

Direkte Numerische Simulation der Turbulenz

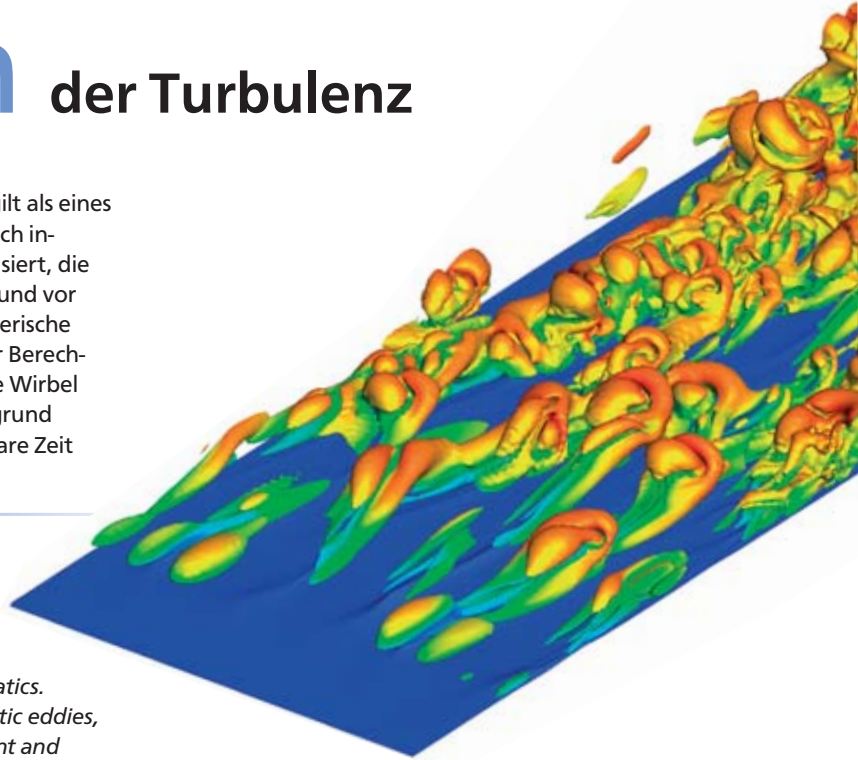
Turbulenz, also die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen, gilt als eines der sieben Millennium-Probleme der Mathematik. Sie ist durch instationäre, dreidimensionale und zufällige Wirbel charakterisiert, die sowohl räumlich als auch zeitlich auf sehr unterschiedlichen und vor allem auch sehr kleinen Skalen stattfinden. Die Direkte Numerische Simulation (DNS) ist die genaueste numerische Methode zur Berechnung turbulente Strömungen, wobei kleinskalige turbulente Wirbel numerisch in Raum und Zeit aufgelöst werden müssen. Aufgrund ihres extremen Rechenaufwands findet die DNS auf absehbare Zeit hauptsächlich in der Grundlagenforschung Verwendung.

► Direct Numerical Simulation of Turbulence

Turbulence, i.e. the solution of the Navier-Stokes equations, is considered one of the seven Millennium problems of mathematics. It is characterized by unsteady, three-dimensional and stochastic eddies, which take place both temporally and spatially on very different and particularly also on very small scales. The direct numerical simulation (DNS) is the most accurate numerical method for simulating turbulent flows, where small-scale turbulent eddies must be solved numerically in space and time. Due to its extreme cost of computation the DNS is mainly applied to the fundamental research in the foreseeable future.

Martin Oberlack, George Khujadze, Victor Avsarkisov, Yongqi Wang • Turbulenz gilt als eines der letzten ungelösten Rätsel klassischer Physik und ist eines der sieben Millennium-Probleme in der Mathematik. Bei der Turbulenz handelt es sich um ein weit verbreitetes Naturphänomen, das heute noch in vielfacher Hinsicht unverstanden ist. Ihr ausgeprägt chaotischer, instationärer und dreidimensionaler Charakter tragen zu einem großen Teil hierzu bei.

Im Jahr 1883 hat Reynolds durch einen Farbfadenversuch in einer Rohrleitung demonstriert, dass die regelmäßige und schichtenförmige, also laminare Strömung, mit zunehmender Durchströmungsgeschwindigkeit nicht mehr bestehen bleibt und sich eine chaotische turbulente Strömung bildet. Der laminar-turbulente Strömungsumschlag hängt von dem Verhältnis von Trägheits- und Reibungskräften ab, später als Reynoldszahl bezeichnet. Turbulenz kann dann existieren, wenn viskose Dämpfung nicht ausreicht, um die kinetische Energie allfälliger Wirbel zu dämpfen.



Turbulenz tritt in vielen Bereichen der Natur und Technik auf, in der Geo- und Astrophysik, in der Meteorologie sowie der Aerodynamik, aber auch in technischen Apparaten und Maschinen sowie teilweise in biologischen Systemen. Turbulente Strömungen sind im Gegensatz zu laminaren Strömungen durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Turbulente Strömungen sind instationär und dreidimensional, ihre Geschwindigkeiten enthalten fluktuierende Komponenten, die zufällig verteilt erscheinen, damit ist ihre raumzeitliche Struktur ungeordnet und schwer vorhersagbar.
- Sie enthalten Wirbel mit einem breiten Spektrum an Größenskalen: nach oben sind sie nur durch die Abmessungen der Strömungsgeometrie limitiert, nach unten durch die Skalen, auf denen die viskose Reibung dominiert.

Turbulente Strömungen werden, ebenso wie laminare Strömungen, durch die Erhaltungsgleichungen für ein fluides Kontinuum beschrieben. Weiterhin wird üblicherweise vereinfachend angenommen, dass ein Newtonsches Fluid vorliegt, damit die Impulserhaltung durch die Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben werden kann. Im Gegensatz zu laminaren Strömungen erscheinen turbulente Strömungen nahezu zufällig aufgrund ihrer empfindlichen Abhängigkeit von Anfangs- und Randbedingungen. Geringe Störungen, die in

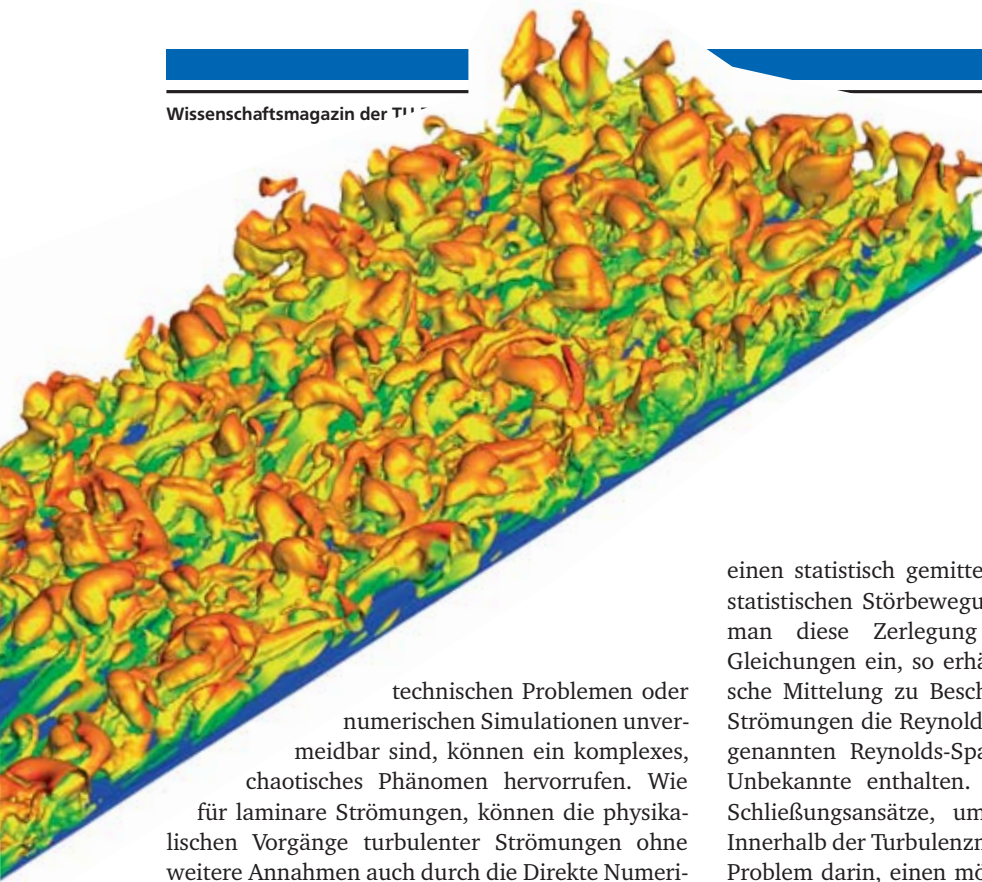


Abbildung 1
Isoflächen der Vorticity
für eine turbulente
Grenzschichtströmung.

technischen Problemen oder numerischen Simulationen unvermeidbar sind, können ein komplexes, chaotisches Phänomen hervorrufen. Wie für laminare Strömungen, können die physikalischen Vorgänge turbulenter Strömungen ohne weitere Annahmen auch durch die Direkte Numerische Simulation (DNS) der vollständigen instationären Navier-Stokes-Gleichungen detailliert untersucht werden, wenn kleinskalige turbulente Schwankungen und Wirbel numerisch in Raum und Zeit numerisch aufgelöst werden. Die DNS ist die genaueste Methode, um turbulente Strömungen zu berechnen, sie stellt aber auch die höchsten Anforderungen an das numerische Verfahren sowie an die verfügbare Rechenleistung. Obwohl die Turbulenz natürlicherweise ein breites Spektrum chaotisch sich bewegender Wirbel aufweist, ist das Detailwissen der einzelnen Wirbelbewegung für die meisten technische Problemstellungen nicht relevant. Vielmehr genügt häufig das Wissen statistischer Parameter wie die mittlere Geschwindigkeit, der mittlere Druck sowie Varianzen. Dank der kohärenten Strukturen in der Turbulenz sind die statistisch gemittelten Felder also im mathematischen Sinne nicht zufällig und damit in gewissem Sinne vorhersagbar. Es bestehen unterschiedliche Strategien, um die mittleren Felder turbulenter Strömungen ohne Verwendung der DNS zu simulieren, um den Rechenaufwand zu verringern. Zu diesem Zweck unterteilt man die Feldgrößen wie die Geschwindigkeit und den Druck in

einen statistisch gemittelten Term, der von einer statistischen Störbewegung überlagert wird. Setzt man diese Zerlegung in die Navier-Stokes-Gleichungen ein, so erhält man durch die statistische Mittelung zu Beschreibung von turbulenten Strömungen die Reynolds-Gleichungen, die die sogenannten Reynolds-Spannungen als zusätzliche Unbekannte enthalten. Man benötigt deswegen Schließungsansätze, um das System zu lösen. Innerhalb der Turbulenzmodelle besteht das größte Problem darin, einen möglichst universellen semiempirischen Schließungsansatz zu finden. Unterschiedliche Schließungsansätze haben zu verschiedenen Turbulenzmodellen geführt. Zur Validierung dienen Daten aus Experimenten und eben der DNS. Anstelle der statistischen Mittelung tritt bei der Grobstruktursimulation (Large Eddy Simulation, LES) eine zeitliche und räumliche Tiefpassfilterung. Dies hat zur Folge, dass sich die großen Wirbelstrukturen direkt berechnen lassen, während die kleinskaligen Phänomene weiterhin modelliert werden müssen. Die LES verspricht bei höherem Rechenaufwand eine bessere Beschreibung der Turbulenz als die statistischen Methoden, weil zumindest ein Teil der turbulenten Schwankungen wiedergegeben wird.

Die rasante Entwicklung im Bereich der Großrechneranlagen (Super-Computer) lässt die Tendenz in der Strömungsmechanik erkennen, in Zukunft verstärkt die Navier-Stokes-Gleichungen ohne jegliche Vereinfachung direkt numerisch zu lösen. Da Turbulenz sowohl räumlich als auch zeitlich auf sehr unterschiedlichen und vor allem auch sehr kleinen Skalen stattfindet, werden zur korrekten Auflösung aller Phänomene extrem feine Gitter und Zeitschritte benötigt. Ein großer Anwendungs-

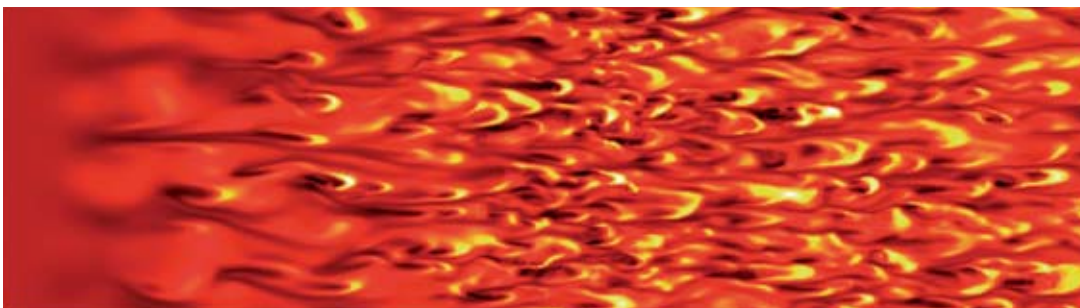


Abbildung 2
Draufsicht der
Isolinien der Vorticity
für eine turbulente
Grenzschichtströmung.

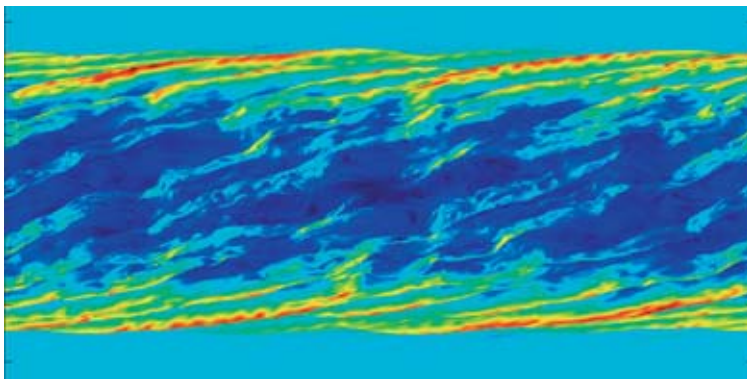


Abbildung 3
Isokonturlinien der Dichteveriation bei der Ausbreitung einer durch eine Turbulenz erzeugten Schallwelle in der Scherströmung.

bereich der DNS ist der laminar-turbulente Umschlag. Des Weiteren wird die DNS in den Bereichen Ablöseblasen, vollturbulente Strömungen und Aeroakustik eingesetzt und dient auch der Weiterentwicklung von Turbulenzmodellen.

Neben der DNS turbulenter Strömungen beschäftigt sich das Fachgebiet für Strömungsdynamik im Fachbereich Maschinenbau auch mit der Turbulenzmodellierung mit Hilfe turbulenter Skalengesetze und der Methode der Dissipationselemente. Die meisten unserer großen DNS

Simulationen sind auf den massiv parallelen Supercomputern am Leibniz-Rechenzentrum in München sowie am Jülich Supercomputing Centre durchgeführt worden, die zu den leistungsfähigsten Rechnern in Europa gehören. Beispiele hinsichtlich Grenzschichtströmung, aeroakustischer Wellen in einer Scherströmung sowie Kanalströmung mit Transpiration werden im Folgenden aufgeführt.

Eine ebene turbulente Grenzschicht für eine längs angeströmte ebene Platte wurde durch die DNS mit einer Auflösung von 270 Millionen Gitterpunkten durchgeführt. Die Isoflächen der Vorticity-Komponente in der Hauptströmungsrichtung und ihre Draufsicht sind in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Der Übergang laminar-turbulent lässt sich erkennen. In der Nähe der Plattenvorderkante ist die Grenzschicht zunächst stets laminar. Dann entstehen die Wirbel unregelmäßig an beliebigen Stellen der Grenzschicht, zerfallen und wandern stromabwärts, bis vollturbulente Strömung gebildet wird. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, tritt der Übergang durch ein starkes Anwachsen der Grenzschichtdicke in Erscheinung.

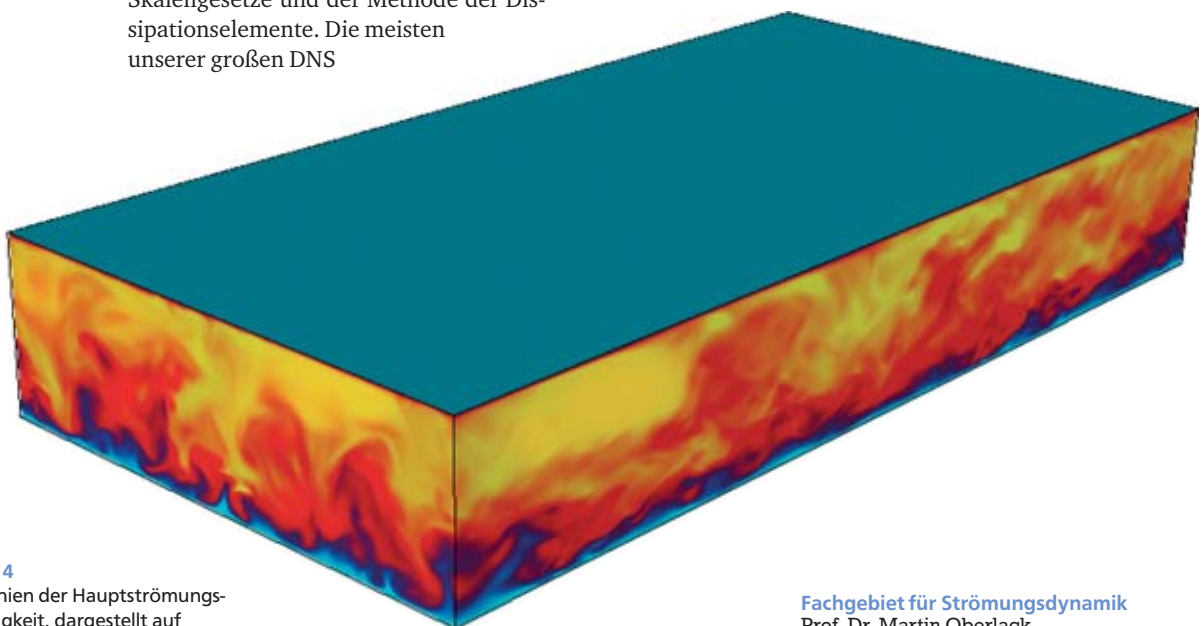


Abbildung 4
Isokonturlinien der Hauptströmungsgeschwindigkeit, dargestellt auf den Außenflächen des Rechengitters für eine turbulente Kanalströmung mit Transpiration.

Die aerodynamische Schallerzeugung durch eine Turbulenz in einer Scherströmung und ihre Ausbreitung wurde auch durch die DNS untersucht. Der Schall wird anfänglich durch turbulente Schwankungen in der Mitte der Scherströmung erregt und breitet sich seitlich aus, wie aus der Dichteverteilung für einen gegebenen Zeitpunkt in Abbildung 3 zu sehen ist. Der Einfluss der starken Scherströmung auf der Turbulenzstruktur ist deutlich zu erkennen. Absaugen/Ausblasen ist ein wichtiges Verfahren zur aktiven Grenzschicht- und Strömungskontrolle. Als Beispiel wurde eine turbulente Kanalströmung mit Transpiration durch die DNS simuliert. Wie an den Isokonturlinien der Hauptströmungsgeschwindigkeit (Abbildung 4) erkennbar, verstärkt sich die Turbulenz auf der unteren Seite mit Ausblasen, und verringert sich die Turbulenz auf der oberen Seite durch die Absaugung. Noch ist nicht gelungen, turbulente Strömungen für praktische Probleme exakt zu berechnen. Super Computing turbulenter Strömungen bleibt somit auch weiterhin als ein aktuelles und hochspannendes Forschungsthema.



Martin Oberlack ist Professor und Leiter des Fachgebiets für Strömungsdynamik (FDY) an der TU Darmstadt und Principal Investigator an der Graduate School CE. Seine Forschungsschwerpunkte sind Strömungsmechanik und Turbulenzmodellierung.



George Khujadze ist Postdoktorand am FDY und arbeitet auf Gebieten der DNS, Stabilitätsanalyse.



Victor Avsarkisov ist Doktorand am FDY und beschäftigt sich mit der DNS der Turbulenz



Yongqi Wang ist Privatdozent und stellvertretender Fachgebietsleiter am FDY. Seine Forschungsschwerpunkte sind Kontinuumsmechanik, Mehrphasenströmung.

LIFE - Gründerzentrum Wiesbaden



In Wiesbaden, im Industriepark Kalle-Albert, ist für Start-up- Firmen und Existenzgründer eine Anmietung von Labor- und Büroflächen zu günstigen Konditionen möglich!

Das Gründerzentrum LIFE bietet Ihnen neben den bezugsfertigen Räumlichkeiten auch Existenzgründerhilfen, Experten in Genehmigungs- und Umweltfragen, Dienstleistungen und Services bis hin zum Personalmanagement.

Beste Verkehrsanbindungen in unmittelbarer Nähe erreichbar:

- Autobahn: 3 Minuten
- Flughafen Frankfurt: 20 Minuten
- S-Bahn am Gelände

Unsere Konditionen* für Ihren Start:

- Im ersten Mietjahr:
- 6,00 EUR/m² und Monat
Büromietfläche
- 8,00 EUR/m² und Monat
Labormietfläche
- 10,00 EUR/MA und Monat
Kosten für Umlagen

für mehr Informationen
rufen Sie uns an!

InfraServ GmbH & Co. Wiesbaden KG
Oliver Heinrich
Tel.: 0611-962-6547
E-Mail: oliver.heinrich@infraserv-wi.de
www.kalle-albert.de

Industriepark
KALLE-ALBERT

* zzgl. den gebäudespezifischen Nebenkosten, Energie-Verbrauchskosten, sowie der jeweils gültigen gesetzlichen Mehrwertsteuer