

Diss. ETH No. 20496

**FILM COOLING
USING ANTI-KIDNEY VORTEX PAIRS
INVESTIGATED BY
LARGE-EDDY SIMULATION**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Lars Gräf

Dipl.-Ing., Universität Stuttgart

born on December 30, 1980

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr.-Ing. L. Kleiser, examiner

apl. Prof. Dr.-Ing. U. Rist, co-examiner

2012

Abstract

Film cooling is an important measure to allow for an increase of gas turbine inlet temperatures and, thereby, to improve the engine's overall efficiency. The coolant is ejected through spanwise rows of holes in the blades or endwalls to build up a film shielding the material from hot gases. The holes often are inclined in the downstream direction and give rise to a kidney vortex pair. This counter-rotating vortex pair features an upward flow direction between the two vortices, which tends to lift the vortices off the surface and locally feeds hot air towards the blade outside the pair. Reversing the rotational sense of the vortices reverses these two drawbacks into advantages. In the case considered in this work, an anti-kidney vortex pair is generated using two subsequent rows of holes both inclined downstream and yawed in the spanwise direction with alternating yaw angles.

For validation of the computational setup, Large-Eddy Simulations of a turbulent flat-plate boundary layer are conducted using the relaxation term of the Approximate-Deconvolution Model to model the sub-grid scales. A Finite-Volume flow solver with up to fourth-order accurate numerical schemes is used and the computational domain is discretized by block-structured grids with 38 million cells at most. Results are found to be in good agreement with Direct Numerical Simulation data and the law of the wall. The variation of grid topology, extent of the computational domain, and grid resolution only show minor influence on the simulation results.

A film-cooling configuration is investigated which includes a coolant plenum and two cooling holes in an arrangement which generates the above-mentioned anti-kidney vortex pair. This vortex pair achieves a film-cooling effectiveness which is comparably high. The anti-kidney reference case is studied at a high resolution yielding results which agree reasonably well with experimental data. The flow in the coolant plenum, inside the coolant holes, and above the plate is studied in detail focussing on the vortical structures.

Finally, film-cooling parameters are altered towards engine conditions. The achieved cooling and the generated losses are studied at different coolant-to-freestream mass-flux ratios ($M = 1 \dots 2$) at an engine-like density ratio ($DR = 2$). In addition, the yaw angle ($\beta = 30^\circ \dots 60^\circ$) influence is studied to optimize the spanwise spreading of the film. The simulations show that the anti-kidney vortex configuration may locally obtain a higher cooling effectiveness for

high-momentum ratios than fan-shaped cooling, which is generally assumed to perform better at these parameters. In the vicinity of the cooling holes, however, fan-shaped holes are still superior.

Kurzfassung

Filmkühlung ist eine bedeutende Massnahme, um einen Anstieg der Gasturbinen-Eintrittstemperaturen zu ermöglichen und dadurch die Gesamteffizienz der Turbine zu verbessern. Das Kühlmittel strömt durch spannweitig angeordnete Lochreihen in den Schaufeln oder Seitenwänden aus, um einen Film aufzubauen, der das Material vor heissen Gasen schützt. Die Löcher werden häufig in Strömungsrichtung angestellt und rufen ein nierenförmiges Wirbelpaar hervor. Dieses gegenläufig rotierende Wirbelpaar zeichnet sich durch einen Drehsinn aus, der zwischen den beiden Wirbeln weg von der Wand weist, was ein Abheben der Strömung von der Oberfläche begünstigt, und befördert seitlich des Paares lokal heisse Luft zur Wand hin. Ein Umkehren des Drehsinns der Wirbel kehrt auch diese Nachteile in Vorteile um. Im in dieser Arbeit betrachteten Fall wird ein Anti-Nierenwirbelpaar durch zwei nacheinander angeordnete Lochreihen erzeugt, die beide stromab angestellt sind und deren spannweite Schiebewinkel alternieren.

Zur Validierung der Berechnungsmethoden werden Grobstruktursimulationen einer turbulenten ebenen Plattengrenzschicht durchgeführt, die den Relaxationsterm des Approximate-Deconvolution-Modells für die turbulente Feinstruktur verwenden. Ein Finite-Volumen-Strömungslöser mit bis zu vierter Ordnung genauen numerischen Schemata wird verwendet, und das Rechengebiet wird durch block-strukturierte Gitter mit maximal 38 Millionen Zellen diskretisiert. Die gewonnenen Ergebnisse stimmen gut mit direkten numerischen Simulationsdaten und dem turbulenten Wandgesetz überein. Die Variationen der Gittertopologie, der Abmasse des Rechengebiets und der Gitterauflösung zeigen lediglich geringe Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse.

Eine Filmkühlungsanordnung mit einem Kühlmittelpenum und zwei Kühllöchern wird untersucht, die das oben erwähnte Anti-Nierenwirbelpaar erzeugt. Dieses Wirbelpaar erreicht eine vergleichbar hohe Filmkühlungseffektivität. Der Referenzfall mit Anti-Nierenwirbelpaar wird mit einer hohen Auflösung untersucht und erzielt Ergebnisse, die im Einklang mit experimentellen Daten stehen. Die Strö-

mung im Kühlmittelpenum, in den Kühllöchern und oberhalb der Platte wird detailliert mit Schwerpunkt auf den Wirbelstrukturen untersucht.

Schliesslich werden die Filmkühlungsparameter entsprechend realistischen Verhältnissen in Gasturbinen angepasst. Die erzielte Kühlung und die verursachten Verluste werden bei verschiedenen Massenflussverhältnissen von Kühlmittel zu Freistrom ($M = 1 \dots 2$) und einem praxisrelevanten Dichteverhältnis ($DR = 2$) untersucht. Zusätzlich wird der Schiebewinkeleinfluss ($\beta = 30^\circ \dots 60^\circ$) untersucht, um die spannweitige Filmausbreitung zu optimieren. Die Simulationen zeigen, dass das Anti-Nierenwirbelpaar bei hohen Impulsverhältnissen lokal eine höhere Kühleffektivität erreichen kann als das fächerförmige Kühlen, von dem bei diesen Parametern üblicherweise angenommen wird, es schneide besser ab. Im unmittelbaren Umfeld der Kühllöcher sind die fächerförmigen Löcher allerdings nach wie vor überlegen.