wurde mithilfe von Cantera [7] ein perfekter Rührkesselreaktor simuliert. Basierend auf den Ergebnissen der CFD Simulation sowie der Geometrie des Micro-Mixers wurde ein zylindrisches Volumen mit einem Durchmesser von 33 mm sowie einer Länge von 66 mm angenommen. Zur Variation der adiabaten Flammentemperatur wurde bei konstanter thermischer Leistung der Luftmassenstrom variiert, um den relativen Einfluss lokaler Temperaturspitzen abschätzen zu können. Da die Dichte bei einer höheren adiabaten Flammentemperatur, respektive kleinerer Luftzahl, sinkt, steigt die Verweilzeit bei kleineren Luftzahlen nur geringfügig. Des Weiteren wurde der  $\text{H}_2$  Reaktionsmechanismus von Conaire et al. um den  $\text{NO}_x$  Submechanismus des GRI 3.0 [8] erweitert.

#### 4. Ergebnisse

Die Brennkammer weist einen Ausbrenngrad von  $\eta_b = 99,99 \%$  sowie einen relativen Druckverlust von  $\Delta p = 5,06 \%$  auf. Der Druckverlust ist im Wesentlichen der Tatsache geschuldet, dass die Strömung in den kegeligen Düsen auf bis zu 140 m/s beschleunigt wird. Dies ist deutlich im Mittelschnitt bei  $x = 30 \text{ mm}$  in Abbildung 3 zu sehen. Die einzelnen Gasstrahlen mischen sich relativ schnell aus und sind bereits nach 70 mm relativ homogen. Dies entspricht etwa 2-3 mal dem Außenkreisdurchmesser des Mischer von 30 mm, bzw. 23 mal dem Durchmesser einer Einzeldüse.

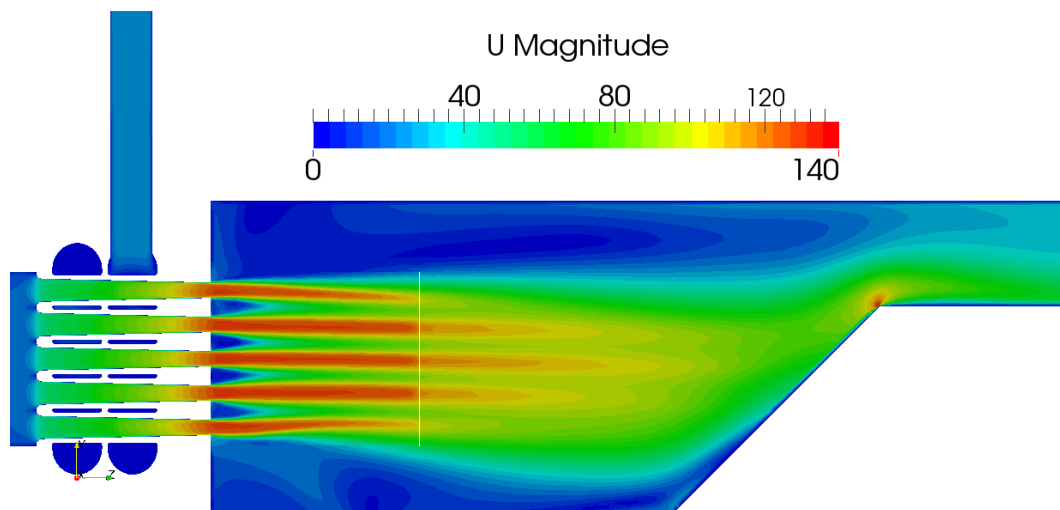


Abbildung 3: Betrag der Geschwindigkeit

Die Verteilung des Wasserstoffs ist in Abbildung 4 in Form des Molenbruchs dargestellt. Der Mittelschnitt schneidet, analog zu Abbildung 1, konstruktionsbedingt nicht direkt die 0,5 mm Bohrung. Deshalb gibt es erst etwas stromab der  $\text{H}_2$  Injektionen eine nennenswerte  $\text{H}_2$

Konzentration, da sich der Wasserstoff erst noch in Umfangsrichtung ausbreiten muss. Der Impuls des Wasserstoffs ist aufgrund dessen geringer Dichte relativ niedrig. Daher kann auch bis zum Mischeraustritt keine homogene Brennstoff-Luft-Verteilung erreicht werden. Insbesondere im Bereich der Düsenwände finden sich noch fette bzw. stöchiometrische Zonen. Bei einer Luftzahl von  $\lambda = 2$  müsste der Wasserstoffmolenbruch etwa 14,5 Vol.-% betragen.

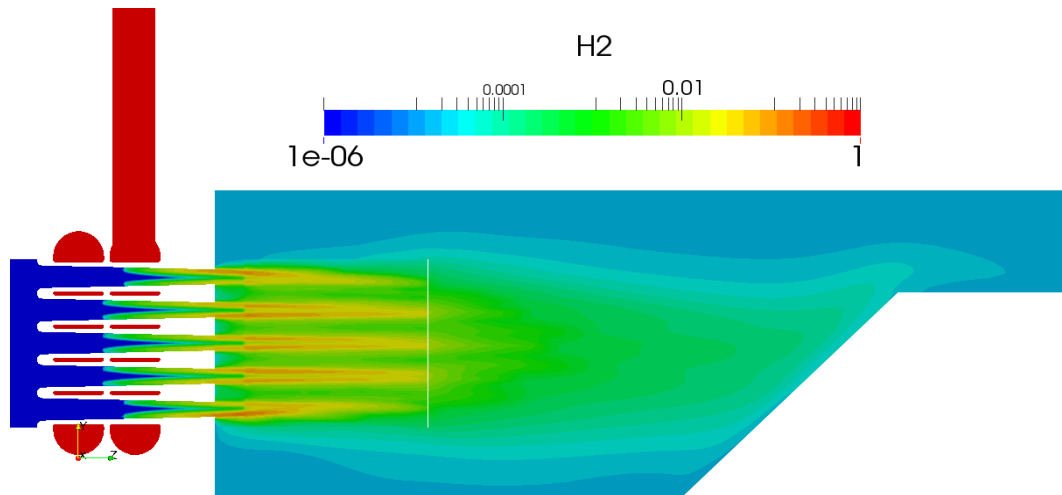


Abbildung 4:  $H_2$  Molenbruchverteilung

Die Analyse der internen Flammenstruktur erfolgt durch eine OH Isofläche. Aufgrund der Symmetrie der Brennkammer ist in Abbildung 5 nur die hintere Hälfte der Isofläche mit der Temperaturverteilung dargestellt. An jeder Düsenöffnung sind die vier diskreten  $H_2$  Injektionen noch deutlich zu erkennen. Die Verbrennung startet direkt nach dem Eintritt in die Brennkammer. Ein Flammenrückschlag in die Vormischzone konnte im Rahmen dieser Untersuchung jedoch nicht festgestellt werden.

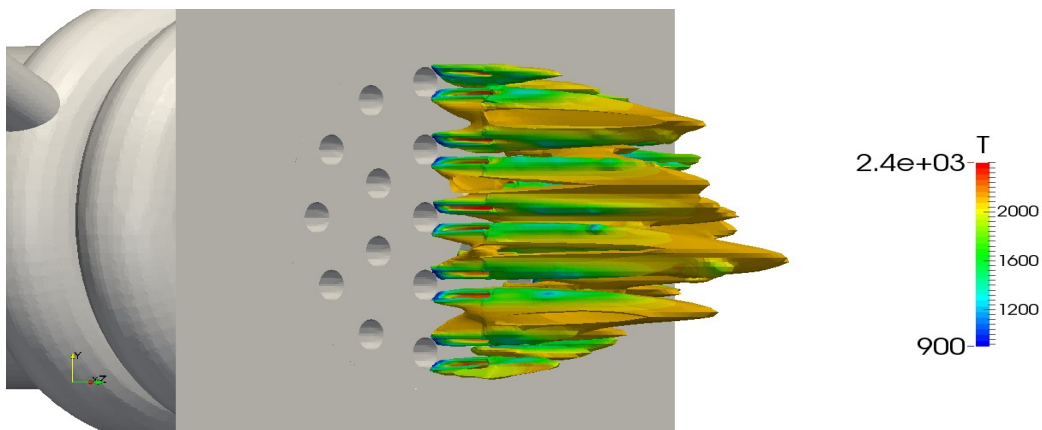
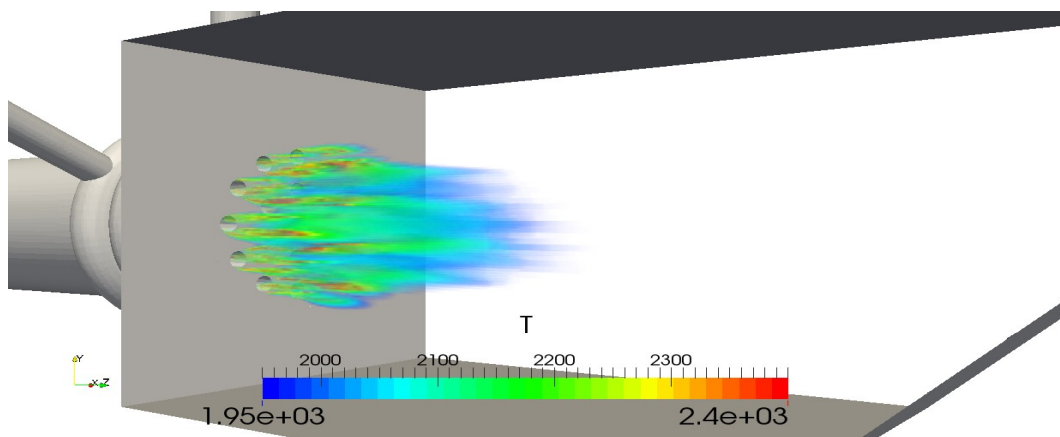


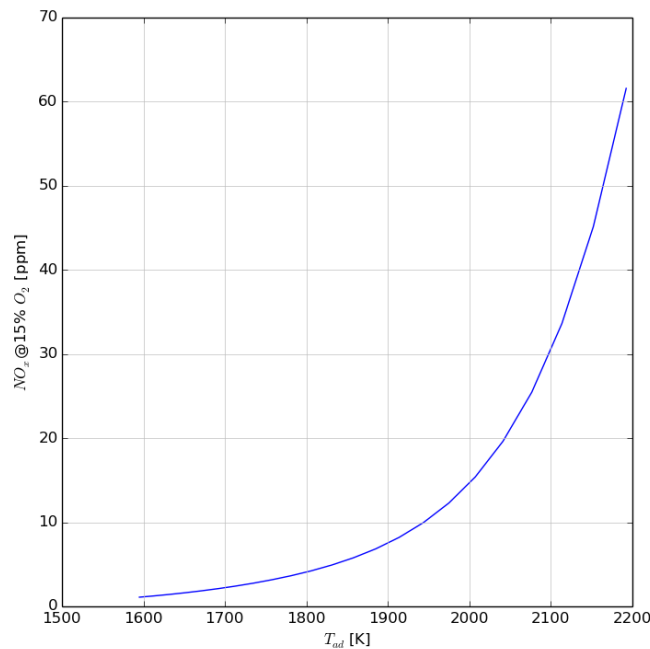
Abbildung 5:  $X_{OH} = 0,0025$  Isofläche

Ein Großteil der Isoflächentemperatur ist im Bereich von etwa 2100 K oder deutlich darunter. Nur in einem sehr kleinen Bereich nahe an der Düsenöffnung können auf einer Länge von etwa 5 mm deutlich höhere Temperaturen von bis zu 2400 K detektiert werden. Dies ist der Bereich mit der lokal schlechtesten Durchmischung. Dadurch brennt die Flamme dort bei stöchiometrischen Verhältnissen. Um eine qualitative Beurteilung der Reaktionszone zu ermöglichen, wurden in Abbildung 6 nur die Zellen mit einer Temperatur größer 1950 K durch ein Volume Rendering dargestellt. Diese Zone erstreckt sich dabei im Kern nur bis etwa 2 mal dem Mischer Außenkreisdurchmesser von 33 mm. Im äußeren Bereich erstreckt sich die Zone hoher Temperatur nur bis etwa 30mm nach dem Mischer. Des Weiteren wird deutlich, dass die Temperatur in weiten Teilen des Gebietes deutlich unter 2200 K liegt. Nur in sehr kleinen Bereichen stöchiometrischer Verbrennung sind die lokalen Temperaturspitzen bis zu 2400 K wieder erkennbar.



*Abbildung 6: Qualitative Flammenstruktur (Zellen  $T > 1950\text{K}$ )*

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde, wie bereits erläutert, zur Abschätzung der  $\text{NO}_x$  Emissionen die Reaktionszone als perfekter Rührkesselreaktor modelliert. Die  $\text{NO}_x$  Emissionen bei 15 Vol.-%  $\text{O}_2$  sind in Abbildung 7 in Abhängigkeit der adiabaten Flammentemperatur dargestellt. Bei einer perfekt vorgemischten Flamme mit  $\lambda = 2$ , entspricht in diesem Fall etwa  $T_{\text{ad}} = 1800\text{ K}$ , sollten die  $\text{NO}_x$  Emissionen unter 5 ppm liegen. Aufgrund der nur partiellen Vormischung und damit lokal fetteren Zonen steigen sowohl die  $\text{NO}_x$  Emissionen als auch die adiabate Flammentemperatur. Da nicht das ganze Volumen der turbulenten Reaktionszone eine gleichmäßige Temperatur aufweist und damit die mittlere Verweilzeit bei hohen Temperaturen unter denen des Rührkesselreaktors liegen sollte, werden in diesem Fall die  $\text{NO}_x$  im Bereich von 15 ppm bis 40 ppm abgeschätzt.



*Abbildung 7: NO<sub>x</sub> Emissionen Rührkesselreaktor*

## 5. Zusammenfassung

Es wurde ein innovatives Brennkammerkonzept für die Wasserstoffverbrennung in einer Kleingasturbine numerisch mithilfe des FGM Modells in OpenFOAM untersucht. Der Brennstoff wird dabei partiell in einem Micro-Mixer in insgesamt 19 Düsen unter mageren Bedingungen partiell vorgemischt. Aufgrund der kurzen Mischungslänge konnte kein perfekt homogenes Gemisch am Düsenaustritt erreicht werden. Dies führt zu lokal fetteren Bereichen mit den dazugehörigen Temperaturspitzen, welche schlussendlich für höhere NO<sub>x</sub> Emissionen ausschlaggebend sind. Jedoch können fertigungsbedingt die H<sub>2</sub> Injektionslöcher zur weiteren Erhöhung des Brennstoffimpulses nicht weiter verringert werden. Für eine bessere Durchmischung soll daher zukünftig noch eine Konfiguration mit nur zwei Injektionen pro Düse untersucht werden. Des Weiteren wurde für den gewählten Betriebspunkt bei 100 kW thermischer Leistung kein Flammrückschlag festgestellt.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde teilweise durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen des „Hy4JetEngines“ Projekts des TAKE OFF Programms finanziert. Sowie N. Zarzalis und F. Eiberger vom KIT für die Bereitstellung des FGM Löser in OpenFOAM.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] C. John Marek; Timothy D. Smith; Krishna Kundu, “*Low Emission Hydrogen Combustors for Gas Turbines Using Lean Direct Injection*”, In: Proceedings of 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Tucson, Arizona, July 10–13, 2005, AIAA–2005–3776
- [2] York, W. D.; Ziminsky, W. S.; Yilmaz, E.: “*Development and testing of a low NOx hydrogen combustion system for heavy-duty gas turbines*”. In: Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 135 (2013), Nr. 2, S. 022001
- [3] M. Kern, “*Modellierung kinetisch kontrollierter turbulenter Flammen für Magerbrennkonzepete*”, Dissertation in KIT, 2013, ISBN 978-3-7315-0075-9
- [4] Flavio Cesar Cunha Galeazzo, Chockalingam Prathap, Matthias Kern, Peter Habisreuther, Nikolaos Zarzalis, Christian Beck, Werner Krebs and Bernhard Wegner. “*Investigation of a Flame Anchored in Crossflow Stream of Vitiated Air at Elevated Pressures*”, in Proceedings of ASME Turbo Expo 2012: Power for Land, Sea and Air, ASME, June 11-15, Copenhagen, GT2012-69632.
- [5] Fabian Eiberger; Peter Habisreuther; Nikolaos Zarzalis; Fabio Turrini. “*Evaluation of the Turbulence Radiation Interaction and the Validity of the Optically Thin Fluid Approximation in a High Turbulent Premixed Methane Flame*”, In: Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Power for Land, Sea and Air, ASME, June 15-19, Montréal, Canada, GT2015-42478.
- [6] Conaire, M. O.; Curran, H J.; Simmie, J. M.; Pitz, W. J.; Westbrook, C.K., “*A Comprehensive Modeling Study of Hydrogen Oxidation*”, International Journal of Chemical Kinetics, 36: 603-622, 2004
- [7] D. G. Goodwin, H. K. Moffat, R. L. Speth. Cantera: *An object- oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes*. <http://www.cantera.org>, 2015. Version 2.2.0.
- [8] G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach, N. W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C. T. Bowman, R. K. Hanson, S. Song, W. C. Gardiner, Jr., V. V. Lissianski, Z. Qin, [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/)