

Stoß-Wirbel-Wechselwirkungen

Skalenauflösende Simulationen zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Verdichtungsstößen und Wirbelströmungen

D. Mimic, F. Herbst, Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD), Leibniz Universität Hannover

Kurzgefasst

- Skalenauflösende Strömungssimulationen
- Verdichtungsstöße
- Turbulenz
- Grenzschichten
- Wirbel

In Strömungen, deren Geschwindigkeit die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls überschreitet, können sich Informationen, wie zum Beispiel Druckstörungen, nur stromab fortpflanzen. Als Folge dessen weist ein Druckaufbau in Überschallströmungen – anders als in Unterschallströmungen – keinen glatten Verlauf auf, sondern erfolgt in Form einer diskontinuierlichen Druckerhöhung: dem sogenannten Verdichtungsstoß. Ein solcher Verdichtungsstoß ist am Beispiel einer reibungsfreien Strömungssimulation in Abb. 1 dargestellt.

Die komplexen Wechselwirkungen zwischen wirbelbehafteten, turbulenten Strömungen und Verdichtungsstößen stellen auch heute noch große Herausforderungen hinsichtlich qualitativen Verständnisses und quantitativer Modellierung dar. Dies ist nicht zuletzt der Tatsache geschuldet, dass in Verdichtungsstößen auf kürzester Strecke äußerst steile Gradienten von Druck, Temperatur und Dichte vorliegen. Die so entstehenden, zufällig verteilten Verwirbelungen im Stoßgebiet verursachen (selbst in nichtviskosen Strömungen) eine starke Entropieproduktion und interagieren auf vielfältige Weise mit den eintreffenden, chaotisch vorliegenden Turbulenzwirbeln. Die Folge ist eine Reihe an analytisch kaum abwägbar und nur in Sonderfällen zuverlässig quantitativ modellierbaren Effekten:

- Aufgrund des dissipativen Charakters des Stoßes kommt es hier zu stoßnormalem Impulsverlust in der Strömung.
- Infolge der chaotischen Impulsverteilung in der turbulenten Strömung fällt auch dieser Impulsverlust ungleichmäßig aus.
- Dies resultiert in einer Dämpfung gewisser Wirbelstrukturen mit bestimmten Vorzugsrichtungen.

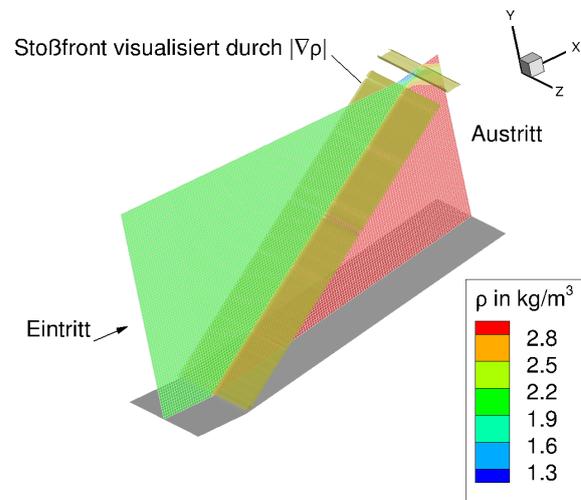


Abbildung 1: Visualisierung einer Stoßfront in einer reibungsfreien Strömungssimulation, welche als erster Schritt zur Validierung des Löser anhand analytischer Berechnungen herangezogen wird.

- Die zuströmenden Wirbelstrukturen verformen die Stoßfront lokal und löschen sie stellenweise aus. Hierdurch erfolgt eine örtlich variierende Entropieproduktion am Stoß.
- Die örtliche Variation der Entropieproduktion indiziert eine variierende Verteilung der Verwirbelungen innerhalb des Stoßes, wie sogar analytisch hergeleitet werden kann.

Gemäß den Helmholtz'schen Wirbelsätzen haben diese Wirbelstärkevariationen und teilweise sogar -diskontinuitäten innerhalb des Stoßes eine Produktion neuer oder Anfachung gewisser vorhandener Wirbelstrukturen unmittelbar stromab des Stoßes zur Folge.

Das Resultat dieser Interaktionen ist eine gegenüber der Zuströmung erheblich veränderte Turbulenz stromab des Stoßes. Die Veränderungen hinsichtlich Dämpfung, Anfachung und räumlicher Vorzugsrichtung der turbulenten Wirbelstrukturen hängen hierbei stark vom Charakter der Zuströmturbulenz sowie des Stoßes ab und weichen für Turbulenzballen unterschiedlicher Abmessungen deutlich voneinander ab.

Die für das Verständnis strömungsmechanisch relevanten Phänomene weisen räumliche Abmessungen auf, die sich im Bereich zwischen den größten auftretenden Turbulenzballen und dem Kolmogorov'schen Längenmaß, also dem Dissipationsbe-

reich von Turbulenz, befinden. Aus diesem Grunde ist eine hochauflösende direkte numerische Simulation (DNS) der Strömung erforderlich, um Aussagen über die vorliegenden Wechselwirkungen ableiten zu können.

Bedingt durch die geringen Dicke eines Stoßes, welche sich im Bereich einiger weniger mittlerer freier Weglängen bewegt, kann sich ein Teil der Vorgänge, die innerhalb des Stoßes auftreten, dieser Kontinuumsbetrachtung sogar entziehen. Partikelsimulationen aus dem Bereich der statistischen Thermodynamik wären in einem solchen Fall das Mittel der Wahl. Dennoch wird durch das DNS-Verfahren ein erheblicher Teil der zugrundeliegenden Physik erfasst, sodass es als Werkzeug für die geplanten Untersuchungen geeignet erscheint. Der Frage, wo genau die Grenzen des DNS-Verfahrens bei der Simulation von Stoß-Wirbel-Wechselwirkungen liegen, soll in diesem Projekt dediziert nachgegangen werden.

Zum Zwecke der Untersuchung jener Wechselwirkungen zwischen wirbelbehafteten, turbulenten Strömungen sollen auf dem HLRN hochaufgelöste DNS verschiedener Stoßkonfigurationen bei unterschiedlichen turbulenten Zuströmungen durchgeführt werden. Der Ablauf gliedert sich dabei im Wesentlichen in drei Schritte, die bei erfolgreicher Durchführung in Form von Fach-Publikationen dokumentiert werden sollen:

1. Anhand explorativer Stoßsimulationen mit unterschiedlichen Netzauflösungen wird untersucht, inwiefern durch die Kontinuumsbetrachtung ein „Blick in den Stoß“ möglich ist, das heißt physikalisch valide Aussagen über die Verwirbelungsvorgänge im Stoß abgeleitet werden können. Konventionelle Abschätzungen zur notwendigen Netzauflösung sind in unmittelbarer Umgebung des Stoßes problematisch, da dieser das Kolmogorov'sche Längenmaß deutlich beeinflusst [1]. Neben der Veröffentlichung hochaufgelöster Stoß-Simulationsergebnisse bietet die systematische Ausarbeitung einer solchen Abschätzung gutes Publikationspotential.
2. Es werden systematisch DNS für verschiedene Stoßkonfigurationen bei unterschiedlicher Zuströmerturbulenz durchgeführt. Dies erlaubt einen detaillierten Einblick in die vorliegenden Interaktionen und das Ableiten von Korrelationen.
3. Es werden besonders relevante Individual-Interaktionen zwischen einzelnen turbulenten Wirbeln und dem vorliegenden Stoß identifiziert. Diese Interaktionen werden anschließend in separaten Simulationen isoliert betrachtet, indem einzelne, repräsentative Wirbel synthetisch aufgeprägt und mit dem Stoß zur Interaktion ge-

bracht werden. Hierdurch sollen einzelne physikalische Effekte herausgearbeitet und kausale Erklärungsansätze vorgeschlagen werden. Die so gewonnenen Erkenntnisse sollen in Form eines verbesserten RANS-Modells (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) zur technischen Anwendung kommen.

Im vorliegenden Antrag werden zunächst die Betriebsmittel für die Durchführung des ersten Schrittes beantragt. Dessen Resultate sollen in Folgeprojekten zur Umsetzung der weiteren beiden Schritte herangezogen werden.

Für die Simulationen der Verdichtungsstöße sind aufgrund der äußerst kleinen relevanten Längenmaße unmittelbar am Stoß und der hohen Sensitivität des Dissipationsverhaltens stromab des Stoßes äußerst feine Netze notwendig [1]. Zusätzlich benötigen derartige Rechnungen aus Stabilitätsgründen für gewöhnlich ausreichend lange, vergrößerte numerische Austrittsgebiete, um Störungen noch vor der Austritts-Randbedingung zu dämpfen. Da eine der Zielsetzungen darin besteht, zu untersuchen bis zu welchem Netzverfeinerungsgrad noch zusätzliche, physikalisch relevante Informationen extrahiert werden können, ergeben sich entsprechend hohe Zellanzahlen. Somit ergeben sich für die Simulationen ein erheblicher Parallelisierungsbedarf und folglich die Erfordernis der HLRN-Nutzung.

WWW

<https://www.tfd.uni-hannover.de>

Weitere Informationen

- [1] J. Larsson, S. K. Lele (2009): Direct numerical simulation of canonical shock/turbulence interaction, *Phys. Fluids* **21.12**, 126101. doi: 10.1063/1.3275856

Projektpartner

Nachwuchsgruppe
Multiphysik turbulenter Strömungen (MTS), TFD

Förderung

Der Bearbeiter ist über eine PKB-Stelle der Leibniz Universität Hannover finanziert.