

Großskalige Effizienzuntersuchung im Plenum einer Gasturbine

Untersuchungen der Gasdynamik im Ringplenum einer Gasturbine

M. Nadolski, R. Klein, Institut für Mathematik, Freie Universität Berlin

Kurzgefasst

- Wie sieht die Strömung bei dieser Geometrie unter einem periodischem Betrieb für verschiedene Rohrkonfigurationen aus?
- Wie verhalten sich die charakteristischen Mittelwerte über mehrere Zyklen der pulsierenden Verbrennung?
- Wie wirken sich die beiden Verbrennungsmechanismen auf mittlere Strömung und Pulsationen in den Plena aus?
- Mit welcher Art nichtstationärer Vorgänge ist an Verdichteraus- und Turbineneingang zu rechnen?

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1029 (SFB) "Signifikante Wirkungsgradsteigerung durch gezielte, interagierende Verbrennungs- und Strömungsinstationaritäten in Gasturbinen" untersuchen wir im Projekt C01 die Gasdynamik der Strömung vor und hinter der Brennkammer einer Gasturbine.

Die Ziele des SFBs sind die Wirkungsgradsteigerung der Gasturbine von bis zu 10% und der Bau eines Demonstrators. Die Wirkungsgradsteigerung soll insbesondere durch einen Übergang von der heute verwendeten Verbrennung bei konstantem Druck zu einer druckerhöhenden, stoßbehafteten bzw. stoßfreien Verbrennung bei näherungsweise konstantem Volumen möglich gemacht werden.

Moderne Gasturbinen sind auf quasi-stationären Betrieb hin ausgelegt und optimiert. Dies schließt eine quasistationäre Strömung in den mit nahezu Gleichdruck betriebenen Brenneinheiten ein. Die hier verfolgte pulsierende Verbrennung verspricht aufgrund thermodynamischer Überlegungen grundsätzlich beträchtliche Effizienzgewinne, da die Verbrennung in einem solchen System lokal bei weit höheren Temperaturen abläuft als dies bei näherungsweise Gleichdruckprozessen der Fall ist. Um diese Effizienzsteigerung allerdings mit weitgehend herkömmlich gestalteten Verdichtern und Turbinen realisieren zu können, ist es notwendig, die sehr starken Pulsationen der Brennröhre durch Auffangen in größervolumigen Plena zu glätten, damit Verdichter und Turbine weitgehend von diesen abgeschirmt werden.

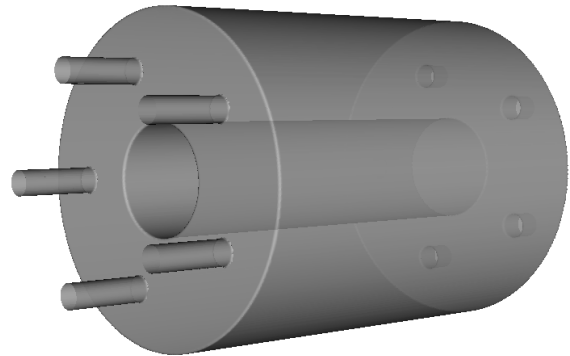


Abbildung 1: Die Basisgeometrie des Plenums. An den linken Rand sind fünf eindimensionale und reaktive Simulationen gekoppelt.

Ferner stehen sich innerhalb des SFB zwei Verbrennungsmechanismen gegenüber: die Pulse Detonation Combustion (PDC) und die Shockless Explosion Combustion (SEC). Obwohl die stoßfreie Verbrennung vielversprechendere Charakteristika wie z. B. kleinere Druckamplituden aufweist, ist sie im Vergleich zur PDC viel schwieriger in einen stabilen Betrieb zu bringen. In diesem Projekt sollen mehrere Vergleichsrechnungen beider Mechanismen aufgesetzt werden.

Das vorliegende Projekt untersucht in diesem Kontext die Gasdynamik mithilfe von CFD Simulationen. Für das Bewerten eines Plenums interessieren uns insbesondere der mittlere Massenfluss und Impulsfluss sowie auch die mittlere Entropie im System.

Wir erwarten von den am HLRN durchzuführenden Simulationen substantielle Einsichten darin, wie sich der Abbau von Pulsationsamplituden in besagten Plena mit Hilfe von Plenumsgeometrien, Ankopplungswinkeln der Brennröhre, Gestaltung der Übergänge von Plena zu Brennröhren und Gestaltung der Übergänge von Plena zu Verdichter bzw. Turbine beeinflussen lassen. In einer ersten Simulationsphase sollen u.a. die Einflüsse des Einschusswinkels der Brennröhre in das Turbinenplenum, die Form der Flanschgeometrie und der Effekt von gezielter Drosselung der Turbinenanströmung bis zum Schallzustand im Vergleich zu einer Unterschallanströmung untersucht werden.

Da sich die Gasdynamik der relativ einfachen Brennröhre, die im Prototypen zum Einsatz kommen sollen, sehr gut mit quasi-eindimensionaler Approximation beschreiben lässt, fokussieren wir den Rechenaufwand für die geplanten Simulationen auf die Darstellung der Plenumsströmungen. Zu diesem

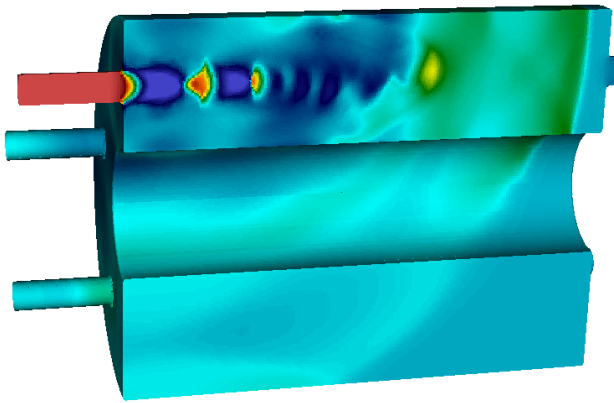


Abbildung 2: Eine Heatmap des Druckes bei einer groben Beispielrechnung kurz nachdem eine Detonation das obere Brennrrohr verlassen hat.

Zweck unterteilen wir das Rechengebiet in Brennröhre einerseits und Plena andererseits, wobei erstere mit einem quasi-eindimensionalen, reaktiven Modell, letztere aber mit dreidimensionalen, dafür aber nicht-reaktiven Modellgleichungen beschrieben wird.

Wir verwenden Finite Volumen Verfahren zweiter Ordnung, welche die konservativen Variablen bis auf Maschinengenauigkeit erhalten. In der ersten Phase des SFBs 1029 wurde ein eindimensionaler Finite Volumen Code entwickelt, um die Verbrennungsmechanismen in einer Brennkammer zu studieren. Dieser Code ist insbesondere in der Lage die in Frage kommenden Verbrennungsmechanismen mit idealisierten Randbedingungen in einem zyklischen Betrieb zu simulieren und wird hier wiederverwendet. Für dieses Projekt integrierten wir diesen in Kooperation mit dem *Laboratory for Scientific Computing* von der University of Cambridge in eine bestehende höherdimensionale Finite Volumen Applikation mit AMR¹ Fähigkeit. Beide Codes sind über die Ränder ihrer Rechengebiete miteinander verbunden.

Die Geometrie wird mithilfe der sogenannten *Cut-Cell* Methode 1 abgebildet, die ferner auch als “Embedded Boundary” bekannt ist. Zellen, welche von der Geometrie geschnitten werden, haben ein kleineres Volumen und erhalten ein spezielles konservatives Zeitupdate, um Stabilität ohne zellgrößenabhängige Zeitschrittwahl zu erzielen.

Der vorliegende Code wurde bereits gegen High-Speed Schlieren Daten aus einem Experiment validiert. In dieser Studie haben wir ebenfalls untersucht wie stark sich integrale Mittelwerte wie der Massen- bzw. der Impulsfluss bei unterschiedlichen räumlichen Auflösungen unterscheiden. Wir sind zu dem Ergebnis gekommen, quantitative Abschätzungen solcher Größen durchaus bei Verwendung recht gro-

ber Gitter möglich sind, dass aber Genauigkeiten unter 10% den Einsatz adaptiver Gitter notwendig machen.

WWW

<https://www.sfb1029.tu-berlin.de>

Weitere Informationen

- [1] *A dimensionally split Cartesian cut cell method for hyperbolic conservation laws*, N. Gokhale, N. Nikiforakis, R. Klein, doi: 10.1016/j.jcp.2018.03.005
- [2] *Validation of Under-Resolved Numerical Simulations of the PDC Exhaust Flow Based on High Speed Schlieren*, M. Nadolski, M. Reza Haghdooost, J. A. T. Gray, D. Edgington-Mitchell, K. Oberleithner, R. Klein, doi:10.1007/978-3-319-98177-2_15
- [3] *Modeling the kinetics of the Shockless Explosion Combustion*, P. Berndt and R. Klein, doi: 10.1016/j.combustflame.2016.06.029

¹adaptive mesh refinement