Staubteufel: Wie diese entstehen, was sie ausmacht und inwieweit sie zu den Grenzschichttransporten beitragen

Die Entstehung und Eigenschaften von staubteufelartigen Wirbeln in konvektiven Grenzschichten - Eine numerische Studie mittels DNS und LES

***S. Giersch, S. Raasch**, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover*

Kurzgefasst

- Staubteufel beeinflussen u. a. die vertikalen Transporte innerhalb konvektiver Grenzschichten
- Zur quantitativen Abschätzung der Transporte bedarf es statistischer Angaben wie zur Häufigkeit des Auftretens oder zur Stärke von Staubteufeln
- Turbulenzauflösende Modellsimulationen können die benötigte Statistik liefern und die Staubteufelentstehung auf kleiner und großer Skala ergründen
- Erstmalige LES von Staubteufeln mit Druckminia wie sie in der Atmosphäre beobachtet werden
- Erstmalige statistische Analyse von mittels DNS simulierten Staubteufeln

Mit dem Begriff Staubteufel wird ein an der Oberfläche gebundener, konvektiver Wirbel mit vertikaler Rotationsachse bezeichnet, der durch das Aufwirbeln von Partikeln sichtbar wird (vgl. Abbildung 1). Typische Eigenschaften sind erhöhte Windgeschwindigkeiten von zum Teil mehr als 10 m s^{-1}, Temperaturmaxima und Druckminima im Wirbelzentrum, sowie ein säulenartiges Erscheinungsbild. Beobachtet werden Staubteufel sowohl auf der Erde als auch auf dem Mars bevorzugt in einer Umgebung mit geringem bis mäßigem Hintergrundwind und stark überadiabatischen Temperaturgradienten am Boden [2].

Staubteufel sind nicht nur optisch eindrucksvoll sondern auch ein dynamisch interessantes Phänomen. Zudem ist der verursachte Wärme- und Staubeintrag in die Atmosphäre von Interesse. Letzterer beinflusst den Strahlungshaushalt und mikrophysikalische Prozesse von Wolken. Dies hat wiederum Auswirkungen auf das Wetter und Klima der Erde. Auch die Luftqualität und der Flugverkehr sind durch die aufgewirbelten Partikel beeinträchtigt. Der Luftverkehr wird jedoch vor allem durch die sich plötzlich ändernden Windgeschwindigkeiten und -richtungen gefährdet. Des Weiteren steuern Staubteufel das Klima auf dem Mars. Nicht zuletzt spielt die erhöhte Verletzungsgefahr durch aufgewirbelte Gegenstände und die Gefährdung zukünftiger Erkundungsmissionen auf dem Mars bei der Untersuchung von Staubteufeln eine Rolle [3].

In der Vergangenheit wurden staubteufelartige Wirbel vor allem hinsichtlich der Morphologie, der charakteristischen Eigenschaften bezüglich Höhe, Durchmesser, Temperatur, Wind, Druck, Rotationssinn, Lebenszeit, Häufigkeit sowie hinsichtlich ihrer Entstehung und Erhaltung in homogenen und heterogenem Gelände untersucht. Auch der potentielle Partikeleintrag durch Staubteufel in die Atmosphäre stand zur Debatte [4]. Bezüglich der Entstehung von Staubteufeln wird bis heute diskutiert, warum, wo und wie sie sich bilden, d. h. woher die Staubteufel ihre Wirbelstärke erlangen. Auch zu den Mechanismen, die einen bereits existierenden Staubteufel aufrechterhalten, gibt es verschiedene Theorien. Genau an dieser Stelle soll die hier vorgestellte Arbeit ansetzen. So gilt es erneut charakteristische Merkmale von Staubteufeln herauszuarbeiten und den beobachteten Wertebereich nachzusimulieren. Dabei soll darauf geachtet werden, inwieweit Staubteufel von gewissen Parametern, wie dem Hintergrundwind oder dem bodennahen Wärmestrom, abhängen. Zusätzlich wird ergründet, wo Staubteufel bevorzugt entstehen, wie der anfängliche Bildungsprozess aussieht und wo hierbei die notwendige Wirbelstärke herkommt. Schließlich steht eine Quantifizierung der vertikalen Transporte von Staubteufeln zur Diskussion.

Zur Untersuchung der zuvor geschilderten Thematik wird das am Institut für Meteorologie und Klima-

***Abbildung 1:** Im Jahre 2012 fotografierter Staubteufel in der schweizerischen Gemeinde Schüpfheim [1].*

tologie entwickelte PALM Modellsystem für direkte numerische Simulationen (engl. *Direct Numerical Simulation*, DNS) und Grobstruktursimulationen (engl. *Large-Eddy Simulation*, LES) eingesetzt [5], um turbulenzauflösende Staubteufelsimulationen zu realisieren. Die DNS ermöglicht eine explizite Auflösung aller Turbulenzskalen auf Kosten eines im Vergleich zur Atmosphäre deutlich kleineren Gebiets von wenigen Metern, während die LES reale Staubteufel in einer konvektiven atmosphärischen Grenzschicht abbilden soll mit der Einschränkung, kleinskalige Turbulenz nur zu parametrisieren. Die DNS Ergebnisse dienen dem unmittelbaren Vergleich mit LES Daten sowie mit unter Laborbedingungen erzeugten staubteufelähnlichen Wirbeln bei Rayleigh-Zahlen von bis zu 10^{11}. Dabei werden die unter Laborbedingungen durchgeführten Experimente in Kooperation mit der Arbeitsgruppe Ilmenauer Fass der Technischen Universität Ilmenau durchgeführt.

Die rechenintensiven Simulationen mit bis zu 10^{11} Gitterpunkten können nur von leistungsstarken Parallelrechnern wie dem HLRN-IV System des Norddeutschen Verbunds für Hoch- und Höchstleistungsrechnen in vertretbarer Zeit bewältigt werden. Der hohe Rechenaufwand ist zum einen der feinen Auflösung zur Erfassung der Wirbel und zum anderen dem großen Modellgebiet zur Erfassung der Rayleigh-Bénard-Konvektion bei der DNS sowie den dazu ähnlichen konvektiven Zellen innerhalb der atmopshärischen Grenzschicht bei der LES geschuldet.

Die bisher erzielten Ergebnisse unterstützen die Hypothese, dass Staubteufel insbesondere an den Schnittpunkten und Zweigen des sich entwickelnden oberflächennahen Konvektionsmusters auftreten (vgl. Abbildung 2). Zudem konnten erstmals Staubteufel mittels LES simuliert werden, die der beobachteten Stärke entsprechen. Hierbei wurde eine Gitterweite von 2 m bei einem Modellgebiet von $4 \times 4 \times 2\,\mathrm{km}^3$, ein moderater Hintergrundwind und eine heterogen geheitze Oberfläche verwendet bzw. angenommen. Des Weiteren zeigt sich, dass Staubteufel bei heterogen geheizten Oberflächen bevorzugt über dem Gebiet mit höherem Wärmestrom auftreten und zwar an den Konvergenzlinien der sich ausbildenden Sekundärzirkulation [6]. Darüber hinaus ist es erstmals gelungen bis Rayleigh-Zahlen von 10^{11}systematisch Staubteufel mittels DNS zu simulieren, statistisch auszuwerten und diese mit Erkenntnissen aus LES zu vergleichen. So sind die Staubteufeleigenschaften abgesehen von den vom Setup verursachten Unterschieden nahezu identisch, was darauf schließen lässt, dass die Turbulenzparametrisierung der kleinen Skalen in atmosphärischer LES bei ausreichend feiner Auflösung von wenigen Metern kaum Einfluss nimmt auf die Staubteufelentstehung.

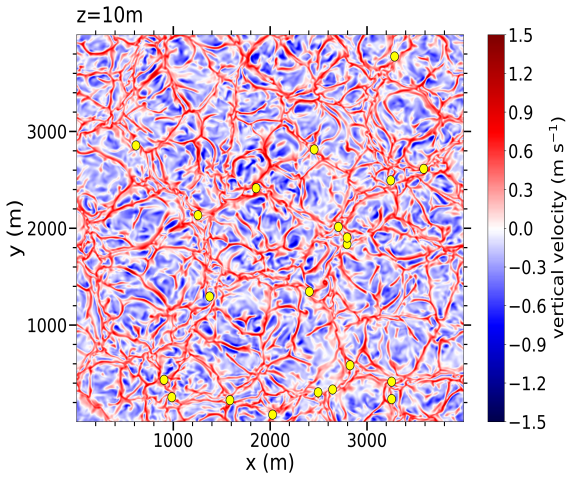

Abbildung 2: *Instantane Vertikalgeschwindigkeit in 10 m Höhe für das mit LES simulierte Modellgebiet. Die Punkte kennzeichnen die während des Untersuchungszeitpunktes detektierten Staubteufelzentren [6].*

Zukünftig steht der unmittelbare Vergleich zwischen Experiment und DNS im Vordergrund sowie die Frage nach dem Vorticityursprung und die Quantifizierung des vertikalen Staub- und Wärmetransports.

WWW

https://palm.muk.uni-hannover.de

Weitere Informationen

[1] http://www.sturmarchiv.ch/index.php/20120530_01_Staubteufel_Schüpfheim

[2] D. Reiss et al.: *Dust Devils*, Springer, 426 S. (2017)

[3] R. D. Lorenz et al., *Space Sci. Rev.* **203**, 1-4, pp. 5-37 (2016) doi:10.1007/s11214-016-0239-2

[4] M. Balme, R. Greeley, *Rev. Geophys.* **44**, RG3003 (2006). doi:10.1029/2005RG000188

[5] B. Maronga et al., *Geosci. Model Dev.* **13**, pp.1335–1372 (2020). doi:10.5194/gmd-13-1335-2020

[6] S. Giersch, F. Hoffmann, M. Brast, S. Raasch *J. Geophys. Res.*, accepted (2019).

Projektpartner

Arbeitsgruppe Ilmenauer Fass der Technischen Universität Ilmenau

Förderung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projketnummer RA 617/31-1