

Zum Verständnis des Einflusses kleinskaliger Turbulenz auf Stratocumulus-Wolken

Understanding how small-scale turbulence controls stratocumulus clouds

Mellado, Juan-Pedro

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Korrespondierender Autor

E-Mail: juan-pedro.mellado@mpimet.mpg.de

Zusammenfassung

Turbulenz durchmischt die atmosphärische Grenzschicht mit der darüberliegenden freien Troposphäre. Dieser Prozess ist insbesondere wichtig, wenn Stratocumulus-Wolken die atmosphärische Grenzschicht bedecken. Details dieses Mischungsprozesses wurden mittels direkter numerischer Simulation untersucht. Insbesondere die Durchmischung aufgrund von Verdunstungsabkühlung und Scherung sowie durch Strahlungsabkühlung der oberen Wolkenschicht wurden separat quantifiziert, was eine Abschätzung der relativen Stärke dieser Prozesse aufgrund von Eigenschaften innerhalb und oberhalb der Wolke ermöglicht.

Summary

Turbulence controls how the atmospheric boundary layer mixes with the overlying free troposphere. This process is particularly important when stratocumulus clouds cap the atmospheric boundary layer. The details of how this mixing occurs have been investigated using direct numerical simulations. Specifically, the mixing due to evaporative cooling and local wind shear, and that due to radiative cooling, have been quantified separately, providing estimates for their relative strengths based on the bulk properties inside and above the cloud.

Turbulenz und Stratocumulus-Wolken

Fliegt man mit dem Flugzeug, bemerkt man während des Sinkfluges oft plötzlich auftretende Erschütterungen. Diese führen nicht nur zu Aufregung und Unannehmlichkeiten für die Flugpassagiere, sondern verursachen auch Klimaforschern, deren Modelle maßgeblich von Eigenschaften dieses Phänomens abhängen, Kopfschmerzen. Die plötzliche Anregung des Flugzeugs verdeutlicht, dass wir die relativ ruhige freie Troposphäre verlassen und uns in die mit turbulenten Bewegungen durchsetzte planetare Grenzschicht begeben (s. **Abb. 1**). Innerhalb dieser Übergangsschicht, die hier Einmischzone genannt werden soll, wird Luft aus der freien Troposphäre in die atmosphärische Grenzschicht verlagert – oder eingemischt. Schließlich mischt sich diese Luft aus der freien Troposphäre mit der turbulenten Luft in der Grenzschicht, und die thermodynamischen Bedingungen in der Einmischzone verändern sich dementsprechend.

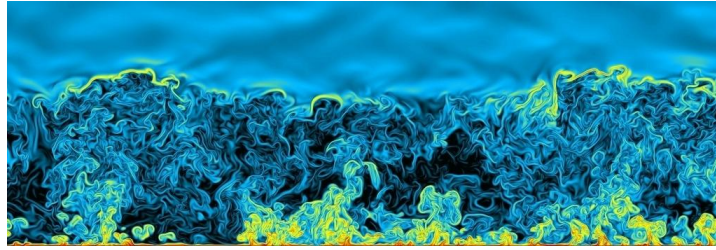


Abb. 1: Zu sehen ist ein Vertikalschnitt, der die spezielle Struktur einer turbulenten Grenzschicht – sie ist durchsetzt mit chaotischen Bewegungen auf verschiedenen Größenskalen – und der darüberliegenden freien Troposphäre – charakterisiert durch seichte Undulationen – zeigt. Die Farbe steht für die Stärke der lokalen Variationen im Dichtefeld und nimmt von schwarz über gelb bis rot zu.

© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Dieser Mischungsprozess und die sich daraus ergebenden thermodynamischen Eigenschaften innerhalb der Einmischzone sind von zentraler Bedeutung, wenn Stratocumulus-Wolken auftreten (s. **Abb. 2**). Stratocumuli sind tiefe Schichtwolken, welche die atmosphärische Grenzschicht über hunderte oder sogar tausende Kilometer bedecken können. Sie bestehen im Winter über Land häufig mehrere Tage, über relativ kalten Ozeanen sogar noch länger. Die zentrale Bedeutung dieser Wolken hat zwei Ursachen. Erstens bestimmen kleinskalige Prozesse, die lokal in der Einmischzone auf Skalen von Dekametern oder weniger ablaufen, die großskalige Dynamik der gesamten Grenzschicht einschließlich der Wolkendecke. Diese lokalen Prozesse beinhalten die Netto-Strahlungsabkühlung – verursacht durch langwellige Abstrahlung der Wolke – sowie die Verdunstungsabkühlung, verursacht durch die Verdunstung von Wolkentropfen an der Grenze der Wolke, wenn sich Wolkenluft mit trockener Luft aus der freien Troposphäre mischt. Zweitens ist die horizontale Ausdehnung der Stratocumulusdecken groß genug, um den globalen Strahlungshaushalt zu beeinflussen. Aktuelle Studien zur Klimasensitivität belegen nach wie vor sehr große Unsicherheiten in Verbindung mit diesem Wolkenregime [1, 2].

Fortschritte im Höchstleistungsrechnen erlauben heutzutage die direkte Simulation der turbulenten Bewegungen – ohne eine Turbulenzschließung oder ein Turbulenzmodell – innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht und der Einmischzone über mehrere Größenordnungen von den großen organisierten konvektiven Zellen bis zu den scheinbar zufälligen kleinen Wirbeln. Daraus ergeben sich Möglichkeiten, einige seit langem kontrovers diskutierte Fragen zu den oben genannten turbulenten Prozessen zu beantworten; dieser Beitrag dokumentiert einige Ergebnisse.

Der Einmischeffekt unter wolkenlosen Bedingungen

Zuerst soll eine wolkenfreie Grenzschicht betrachtet werden. Dies hat zweierlei Nutzen: Erstens schaffen wir so einen Referenzfall für die Untersuchung komplexerer, wolkiger Probleme. Zweitens dient diese Untersuchung als Beweis für die Anwendbarkeit der wissenschaftlichen Konzepte, nämlich der Untersuchung einer turbulenten Grenzschicht auf Grundlage einer direkten numerischen Simulation, was einen relativ modernen Ansatz in der Untersuchung von Phänomenen in der atmosphärischen Grenzschicht darstellt.



Abb. 2: Horizontaler Schnitt durch die Einmischzone einer von Stratocumulus bedeckten Grenzschicht. Gezeigt ist der Flüssigwassergehalt variierend von blau (trockene Luft, die absinkt) nach weiß (wolkige/feuchte Luft, die aus der Seite heraus in Richtung des Lesers aufsteigt).
© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Unsere Untersuchungen haben ergeben, dass selbst unter einfachsten Umständen – im Fall einer wolkenfreien, trockenen Grenzschicht ohne mittleren Wind, die in eine stabil geschichtete Troposphäre hineinwächst – die Einmischzone aus zwei unterschiedlichen Schichten besteht. Dies steht im Gegensatz zu früheren Untersuchungen, bei denen angenommen wurde, dass es sich bei der Einmischzone um eine einzelne Schicht handelt. Die obere dieser zwei Schichten ist charakterisiert durch die Spitzen der penetrierenden Konvektionstürme mit relativ ruhigen Regionen zwischen ihnen (s. Abb. 1). In dieser oberen Schicht erfährt die Turbulenz den größten Widerstand gegen ihr Vordringen in die freie Troposphäre. Die vertikale Penetration der Turbulenz kann mit einem relativ einfachen mechanistischen Model auf Grundlage eines aufsteigenden Luftpaketes erklärt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die kinetische Energie eines Luftpaketes beim Überschießen aus der Grenzschicht in die stabil geschichtete Troposphäre in potentielle Energie umgewandelt wird. Die zweite, darunter liegende, Schicht ist gekennzeichnet durch Wellentäler zwischen durch die Konvektionstürme geformten Wellenbergen. Diese untere Schicht ist turbulent und relativ gut durchmischt. Sie dient als Übergang zum darunter liegenden gut durchmischten Hauptteil der atmosphärischen Grenzschicht.

Diese Zweischichtstruktur stellt eine akkurate Parametrisierung der Höhenvariation physikalischer Eigenschaften innerhalb der Einmischzone dar. Diese Parametrisierung ist eine explizite Funktion einerseits externer Parameter des Problems (wie dem Auftrieb an der Oberfläche und der Stärke der stabilen Schichtung der freien Troposphäre) und andererseits des Zustandes der Grenzschicht, anzugeben als Funktion der Zeit oder der Grenzschichthöhe. Des Weiteren erklärt diese Zweischichtstruktur Abweichungen von Beobachtungen im Kontext bestehender Modelle der Einmischzone, die unter der Annahme einer einzelnen Schicht formuliert wurden.

Scherung als Antrieb von Verdunstungskühlung

Wie bereits erwähnt, verändern Wolkenprozesse wie Strahlungs- und Verdunstungsabkühlung die lokale Dynamik innerhalb der Einmischzone im Vergleich zum trockenen Fall, der im vorangehenden Abschnitt

betrachtet wurde. Diese beiden Prozesse können die oberen Schichten der Wolken so stark abkühlen, dass diese schwerer als ihre Umgebung werden und sich eine konvektive Instabilität entwickelt: Kalte Pakete wolkiger Luft fallen bis hinunter in die Kernregion der Wolke, verstärken Turbulenz und die Einmischung und beschleunigen dadurch die Auflösung der Wolke. Aber wie wichtig ist dieser Prozess relativ zu den anderen? Worauf sollte sich die Entwicklung von Modellen konzentrieren? Computer erlauben uns die präzise Lösung idealisierter Probleme, in denen einzelne Wolkenprozesse selektiv an- und ausgeschaltet werden können, wodurch deutlich wird, wie wichtig diese Prozesse sind.

Frühere Studien haben gezeigt, dass die Verdunstungsabkühlung allein zu schwach ist, um atmosphärische Beobachtungen zu erklären [3, 4]. Unsere Arbeit im letzten Jahr hat weiterhin ergeben, dass dieses Ergebnis unabhängig von der Dynamik der Wolkentropfen auf mikroskopischer Skala ist [5], und so eine lang andauernde Debatte abgeschlossen [6, 7]. Um einen Einfluss zu haben, benötigt die Verdunstungskühlung einen externen Antrieb, der die Durchmischung von Wolkenluft und Luft aus der freien Troposphäre verstärkt.

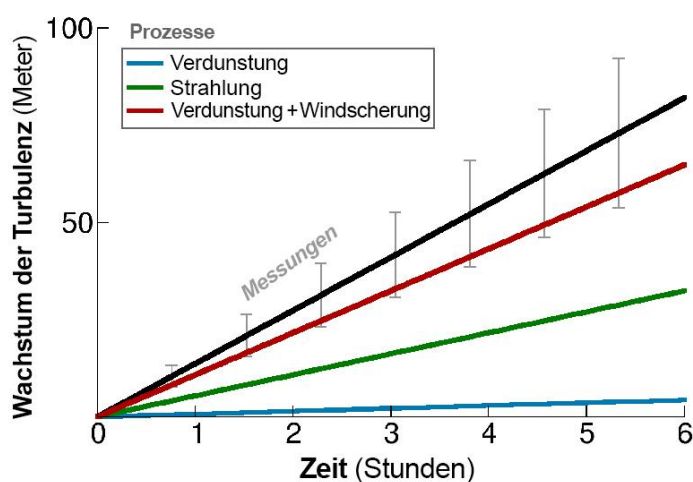


Abb. 3: Wachstum der Turbulenz in die freie Troposphäre aufgrund verschiedener Prozesse am Wolkenoberrand innerhalb der Einmischzone. Verdunstung allein (blaue Linie) kann die Messungen (schwarze Linie) nicht erklären, wohingegen Strahlung (grüne Linie) und insbesondere Scherung (rote Linie) die Messungen erklären können. Dies verdeutlicht, dass die letztgenannten beiden Prozesse wichtiger für das vertikale Wachstum der turbulenten Grenzschicht sind. Die Daten sind aus [4, 9, 8].
© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Ein solcher Antrieb ist Windscherung, wie kürzlich in [8] gezeigt wurde. Die zusätzliche Durchmischung durch Windscherung kann in der Tat den Einfluss der Verdunstungskühlung so verstärken, dass er vergleichbar zu dem der Strahlungsabkühlung wird, die wir separat in [9] betrachten. Wir haben explizite Parametrisierungen formuliert, um das Auftreten des Grenzfalls, in dem Verdunstungs- und Strahlungsabkühlung vergleichbar stark werden, vorherzusagen (s. **Abb. 3**): Unter für die Atmosphäre typischen thermodynamischen Bedingungen muss die Windscherung relativ stark sein, sodass Windgeschwindigkeiten um 1 m/s, die typisch für konvektive Bewegungen innerhalb der Grenzschicht sind, im Allgemeinen zu schwach sind, als dass die Verdunstungskühlung Mischungsprozesse an der Wolkenobergrenze dominieren könnte.

Es ist nun möglich, die Bedeutung der Turbulenz in atmosphärischen Phänomenen im Detail zu untersuchen. Kleinskalige Bewegungen innerhalb der Einmischzone der atmosphärischen Grenzschicht präzise aufzulösen war noch vor zehn Jahren schier unmöglich; die sich aus dieser Entwicklung neu ergebenden Möglichkeiten werden in den kommenden Dekaden neue Wege in der Klimaforschung eröffnen, insbesondere im Hinblick auf die großen Fragen in Bezug auf Wolken.

Literaturhinweise

[1] **Stevens, B.**

Atmospheric moist convection

Annual Review of Earth and Planetary Sciences 33, 605-643 (2005)

[2] **Wood, R.**

Stratocumulus clouds

Monthly Weather Review 140, 2373-2423 (2012)

[3] **Mellado, J. P.; Stevens, B.; Schmidt, H.; Peters, N.**

Buoyancy reversal in cloud-top mixing layers

Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 135, 963-978 (2009)

[4] **Mellado, J. P.**

The evaporatively-driven cloud-top mixing layer

Journal of Fluid Mechanics 660, 5-36 (2010)

[5] **de Lozar, A.; Mellado, J. P.**

Cloud droplets in a bulk formulation and its application for the buoyancy reversal instability

Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, ePub ahead of print, doi: 10.1002/qj.2234 (2013)

[6] **Deardorff, J. W.**

Cloud top entrainment instability

Journal of the Atmospheric Sciences 37, 131-147 (1980)

[7] **Randall, D. A.**

Conditional instability of the first kind upside-down

Journal of the Atmospheric Sciences 37, 125-130 (1980)

[8] **Mellado, J. P.; Stevens, B.; Schmidt, H.**

Wind shear and buoyancy reversal at the stratocumulus top

Journal of the Atmospheric Sciences 71, 1040-1057 (2014)

[9] **de Lozar, A.; Mellado, J. P.**

Direct numerical simulations of a smoke cloud-top mixing layer as a model for stratocumuli

Journal of the Atmospheric Sciences 70, 2356-2375 (2013)