

Turbulenz und Grenzschicht

1 Einleitung

Die meisten in der Natur und bei technischen Anwendungen auftretenden Strömungen sind turbulent. Insbesondere strömt die untere Atmosphäre turbulent, wenn als turbulente Strömungen in der Atmosphäre diejenigen aperiodischen, dreidimensionalen und stochastischen Bewegungen bezeichnet werden, die die Luft und die mit ihr verbundenen Eigenschaften im Übergang zwischen größerskaliger Advektion und molekularer Diffusion vermischen [1], [8]. Im Gegensatz zum schichtartigen Aufbau von laminaren Strömungen treten bei turbulenten Strömungen eine ganze Bandbreite von Wirbeln verschiedenster Intensität und Größe auf, die einen regen Austausch bewirken [7]. Die Skala der turbulenten Störungen in der Atmosphäre reicht von den kleinsten „Wirbelchen“ mit Abmessungen, die nur Bruchteile von Millimetern oder Zentimetern betragen, bis hin zu Wirbeln mit charakteristischen Längen, die einige hundert bis tausend Meter umfassen. Ohne das Bestreben der Turbulenz, Gegensätze von Strömungseigenschaften abzubauen, wäre die bodennahe Luftschicht bald derart verunreinigt, dass das Leben auf der Erde in der heutigen Form nicht mehr möglich wäre [8].

Das Verhalten der atmosphärischen Grenzschicht zwischen der Erdoberfläche und der freien Atmosphäre ist ein wichtiges Forschungsgebiet, da die in ihr ablaufenden Transportprozesse für unseren Lebensraum eine zentrale Rolle spielen. Von besonderer Bedeutung in diesem Zusammenhang ist der Austausch von Impuls, Wärme, Wasser und anderer Stoffbeimengungen zwischen Atmosphäre und dem unteren Rand. Diese werden von der Turbulenz kontrolliert. Die Kenntnis der turbulenten Transportvorgänge in der atmosphärischen Grenzschicht ist daher von großer Bedeutung für das Verständnis des Energie- und Stoffhaushalts der gesamten Atmosphäre.

2 Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht

Die Atmosphäre befindet sich mit ihrer unteren Unterlage in ständiger dynamischer und thermischer Wechselwirkung, bei der Impuls, Energie und Masse ausgetauscht werden. In Bodennähe treten dabei turbulente Störbewegungen bis zu einem bestimmten Abstand von der Unterlage auf, die die sogenannte planetare Grenzschicht charakterisieren. Die Mächtigkeit dieser Grenzschicht und die Wind-, Temperatur- und Wasserdampfverteilung in ihr, hängt neben den Austauschvorgängen an der Grenzfläche von der statischen und kinematischen Struktur der unteren Atmosphäre ab. Sie wird in einigen hundert bis wenigen tausend Metern Höhe durch die bodennächste Inversion des Temperaturprofils gegen die darüberliegende (freie) Atmosphäre abgegrenzt [8].

Die atmosphärische Grenzschicht ist demnach der untere Teil der Atmosphäre, in dem der Einfluss des Erdbodens direkt über den turbulenten Transport zu spüren ist. Ihre vertikale Erstreckung ist einem Tagesgang mit hoher Amplitude unterworfen. Sie liegt tagsüber typischerweise bei 1 km (bei starker Konvektion auch höher) und in den Nachtstunden unter stabilen thermischen Bedingungen bei etwa 50 bis 300 m. In der Grenzschicht finden die wesentlichen Kopplungsprozesse zwischen der mittleren Troposphäre und der Erdoberfläche

statt, weshalb sie eine wichtige Komponente des Klimasystems darstellt. Die atmosphärische Grenzschicht wird erheblich durch den Umstand beeinflusst, dass sie sich auf einer rotierenden Unterlage befindet. Die Erdrotation bewirkt zweierlei: Zum einen sorgt sie dafür, dass sich beispielsweise beim Übergang einer Strömung vom „glatten“ Meer auf die „raue“ Landfläche eine konstante, stationäre Höhe einstellt und sie nicht wie im Fall der Grenzschicht an einer längs angeströmten Platte ständig mit zunehmender Entfernung von der Vorderkante ansteigt. Insofern übt die Corioliskraft einen Zwang auf die entstehenden turbulenten Bewegungen aus, so dass nur bis zu einer bestimmten Höhe die nicht-turbulente Strömung in das Turbulenzgebiet einbezogen werden kann. Zu anderen bewirkt sie die bekannte Drehung der Strömungsrichtung nach rechts (auf der Nordhalbkugel) mit zunehmender Höhe. Da bekanntlich *Ekman* als erster die Strömung in der Grenzschicht über einer rotierenden Unterlage behandelt hat, bezeichnet man häufig die atmosphärische Grenzschicht als *Ekman*-Schicht. Daneben wird dafür auch der Ausdruck „planetarische Grenzschicht“ gewählt [1], [8].

Entsprechend den unterschiedlichen Einflüssen (feste Berandung, freie Turbulenz), die in den unterschiedlichen Höhenbereichen für die Strömung von Bedeutung sind, setzt auch die quantitative Beschreibung ein. Daraus ergibt sich die klassische Einteilung der atmosphärischen Grenzschicht: Über hinreichend glatten Oberflächen findet man direkt über der Erdoberfläche eine laminare Unterschicht, deren Dicke nur im Millimeterbereich liegt. Innerhalb dieser Schicht beruhen die Transportprozesse allein auf molekularer Diffusion. Darüber schließt sich die *Prandtl*-Schicht an (auch bodennahe Grenzschicht genannt), die etwa 10 % der Grenzschicht umfasst. Ihre Höhe beträgt am Tage etwa 50 bis 150 m, in der Nacht treten nur Werte von 10 bis 50 m auf. Innerhalb dieser Schicht lassen sich die Profile der horizontalen Windgeschwindigkeit, der Temperatur, der Feuchte und anderer passiver Größen gemäß der sogenannten *Monin-Obuchov*'schen Ähnlichkeitstheorie mittels universeller (linear-logarithmischer) Funktionen beschreiben. Die Windgeschwindigkeit innerhalb der *Prandtl*-Schicht nimmt Werte von etwa 70 bis 80 % der reibungsfreien Windgeschwindigkeit an der Obergrenze der Grenzschicht an, wobei sich ihre Richtung kaum ändert. Oberhalb der *Prandtl*-Schicht folgt die *Ekman*-Schicht, die durch eine charakteristische Drehung und Betragsänderung des Windvektors mit der Höhe im Zusammenspiel von Druckgradient-, Coriolis-, und Reibungskraft gekennzeichnet ist. Es wird deshalb gelegentlich von der Spiralschicht gesprochen. An der oberen Berandung verfügt die atmosphärische Grenzschicht über eine freie Begrenzungsfläche und einen Übergangsbereich zwischen turbulenter und nicht-turbulenter Strömung. In diesen schmalen Bereich an der Obergrenze wechseln sich turbulente mit nicht-turbulenten Zonen ständig ab. Außerhalb der Grenzschicht kann man die Strömung in erster Näherung als reibungsfrei ansehen, da die Turbulenzintensität (außerhalb von Wolken) um einige Größenordnungen kleiner ist.

3 Eigenschaften turbulenter Strömungen

Bei Flüssigkeiten und Gasen, die zusammen als Fluide bezeichnet werden, wird die Bewegung von zwei elementaren Eigenschaften bestimmt, der Viskosität und der Trägheit. Das Verhältnis dieser beider Eigenschaften wird durch eine spezielle Kennzahl beschrieben, die nach dem englischen Physiker *O. Reynolds* benannt ist und die von dem Fluid sowie der Geschwindigkeit und der Größe des durchströmten Gebietes abhängt.

Es scheint schwierig zu sein, eine geeignete Definition für „Turbulenz“ zu finden. Daher ist es zweckmäßig, den Begriff „Turbulenz“ an einem Beispiel zu erläutern. Wir betrachten hierzu ein Experiment von *Reynolds*, der die Strömung von Flüssigkeiten in Rohren

untersuchte. Er konnte den Charakter der Strömung dadurch sichtbar machen, dass er Farbstoff in die Flüssigkeit eintreten ließ. Bei geringen Geschwindigkeiten bildete sich ein glatter Farbfaden aus. Die Strömung verlief also parallel zu den Wänden. Bei höherer Geschwindigkeit änderte sich der Charakter der Strömung. Der Farbfaden machte schwankende Bewegungen und wurde zerrissen. Schließlich war die Flüssigkeit vollständig eingefärbt. Der Charakter der Strömung hatte sich geändert, wobei sich der Strömungswiderstand erhöhte und die Geschwindigkeit verringerte. Typisch für diesen zweiten Fall sind die Querbewegungen. Man nennt diese Strömungsform turbulent, während die erstere laminar genannt wird oder Schichtströmung, weil die verschiedenen Schichten der Strömung glatt übereinander liegen.

Wir können anhand von *Reynolds'* Versuch einige Charakteristiken der Turbulenz zusammenstellen [3-6], [9]:

1. *Turbulenz ist dreidimensional.* Der Versuch von *Reynolds* zeigte, dass bei turbulenter Strömung, im Gegensatz zur laminaren, Querbewegungen der Flüssigkeit typisch sind. Man kann bei geeigneter Ausführung des Versuches sehen, dass die Zusatzbewegungen tatsächlich in drei Komponenten erfolgen. Das ist auch plausibel, da die Zusatzbewegungen mit Druckschwankungen verbunden sind und der Druck als skalare Größe allseitig gleichmäßig wirkt. Daher werden, auch wenn die Anregung der Querbewegungen vorwiegend in einer Richtung erfolgt, die kleineren Ausgleichsbewegungen in allen Richtungen erfolgen.

2. *Turbulenz ist irregulär, zufällig.* Die Beobachtung des gefärbten Flüssigkeitsfadens in dem *Reynolds'* schen Versuch zeigt, dass die Schwankung und die Vermischung in unregelmäßiger Weise vor sich geht. „Zufällig“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Bewegungen der Flüssigkeitsteilchen chaotisch sind und nicht im einzelnen verfolgt oder vorausberechnet werden können.

3. *Turbulenz ist wirbelhaft.* Man stellt sich die turbulenten Zusatzbewegungen oft als Wirbel vor oder spricht jedenfalls von Wirbeln, wenn man die turbulenten Zusatzbewegungen meint. Die größten Wirbel liegen in der Größe des Strömungsgebiets, die kleinsten im Millimeterbereich, oder darunter. In den großen Wirbeln befindet sich der Hauptteil der Energie der Strömung. Diese wird nach und nach in die kleineren Wirbel übertragen, bis sie in den kleinsten Wirbeln völlig durch viskose Reibung aufgezehrt wird (Energiekaskade).

4. *Turbulenz ist nicht-linear.* Diese Aussage bezieht sich auf die Struktur der grundlegenden Gleichungen. Nicht-linear sind die atmosphärischen Bewegungsgleichungen, d. h. in ihnen treten Glieder auf, die Produkte von Geschwindigkeitskomponenten enthalten. Dies hat zur Folge, dass kleine Störungen in der Strömung sich zu größeren Störungen verstärken können, die über längere Zeiten stabil bleiben.

5. *Turbulenz transportiert und vermischt.* Die Vermischung durch Turbulenz hatten wir bereits bei dem Versuch von *Reynolds* gesehen, bei dem die Turbulenz dadurch sichtbar wurde, dass der eingefärbte Flüssigkeitsfaden sich über die ganze Rohrbreite vermischte. Bei den Zusatzbewegungen nehmen die beteiligten Volumina ihre Eigenschaften mit und geben sie auf dem Wege und in ihrer neuen Umgebung ab. Es ist eine ganz wesentliche Folge der Turbulenz, dass bei den Zusatzbewegungen ganze Volumina der verschiedensten Größenordnungen bewegt werden, die mit ihrer Masse auch ihre jeweiligen Eigenschaften

transportieren. In der Tat sind die in der Atmosphäre durch Turbulenz hervorgerufenen Transporte um etwa den Faktor 10^5 größer als die molekularen Transporte.

6. *Turbulenz dissipiert Energie.* Die Zusatzbewegungen der Turbulenz beinhalten kinetische Energie. Da diese Energie ständig durch viskose Reibung aufgezehrt wird (genauer: in Wärme umgewandelt wird), benötigen turbulente Strömungen eine ständige Energiezufuhr zu ihrer Aufrechterhaltung.

Für die Ausbildung der atmosphärischen Turbulenz bestehen zwei Anregungsmechanismen: die mechanische Anregung und die thermische. Mechanisch werden durch die Scherung des Geschwindigkeitsprofils und die Rauigkeit der Oberfläche Fluktuationen in den Geschwindigkeitskomponenten erzeugt, die unterschiedliche Größenordnungen umfassen. Die mechanisch erzeugte Turbulenz wird auch oft (voll) erzwungene Turbulenz genannt. Andererseits wird die thermische Komponente der Turbulenz dadurch erzeugt, dass der Erdboden wärmer ist als die Luft in den bodennahen Schichten. Dann ist die Dichteschichtung labil und einzelne Luftpakete steigen auf, während zum Ausgleich kältere Luft herabkommt. Der Auftrieb, den die erwärmten Luftpakete besitzen, dient dann zur Verstärkung der Vertikalkomponente der ungeordneten Zusatzbewegungen. Die Heizung von unten kann allerdings auch so stark sein, dass in einigem Abstand von der Grenzfläche, wo der mechanische Anteil der Turbulenz zurückgeht, der Auftrieb so überwiegt, dass die Vertikalbewegungen in mehr oder weniger geordneten Aufwindschläuchen vor sich gehen (natürliche oder freie Konvektion). Der umgekehrte Fall stabiler Schichtung tritt z. B. nachts auf. Dann liegt wärmere Luft über kälterer Luft und bei Vertikalbewegungen müssen die Teilchen gegen die Auftriebskräfte der Dichteschichtung bewegt werden. Die dafür benötigte Energie wird aus der mechanisch erzeugten Energie der Turbulenz genommen. Dadurch wird die Turbulenz gedämpft und bei sehr starker Stabilität praktisch unterdrückt.

4 Organisierte Konvektion in der planetaren Grenzschicht

Atmosphärische Grenzschichtströmungen zeigen neben den turbulenten Bewegungen vielfach die Tendenz, sich selbst zu geordneten Strukturen zu organisieren [8]. Unter diesen räumlichen Strukturen sind Wolkenstraßen, offene und geschlossene Zellen besonders augenfällig als äußeres Kennzeichen eines rollenähnlichen bzw. hexagonalen Konvektionsmusters. Aufgrund von Satellitenbilddaufnahmen ist seit längerer Zeit bekannt, dass sich derartig kohärente Bewegungen relativ häufig mit signifikanten Amplituden ausbilden. Die organisierten Strömungssysteme tragen in hohem Maße zu den Vertikaltransporten von Impuls, Wärme und Wasserdampf in der atmosphärischen Grenzschicht bei und prägen im erheblichen Maße das Bewegungsbild der Grenzschicht, so dass ihre experimentelle und theoretische Untersuchung ein wichtiges Teilproblem bei der Erforschung des Energiehaushaltes der Atmosphäre ist.

Häufig sind in der Grenzschicht sogenannte Rollen anzutreffen, die als Wolkenstraßen sichtbar sind und durch Wirbel mit horizontaler Rotationsachse in der Atmosphäre erklärt werden können. Eine schematische Darstellung der Zirkulationsverhältnisse gibt Abb. 1. Man geht von der Vorstellung aus, dass es sich bei den Rollen um eine Art von Schraubenwirbeln handelt, die meist parallel zur Windrichtung ausgerichtet sind. In den aufsteigenden Ästen der Rollenzirkulation können sich bei entsprechender Feuchtigkeit Wolkenwalzen ausbilden, in den absteigenden Ästen ist der Raum wolkenfrei. Diese mesoskaligen Wirbel sind dem Grundstrom überlagert und zeichnen sich gegenüber den turbulenten Wirbeln durch einen höheren Organisationsgrad und ein

weniger chaotisches Verhalten aus. Die Länge dieser parallel zueinander angeordneten Wolkenbänder variiert zwischen 20 km und 500 km, der Abstand zweier Bänder und damit die horizontale Wellenlänge eines Wirbelpaares beträgt 2 km bis 8 km. Die vertikale Mächtigkeit der Wirbel variiert zwischen 0.8 km und 3 km. Sie sind nach oben hin oft durch eine Inversion begrenzt. Für das sogenannte Aspektverhältnis, der Verhältniszahl von Wolkenabstand zur Höhe der Konvektionsschicht, ergeben sich im allgemeinen Werte zwischen zwei und vier. Die horizontalen Wirbelachsen bilden mit der Richtung des Windes in der freien Atmosphäre Winkel zwischen $+20^\circ$ und -20° , wobei die zugehörigen Wolkenstraßen Verlagerungsbewegungen quer zu ihrer Achse zeigen können. Wolkenstraßen werden sowohl über Land beobachtet, wo sie üblicherweise infolge eines instabilen Windprofils auftreten, als auch über See, hauptsächlich bei winterlichem Kaltluftabfluss von Land- oder Eisflächen.

Die Bildung von Wirbeln mit horizontaler Rotationsachse kann zum einen durch dynamische Scherungsinstabilitäten der Grenzschichtströmung, zum anderen bei labiler Dichteschichtung durch thermische Instabilität ausgelöst werden. Die Bezeichnungen dynamisch und thermisch orientieren sich daran, woher die Energie für die Rollenbewegung genommen wird. Bei der dynamischen Instabilität werden die Wirbel durch die kinetische Energie der Grundströmung gespeist, bei der thermischen beziehen die Wirbel die Energie aus dem Vorrat der potentiellen Energie der Dichteschichtung. Tiefere Einblicke in die Instabilitätsmechanismen lassen schon einfache lineare Modelle zu. So zeigen die Störungsrechnungen, dass sich in Strömungen mit ursprünglich turbulentem vertikalen Austausch bei kritischen Dichtegradienten oder bestimmten Krümmungen des vertikalen Geschwindigkeitsprofils Störbewegungen relativ kleiner Wellenzahlen ausbilden müssen, dass Zellstrukturen entstehen, die auch in Gegenwart statistischer Turbulenz den weitaus größten Teil der vertikalen Transporte leisten und so für eine gute Durchmischung der Grenzschicht sorgen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten zeigen hinsichtlich der Dimension der Rollen eine prinzipielle Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Die linearen Theorien vermögen allerdings nur den Einsatz der Konvektion zu beschreiben, da nur zu diesem Zeitpunkt die Betrachtung sehr kleiner Störungsamplituden gerechtfertigt ist; sie können aber nicht die zeitliche Entwicklung der Wirbelrollen beschreiben und lassen keine quantitativen Aussagen über die mit ihnen verbundenen Transporte von Impuls und Energie und deren Änderung mit der Höhe zu. Daher wurden neben den eben genannten Verfahren nichtlineare Rechenmodelle entwickelt, mit denen sich die Turbulenz- und Sekundärzirkulationsstruktur simulieren lässt (siehe Abschnitt 5).

5 Simulation und Modellierung turbulenter Strömungen

5.1 Turbulenzsimulationen

Fortschritte beim Verständnis und bei der Vorhersage turbulenter atmosphärischer Strömungen können nur im Verbund von Experiment, Theorie und numerischer Modellierung erzielt werden. Hierbei kommt der numerischen Simulation turbulenter Strömungen eine immer größere Bedeutung zu, besonders bei Problemen, die komplexe Wechselwirkungen zwischen Strömungsfeld, Wolken- und Strahlungsprozessen aufweisen. Der größte Vorteil der numerischen Simulation von Strömungen besteht darin, dass unter kontrollierbaren Bedingungen relativ schnell und preiswert Ergebnisse erhalten werden können [2].

Es gibt zwei Methoden die Strukturen und mikroskaligen Prozesse turbulenter hydrodynamischer Vorgänge durch eine numerische Lösung der grundlegenden Gleichungen zu untersuchen [5]: die **Direkte Numerische Simulation (DNS)** und die Grobstruktursimulation (engl: "Large Eddy Simulation", *LES*).

Den genauesten Zugang zur Turbulenzsimulation liefert die *DNS*, weil dabei die ungemittelten *Navier-Stokes* Gleichungen mit Ausnahme der unvermeidlichen numerischen Diskretisierung ohne zusätzliche Annahmen mit einer vorgegebenen zeitlichen und räumlichen Auflösung der Turbulenzelemente direkt gelöst werden. Sie erfasst alle Bewegungen, indem alle Skalen der Strömung bis hin zur *Kolmogorov*'schen Dissipationslänge aufgelöst werden. Atmosphärische Strömungen weisen sehr hohe *Reynolds*-Zahlen auf ($Re \sim 10^8$), was bei einer *DNS* eine große Anzahl von Gitterpunkten zur Auflösung des Modellgebiets erfordert. In der konvektiven Grenzschicht beispielsweise sind die größten turbulenten Wirbel durch die Mächtigkeit der Grenzschicht beschränkt und weisen daher Abmessungen von etwa 10^3 Metern auf. Die kleinsten Wirbel hingegen im Dissipationsbereich des Spektrums haben eine Ausdehnung von nur etwa 10^{-3} Metern. Das Spektrum der turbulenten Wirbel in der konvektiven Grenzschicht umfasst demnach einen Bereich von einem Millimeter bis zu einigen Kilometern. Eine numerische Integration der *Navier-Stokes* Gleichungen würde daher 10^{18} Gitterpunkte umfassen. Dies ist heute (und in absehbarer Zukunft) nicht durchführbar. Selbst ein Teraflop-Computer (10^{12} Gleitkommaoperationen pro Sekunde) hätte - heutige Lösungsalgorithmen vorausgesetzt - für eine Stunde Simulationszeit einige tausend Jahre zu rechnen.

Glücklicherweise weist die Turbulenz in der Grenzschicht folgende Eigenschaft auf: Unter einem energetischen Aspekt betrachtet sind nicht alle Skalen des Turbulenzspektrums gleich wichtig. Vielmehr steckt die meiste kinetische Energie in den größten Skalen der Bewegung, und in der Regel nimmt die Energie als Funktion der Wellenzahl nach einem Potenzgesetz hin zu größeren Wellenzahlen ab. Darüber hinaus sind auch für die Impuls-, Wärme- und Stofftransporte weitgehend die großen Strukturen verantwortlich, während die kleineren Wirbel einen eher dissipativen Charakter aufweisen, indem sie einen Energietransfer von niedrigen zu hohen Wellenzahlen bewirken. Diese Tatsachen bilden die Basis des Konzepts der Grobstruktursimulation. Die Grobstruktursimulationstechnik erfasst bzw. simuliert nur die großen, energiereichen Wirbel und berücksichtigt die Effekte nicht aufgelöster, subskaliger Dynamik durch eine einfache Parameterisierung. Demnach wird bei der *LES*-Technik statt der ursprünglichen *Navier-Stokes* Gleichungen ein Gleichungssystem gelöst, welches über den hochfrequenten Teil der turbulenten Schwankungen gemittelt ist. Man versucht also gar nicht erst die Bewegung der kleinsten Wirbel zu berechnen. Vielmehr simuliert man explizit nur die großen Turbulenzballen und versucht, den Einfluss der kleinen Wirbel angemessen zu berücksichtigen. Die gemittelten Felder der Geschwindigkeit und der anderen Zustandsgrößen variieren viel langsamer als die ursprünglichen, weshalb bei der *LES*-Technik ein weitaus gröberes Rechengitter als bei der *DNS*-Technik zur Simulation von Strömungen hoher Turbulenzgrade erforderlich ist. Um die sogenannte Grobstruktur, die die vom Gitter aufgelösten Bewegungsvorgänge enthält, von der Feinstruktur, den sogenannten subskaligen Beiträgen (engl.: "subgrid-scale" (*SGS*) - Anteil) zu unterscheiden, müssen die in Raum und Zeit kontinuierlichen *Navier-Stokes* Gleichungen räumlich gefiltert werden. Die Bezeichnung *LES* ist üblicherweise den Anwendungen vorbehalten, bei denen die Skala der Filteroperation (Filterbreite) innerhalb oder zumindest sehr nahe am Trägheitsunterbereich der dreidimensionalen Turbulenz liegt. In diesem Fall kann für den überwiegenden Teil der Grenzschicht der dissipative Effekt der kleinen Wirbel mit einfachen Turbulenzmodellen erfasst werden, die auf der Annahme der

Gesetzmäßigkeiten des Trägheitsunterbereichs im Turbulenzspektrum basieren. Nur in unmittelbarer Wandnähe und innerhalb der Entrainmentzone am Oberrand der Grenzschicht, wo die energieintensiven Wirbel kleinere Abmessungen als die Filterskala annehmen, wird die Annahme einer auf dem Trägheitsunterbereich basierten Theorie fragwürdig. Da in diesem Höhenbereich nahezu das gesamte Bewegungsspektrum subskalig ist, sind zur Parameterisierung dieser Effekte aufwendigere Feinstrukturmodelle erforderlich. Trotz dieser konzeptionellen Schwäche stellen *LES*-Modelle die geeignetsten Instrumente dar, um Grundlagenfragen zur Turbulenz zu beantworten, und sie können darüber hinaus dazu verwendet werden, komplexere Schließungsansätze für gröberskalige Modelle weiterzuentwickeln, zu testen und zu entwerfen.

Am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg wurde ein Grobstruktursimulationsmodell entwickelt, mit dem sich turbulente atmosphärische Strömungen beschreiben lassen. Das verwendete Modell zeichnet sich dadurch aus, dass Phasenübergänge des Wassers bei der Wolkenbildung und -dissipation, die langwellige Strahlungsabkühlung in Wolken und der Einfluss einer großräumigen Vertikalbewegung berücksichtigt werden können. Die Eignung der Grobstruktursimulationsmethode zur realitätsnahen Beschreibung der turbulenten Strukturen in der Atmosphäre wird im folgenden anhand eines Beispiels demonstriert, bei dem die Heizung von der unteren Berandung (konvektive Grenzschicht während eines Kaltluftausbruches den wesentlichen Antrieb für die Umschichtung der Wolken liefert).

Das Beispiel befasst sich mit der Simulation der konvektiven Grenzschicht während eines Kaltluftausbruches. In Anlehnung an einen während der Messkampagne *ARKTIS* 1988 in der Grönlandsee beobachteten Fall wird versucht, die sich unter Bedingungen eines Kaltluftausbruches vollziehende Entwicklung der Grenzschicht nachzuvollziehen. Zur Veranschaulichung der berechneten Wirbelstrukturen sind in Abb. 2 typische Realisationen der Sekundärzirkulation in Horizontal- und Vertikalschnitten zu verschiedenen Zeitpunkten der Entwicklung dargestellt. Gezeigt werden Isolinien des normierten Flüssigwassergehalts, wobei zur Skalierung das in der betreffenden Schnittebene auftretende Betragsmaximum verwendet wird. Die Ergebnisse der dreidimensionalen Modellrechnungen belegen, dass sich bei Vorgabe des beobachteten Temperaturunterschiedes von etwa -5 K zwischen Luft und Wasser im Modell als Reaktion auf eine kurzzeitige Störung des anfänglich horizontal homogenen Temperaturfeldes bereits nach ca. 15 Minuten Grenzschichtrollen und Wolkenstraßen ausbilden, die bezüglich der Richtung des geostrophischen Windes einen Orientierungswinkel von etwa 50° aufweisen. Nach einer Simulationszeit von 30 Minuten stimmen sowohl die Wolkenhöhe von 550 m als auch die Wellenlänge der entstehenden Wolkenbänder von etwa 1300 m gut mit den Beobachtungen überein. Die Mächtigkeit der Wolkenschicht und der Bedeckungsgrad nehmen mit zunehmendem Abstand von der Eiskante zu. Nach zwei Stunden Integrationszeit hat sich eine 450 m mächtige geschlossene Wolkendecke gebildet, in der die rollenförmige Strömungsstruktur, deren Wirbelachsen fast parallel zur Richtung des geostrophischen Windes ausgerichtet sind, jedoch noch klar erkennbar bleibt. Eine mit dem Modell durchgeführte Parameterstudie zeigt, dass sowohl die Intensität der Sekundärzirkulation als auch der Bedeckungsgrad sehr empfindlich auf die Struktur des großräumigen Feuchtefeldes reagiert.

6 Turbulenzmodellierung

Turbulente Strömungen verlaufen unregelmäßig, indem komplizierte Variationen in Abhängigkeit von Ort und Zeit auftreten, so dass eine Einzelmessung nur ein Zufallsergebnis liefert. Tatsächlich sind nur statistische Eigenschaften einer turbulenten Bewegung reproduzierbar. Die zeitliche Entwicklung

eines Strömungsfeldes könnte im Prinzip mit Hilfe der Differentialgleichungen der Kontinuumsmechanik (*Navier-Stokes* Gleichungen) bestimmt werden. Allerdings kann nur bei exakter Kenntnis der Anfangs- und Randbedingungen die zeitliche Entwicklung der Strömung eindeutig bestimmt werden. Die Lösungen des Differentialgleichungssystems sind damit zwar im mathematischen Sinne determiniert, im physikalischen Sinne hingegen unvorhersagbar, da selbst noch so kleine Unbestimmtheiten in der Kenntnis der Anfangsbedingungen das spätere Verhalten der Lösung entscheidend beeinflussen. Unkontrollierbare Störungen in den Anfangs- und Randbedingungen im Zusammenhang mit einer Instabilität sind dafür verantwortlich, dass die Strömung bei jeder Realisation anders verläuft. Die deterministische Berechnungsweise eines Turbulenzfeldes erscheint daher hoffnungslos [6].

Eine Theorie turbulenter Strömungen ist daher ohne die Hilfe von Methoden und Vorstellungen der mathematischen Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie nicht denkbar. In der Turbulenztheorie ist man nur an statistischen Eigenschaften des Turbulenzfeldes interessiert. Das Strömungsfeld wird als räumlich stochastischer Prozess aufgefasst, der durch die Angabe unendlich vieler Verbundwahrscheinlichkeitsdichten vollständig beschrieben wird. Wie im vorigen Abschnitt erläutert, wäre prinzipiell auch ein direkter numerischer Zugang denkbar, indem das Gleichungssystem mit Hilfe von numerischen Verfahren gelöst würde. Zu jeder Störung der Anfangs- und Randbedingungen könnte dann eine Lösung ermittelt werden. Mit einer hinreichenden Anzahl von Realisationen aus der Gesamtheit der in Betracht kommenden Anfangs- und Randbedingungen, könnten dann statistische Kenngrößen der Verteilung bestimmt werden. Diese Vorgehensweise ist bisher nur bei Strömungen kleiner bis moderater *Reynolds*-Zahlen möglich. Auch die *LES*-Modellierung ist gegenwärtig noch ein reines Forschungsinstrument, welches in der Lage ist, bei sehr hohem Rechenaufwand Simulationen homogener Grenzschichtströmungen mit sehr hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung darzustellen. Sie trägt damit wesentlich zur Verbesserung des Verständnisses der Struktur der atmosphärischen Grenzschicht bei, sie kann jedoch nicht als Standardverfahren zur Berechnung turbulenter Strömungen eingesetzt werden.

Aus diesen Gründen wird in der Praxis im allgemeinen ein indirekter Zugang gewählt. Die hydro- und thermodynamischen Gleichungen werden nicht mehr zu einem deterministischen Lösungsverfahren herangezogen, sondern nur noch zur Berechnung der die Verteilungen charakterisierenden Größen benutzt. In jedem Fall erweist sich die vollständige statistische Beschreibung eines Zufallsfeldes als sehr komplizierte Aufgabe. Deshalb beschränkt man sich bei der Berechnung eines Turbulenzfeldes in der Regel auf wenige (zentrale) Momente der untersten Ordnungen. Der Nachteil bei dieser Betrachtungsweise ist darin zu sehen, dass bedingt durch die Nichtlinearität der ursprünglichen Grundgleichungen neue, unbekannte Größen auftreten und ein nicht vollständiges Gleichungssystem entsteht. Die entscheidende Forderung an eine Turbulenztheorie besteht daher in der Rückführung des neuen Gleichungssystems auf ein vollständiges Gleichungssystem für die statistischen Momente des turbulenten Strömungsfeldes. Dies ist der Kern des sogenannten Schließungsproblems [3-6], [9].

Der Übergang von den Bewegungsgleichungen der momentanen Strömung zur Bewegungsgleichung der turbulenten Strömung ergibt also ein System von Differentialgleichungen mit mehr unbekanntem Größen als Gleichungen. Um das Gleichungssystem lösen zu können, müssen Annahmen für die zusätzlichen Unbekannten gemacht werden, wobei Ansätze zur Bestimmung dieser (z. B. Kovarianzterme) als Schließungsansätze bezeichnet werden. Hierbei ist man auf Hypothesen und Näherungen angewiesen, die im allgemeinen nur aufgrund empirischer

Informationen und experimentell gemessener Daten heuristisch begründet werden können. Die dann gefundenen Gleichungen bilden das sogenannte Turbulenzmodell und schießen das System näherungsweise. Es gibt sehr komplizierte Theorien; die meisten bleiben im vertrauten Konfigurationsraum, andere, die spektrale Verteilung der Turbulenzenergie betreffende, sind im Wellenzahlraum angelegt, und wieder andere, z. B. solche für die turbulente Diffusion, bedienen sich des *Liouville*'schen Phasenraums. Allen gemein bleibt aber, dass sie versuchen, mittels Hypothesen, die unbekanntes gemitteltes Fluktuationsprodukte auf die bekannten Feldgrößen zurückzuführen.

7 Literatur

- [1] Garratt, J.R.: The atmospheric boundary layer. Cambridge University Press, Cambridge, (1992)
- [2] Griebel, M., Dornseifer, T., und Neunhoffer, T.: Numerische Simulation in der Strömungsmechanik, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, (1995)
- [3] Hinze, J.O.: Turbulence. An introduction to its mechanism and theory. McGraw-Hill, New York, (1959)
- [4] Panofsky, H.A., and Dutton, J.A.: Atmospheric turbulence – Models and methods for engineering applications. Wiley and Sons, New York, (1984)
- [5] Pope, S.B.: Turbulent flows. Cambridge University Press, Cambridge, (2000)
- [6] Rotta, J.C.: Turbulente Strömungen. Teubner Verlag, Stuttgart, (1972)
- [7] Schlichting, H.: Grenzschicht-Theorie. Braun Verlag, Karlsruhe, (1982)
- [8] Stull, R.B.: An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer, Dordrecht, (1988)
- [9] Tennekes, H., and Lumley, J.L.: A first course in turbulence. MIT Press, Cambridge, (1977)

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Schematische Darstellung der Struktur der Sekundärzirkulation bei Grenzschichtrollen in der atmosphärischen Grenzschicht.

Abb. 2: Simulation der Grenzschichtentwicklung während eines Kaltluftausbruchs. Dargestellt sind die Isolinien des normierten Flüssigwassergehalts in Vertikalschnitten (links) und Horizontalschnitten (rechts) durch das Modellgebiet zu verschiedenen Zeitpunkten der Grenzschichtentwicklung. Die Normierung erfolgte mit dem Maximum des Flüssigwassergehalts im jeweiligen Schnitt.

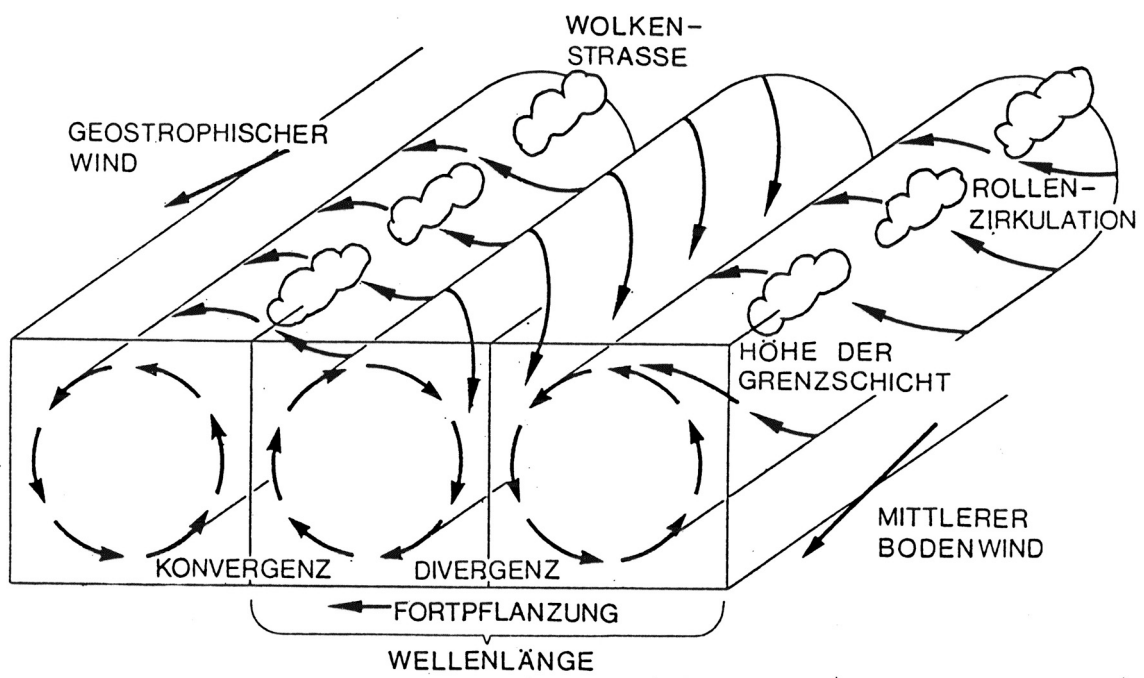


Abbildung 1

Kontrolllauf Flüssigwasser

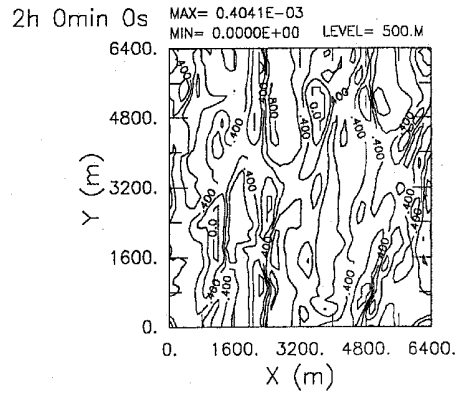
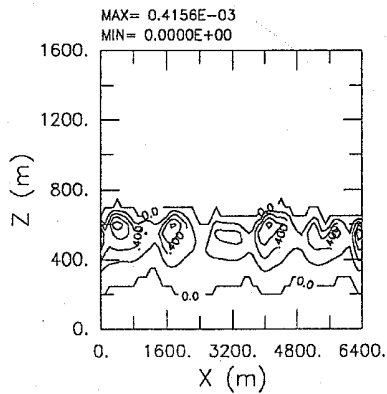
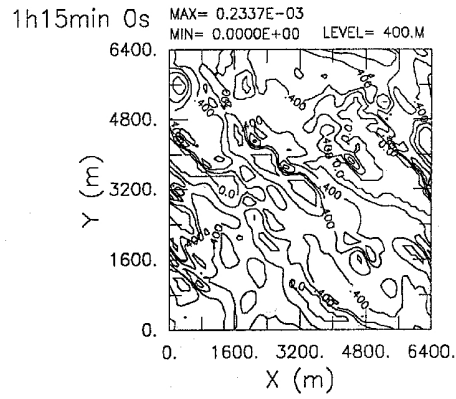
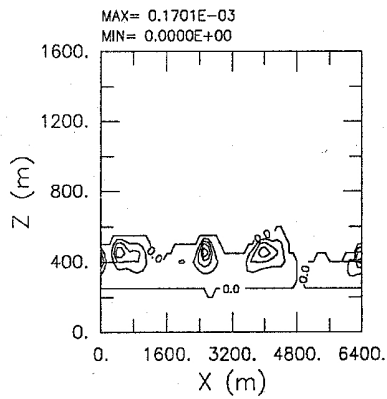
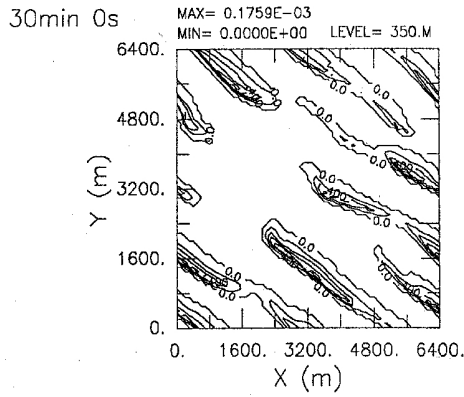
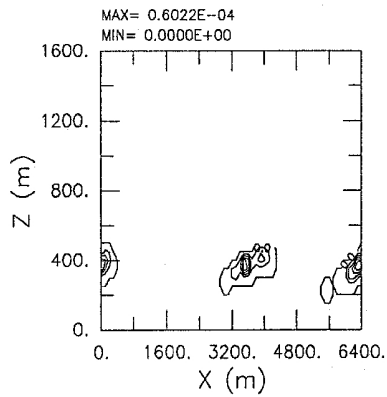


Abbildung 2

Anschrift des Autors:

PD Dr. Andreas Chlond
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Bundesstr. 53
D-20146 Hamburg

Zusammenfassung

Gegenstand des Artikels sind die Vorgänge in der atmosphärischen Grenzschicht, die etwa die unteren 100-1000 Meter in der Atmosphäre umfasst. Im Beitrag werden Struktur der Grenzschicht und Eigenschaften turbulenter Strömungen behandelt. Einen Schwerpunkt bildet die numerische Simulation turbulenter Grenzschichtströmungen sowie die Modellierung der turbulenten Transportprozesse.