ETH zürich

ETH Library

Investigation of separation on a forward facing step

Doctoral Thesis

Author(s):
Stüer, Heinrich

Publication date:
1999

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-002074065

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Diss. ETH Nr. 13132

Investigation of separation on a forward facing step

A dissertation submitted to the

Swiss Federal Institute of Technology Zürich

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

Heinrich Stüer

Dipl.-Ing.
University of Essen, Germany
born on February 10, 1970
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. W. Kinzelbach, examiner
Prof. Dr. L. Kleiser, co-examiner
Dr. A. Gyr, co-examiner

Zürich, 1999

Zusammenfassung

Die Untersuchung von Strömungsablösungen an festen Wänden und ihr Einfluss auf die gesamte Strömung ist eines der fundamentalen und schwierigen Probleme in der Strömungsmechanik. Ablösungserscheinungen treten in vielen industriellen und technischen Anwendungen auf, wie z. B. in Wärmetauschern, Rohrverengungen und -erweiterungen und bei der Umströmung von Bauwerken. Auch in der Geophysik, wie z. B. an Dünen und in Flussbetten, spielen Ablösungen eine wesentliche Rolle. Um ein besseres Verständnis über den Vorgang der Strömungsablösung zu ermöglichen, wurde die Ablösung an einer vorwärts gerichteten Stufe in einer ebenen Kanalströmung experimentell als auch numerisch untersucht.

Im experimentellen Teil der Arbeit wurden verschiedene Visualisierungstechniken benutzt, um die prinzipielle Struktur und Dynamik der Ablösung im Bereich kleiner und mittlerer Reynolds-Zahlen (Re-Zahlen) zu zeigen. Die Visualisierungen ergaben, daß zwei kritische Re-Zahlen in der laminaren Strömung existieren, die unterschiedliche Strömungszustände charakterisieren. Unterhalb der ersten kritischen Re-Zahl, $\mathrm{Re}_{h,crit1} \approx 65$, (bezogen auf die Stufenhöhe h und die volumetrisch gemittelte Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$), ist die Ablösungsblase zweidimensional (2D), wenn man kleine dreidimensionale (3D) Bereiche nahe den Seitenwänden vernachlässigt. Oberhalb $\mathrm{Re}_{h,crit1}$ entwickeln sich über die ganze Stufenbreite 3D Strukturen, die aus Zellen bestehen und etwa 5 Stufenhöhen breit sind. Das Fluid wird in diese Zellen eingerollt, seitlich transportiert und am Ende jeder einzelnen Zelle in Form von Streifen ausgebracht. Beim Überschreiten der zweiten kritischen Re-Zahl, $\mathrm{Re}_{h,crit2} \approx 135$, fangen diese Zellen bzw. Streifen an, sich periodisch parallel zur Strömung zu bewegen. Das Auftreten der Strömungszustände wird nicht durch Seitenwände beeinflusst. Des Weiteren tritt die instationäre Zellstruktur auch bei turbulenter Anströmung auf, allerdings ist die Bewegung wesentlich unregelmäßiger.

Für quantitative Messungen wurde die 3D PTV Meßtechnik im Re-Zahlbereich über $\mathrm{Re}_{h,crit2}$ benutzt, um einen Einblick in die Topologie und den Mechanismus der 3D Ablösung im laminaren und turbulenten Fall zu bekommen.

Die Ablösung an einer vorwärts angeströmten Stufe besteht aus offenen 3D Zellen, d. h. daß das Fluid zwischen den beiden Separationsflächen eintritt und spiralförmig zur Seite transportiert wird, bis es am Ende einer Zelle über die Stufe geht. Messungen der Geschwindigkeitskomponente parallel zur Stufe innerhalb der Ablösung zeigen, daß die absolute maximale Geschwindigkeit etwa 25% der mittleren Anströmungsgeschwindigkeit erreicht. Invariantendiagramme des Geschwindigkeitsgradiententensors im Bereich der Ablösezone zeigen, daß hier alle topologisch möglichen Strukturen existieren, obwohl der stabile expandierende Fokus vorherrscht. Daß in diesem Bereich tatsächlich alle topologischen Strukturen vorhanden sind, wird auch von den Ergebnissen über die zweite Invariante des Geschwindigkeitsgradiententensors entlang eines Partikelpfades in der Ablösezone unterstützt. Die Strukturerkennungsmethode, welche auf den Eigenwerten der Hesseschen Matrix des Druckes beruht (λ_2 Kriterium), ermöglichte eine eindeutige Erkennung des Ablösewirbels und

wurde zum ersten Mal erfolgreich bei experimentellen Daten angewendet. Bei den untersuchten Größen wurde kein wesentlicher Unterschied zwischen laminarer und mittlerer turbulenter Strömung gefunden.

Im numerischen Teil der Arbeit wurden die Prozesse, die zu den verschiedenen laminaren Strömungszuständen führten, mit Hilfe einer globalen linearen Stabilitätsrechnung untersucht. Um diese Analyse an komplexen Geometrien durchführen zu können, wurde ein unstrukturierter 2D Strömungslöser entwickelt und validiert; basierend auf diesem Strömungslöser wurde die 3D Stabilitätsmethode implementiert. Numerische Untersuchungen wurden für ein Stufen- zu Kanal-Höhenverhältnis von 1:2 durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, daß $\mathrm{Re}_{h,crit1}$ im Bereich von etwa 75 mit einem Zellenabstand von zwei Stufenhöhen liegt. Im Weitern konnte der Wert von $\mathrm{Re}_{h,crit2}$ auf etwa 125 festgelegt werden, wobei der Zellenabstand fast zwei Stufenhöhen beträgt und die Bewegung eine dimensionslose Periodendauer t^* $(= t \cdot \bar{u}/h)$ von etwa 120 hat. Abgesehen von den Werten für den Zellenabstand, stimmen diese Ergebnisse mit den experimentellen überein.

Diese Untersuchungen deuten darauf hin, daß die 3D Ablösung an einer vorwärts angeströmten Stufe durch eine lineare Instabilität hervorgerufen wird.

Abstract

The study of a flow separating from the surface of a solid body, and the determination of global changes in the flow field that develop as a result of the separation, are among the most fundamental and difficult problems of fluid dynamics. The phenomenon of separation is often encountered in industrial and engineering applications, such as in heat exchangers and flows over buildings and in geophysical problems, *e.g.* flows over dunes and grooves. In order to facilitate a better understanding of the separation process as a whole, the separation on a forward facing step in a straight channel was investigated by experimental and computational methods.

In the experimental part of the study, different visualisation techniques were used to reveal the basic structure and dynamics of separation and to illustrate the flow states and flow behaviour for low and moderate Reynolds numbers (Re-numbers). The visualisation indicates that there exist two critical Re-numbers which determine the flow behaviour. Below the first critical Re-number $\mathrm{Re}_{h,crit1} \approx 65$ (normalised by the step height h and the mean bulk velocity $\bar{u}$), the separation is purely two-dimensional (2D) if minor three-dimensional (3D) effects in the limited region of the side walls are neglected. Above $\mathrm{Re}_{h,crit1}$ the separation develops a steady 3D structure over the whole span. This structure consists of separation cells with a width of about 5 step heights. The fluid is entrained into the cell and released at the ends of the cell in streaks over the step. Beyond the second critical Re-number $\mathrm{Re}_{h,crit2} \approx 135$ these cells, or the released streaks start to move in the span-wise direction. This transition process is not altered by the presence of side walls and the streaky pattern can also be observed in turbulent separated flow fields, although the movement of the streaks is more irregular.

In order to obtain quantitative measurements, the 3D PTV technique was applied for Re-numbers well beyond $\mathrm{Re}_{h,crit2}$, to reveal the topology of the 3D separation in the laminar and in the turbulent case and the mechanism of entrainment and release of the fluid.

The separation occurring in front of a forward facing step at moderate Re-numbers is an open 3D bubble such that the fluid is entrained between the two separation surfaces over the whole separation cell width while inside the cell the fluid is transported in a helical fashion until it is continuously released in longitudinal vortices over the step. Measurements of the velocity component in span-wise direction show that its maximum is about 25% of the mean upstream velocity. Invariant charts of the velocity gradient tensor in the separation zone show that the 3D separation is topologically not limited, although the stable stretching focus prevails. The existence of all topological possibilities in the separation zone is also reflected in the results obtained for the second invariant of the velocity gradient tensor calculated along a single particle trajectory. The structure extraction method which is based on the eigenvalues of the pressure Hessian (λ_2 criterion), allowed an unambiguous definition of the separation vortex structure and was for the first time successfully applied to experimental data. No pronounced difference between turbulent and laminar separ-

ation was observed in the quantities investigated.

In the computational part of the study, the process leading to the different flow states observed in the visualisations is investigated by means of a global linear stability analysis. To facilitate such an analysis, an unstructured 2D base flow solver was developed and validated as well as a 3D stability method based on the 2D flow solver. Calculations with the proposed method were performed for a step-to-channel-height ratio of 1:2. By means of the global linear stability analysis, $\mathrm{Re}_{h,crit1}$ was determined to be in the range of 75 with a cell spacing of about two step heights and $\mathrm{Re}_{h,crit2}$ was found to be ≈ 125 with a cell spacing of almost two step heights and a non-dimensional period t^* $(= t \cdot \bar{u}/h)$ of about 120. Except for the value of the cell spacing, the results are in agreement with the experimentally observed values.

The investigations indicate that the 3D separation on a forward facing step is the result of a linear instability process.