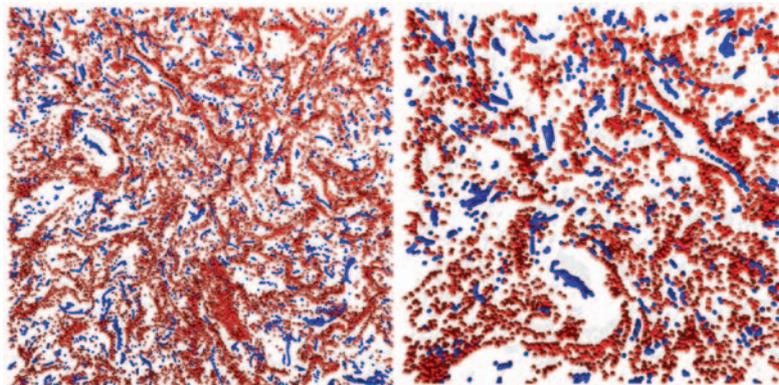


## ■ Wenn Teilchen in Turbulenz geraten

Erlaubt ein neuer dimensionsloser Parameter vorherzusagen, ob dispergierte Teilchen in einer turbulenten Strömung die Turbulenz verstärken oder abschwächen?

Schon lange gilt es als große Herausforderung, das Phänomen der Turbulenz zu verstehen. Dies ist nicht zuletzt wegen ihres „multiskaligen“ Verhaltens so schwierig: Die äußere Längenskala  $L$  (z. B. die Größe eines Behälters) kann um viele Größenordnungen über der inneren Längenskala  $\eta$  liegen, bei der die Viskosität zu einer Glättung führt. Dennoch sind beide Längenskalen stark miteinander gekoppelt. Das Problem wird schwieriger, je größer die Reynolds-Zahl  $Re$  – das Verhältnis zwischen Trägheits- und viskosen Kräften – wird, denn es gilt  $L/\eta \sim Re^{3/4}$ . Bei einer typischen turbulenten Strömung im Labor liegt  $Re$  bei  $10^6$ , in der Atmosphäre sind dagegen Werte von  $10^9$  keine Seltenheit.

Wenn die turbulente Strömung zudem Teilchen transportiert, verkompliziert sich das Problem noch weiter. Doch gerade diese Situation kommt in Natur und Technik häufig vor. Beispiele sind Aerosole, Regentropfen, Schneeflocken oder Staubteilchen in der Atmosphäre (speziell in Wolken), Plankton in den Ozeanen oder katalytische Teilchen und Blasen in der Prozesstechnologie. In solchen dispergierten Mehrphasenströmungen ist *a priori* nicht klar, wie sich die Teilchen in der turbulenten Strömung verteilen, die aus Wirbeln unterschiedlichster Größen besteht. Nur eins ist sicher: Die Partikel verteilen sich gewiss nicht homogen (Abb.). Partikel, deren spezifisches Gewicht größer als das der Trägerflüssigkeit ist, werden aufgrund der Zentrifugalkraft aus den Wirbeln herausgeschleudert, während leichtere Teilchen sich im Kern der Wirbel ansammeln. Diesen Effekt kann jeder leicht beobachten, wenn er ein Glas mit sprudelndem Wasser umrührt. Es ist ebenfalls *a priori* unklar, ob die Teilchen die Turbulenz verstärken oder abschwächen (vgl. auch [1]). Man betrachte z. B. schwere Teilchen in Wasser: Einerseits lässt sich



In der Simulation ist zu erkennen, wie sich schwere (rot) und leichte (blau) Teilchen in einer turbulenten Strömung ( $St = 0,6$  und  $Re \sim 10^5$ ) räumlich verteilen (links). Die Vergrößerung (rechts) zeigt, dass sich die leichten Teilchen in den Kernen der faserartigen Wirbelregionen

akkumulieren, während die schweren Teilchen aus ihnen herausgeschleudert werden und sich in Bereichen größerer fraktaler Dimension ( $\sim 2,5$ ) anhäufen. Dieses Phänomen führt dazu, dass sich die verschiedenen Teilchensorten entmischen (Segregation). (nach [6])

E. Calzavara, Universität Twente

argumentieren, dass die ins Wasser geworfenen Teilchen sinken und dadurch die Strömung verstärken, wenn man von einem turbulenten Zustand ausgeht. Andererseits kostet es Energie, wenn die turbulente Strömung die schweren Teilchen in Bewegung und Rotation versetzt, sodass sich die Turbulenz abschwächen sollte.

Eine Hoffnung besteht darin, dass sich auf die übliche Weise ablesen lässt, wie sich die Turbulenz verstärkt oder abschwächt – also durch Betrachtung dimensionsloser Größen. Dafür kommen einige klassische dimensionslose Parameter in Frage: nämlich die Reynolds-Zahl  $Re$ , das Verhältnis der Dichten von Teilchen und Trägerflüssigkeit, die Volumenkonzentration der Teilchen und die Stokes-Zahl  $St$ . Letztere gibt das Verhältnis aus der Teilchen-Relaxationszeit und der intrinsischen Zeitskala des turbulenten Flusses an.

Tomohiko Tanaka und John Eaton von der Universität Stanford haben die Datensätze von 30 Experimenten mit unterschiedlichen Kombinationen von  $Re$ - und  $St$ -Werten analysiert [2]. Ihnen zufolge wirken sich die Teilchenkonzentration und das Dichteverhältnis nur quantitativ auf die

Verstärkung oder Abschwächung der Turbulenz aus. Dann blieben nur noch die Parameter  $Re$  und  $St$ , und in der durch diese beiden Kennzahlen aufgespannten Ebene finden Tanaka und Eaton keinen systematischen Trend. Datensätze, bei denen die turbulente kinetische Energie zu- oder abnimmt, waren zufällig über die  $Re$ - $St$ -Ebene verteilt. Die Autoren folgern, dass sich die Stokes-Zahl nicht als Kontrollparameter für die Modifikation der Turbulenz eignet.

Dieses Ergebnis und ihre weitere Dimensionsanalyse der zugrunde liegenden Navier-Stokes-Gleichung (mit einem zusätzlichen Antriebsterm, der die Wirkung der dispergierten Teilchen auf die Strömung modelliert) brachte Tanaka und Eaton dazu, einen neuen dimensionslosen Parameter einzuführen, den sie Teilchen-Impulszahl  $Pa$  nennen. Dieser Parameter lässt sich schreiben als

$$Pa = Re^2 St (\eta/L)^3.$$

Diese Zahl sollte mit  $Re^{-1/4} St$  skalieren, wenn man den oben genannten Ausdruck für  $L/\eta$  einsetzt. Die in der  $Re$ - $Pa$ -Ebene untersuchten Datensätze bilden verschiedene Gruppen: Für  $Pa < 10^3$  verstärkt sich die Turbulenz, für  $10^3 < Pa < 10^5$

Prof. Dr. Detlef Lohse, Physics of Fluids Group, Faculty of Science and Technology, MESA+ und Impact Institutes, University of Twente, 7500 AE Enschede, Niederlande

schwächt sie sich ab und für  $Pa > 10^5$  verstärkt sie sich wieder.

Dieses Ergebnis überrascht sehr, weil erstens die turbulente kinetische Energie nichtmonoton von  $Pa$  abhängt und weil man zweitens ganz und gar nicht annehmen würde, dass eine simple Reskalierung von  $St$  mit  $Re^{-1/4}$  auf einmal zu einer Gruppierung der Datensätze führen sollte.

Ganz ohne Zweifel wird diese Arbeit viele weitere Analysen veranlassen, zumal Tanaka und Eaton nur Datensätze einbezogen haben, bei denen sich die Turbulenz um mindestens fünf Prozent abschwächt oder verstärkt. Damit wollen sie experimentelle Ungenauigkeiten ausschließen.

In numerischen Simulationen der Navier-Stokes-Turbulenz (wie in [3]) sollten die relativen Ungenauigkeiten kleiner ausfallen. Hier wirken idealisierte Punktteilchen auf die Strömung und dienen somit als zusätzlicher Antriebsme-

chanismus. Die Reynolds-Zahlen, die sich in solchen Simulationen erreichen lassen, sind wesentlich kleiner als in den von Tanaka und Eaton analysierten Daten. Dennoch würden sie es erlauben zu berechnen, wie sich die turbulente kinetische Energie als Funktion von  $Re$  und  $Pa$  ändert. Daraus könnten sich systematische Trends ableiten lassen. Die Lücke zwischen Simulation und Experiment dürfte sich verringern, wenn man Tanakas und Eatons Analyse auf experimentelle Daten mit kleineren Reynolds-Zahlen ausdehnt.

Eine andere Erweiterung des Parameterraums würde Teilchen beinhalten, die leichter als die Trägerflüssigkeit sind, wie z. B. Blasen in turbulenter Strömung. Für diese existiert eine Fülle an numerischen [4] und experimentellen [5] Daten. Tanakas und Eatons Arbeit wird neue Arbeiten initiieren, die dann Hoffnung entstehen lassen werden, dass wir bei der Frage nach Teil-

chen in turbulenten Strömungen endlich Ordnung in das Gewimmel der Datenpunkte bringen können.<sup>\*)</sup>

Detlef Lohse

- [1] R. Gore und C. T. Crowe, *Int. J. of Multiphase Flow* **15**, 279 (1989); S. Elghobashi, *Appl. Sci. Res.* **52**, 309 (1994)
- [2] T. Tanaka und J. K. Eaton, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 114502 (2008)
- [3] K. D. Squires und J. K. Eaton, *Phys. Fluids A* **2**, 1191 (1990); S. Elghobashi und G. C. Truesdell, *Phys. Fluids A* **5**, 1790 (1993); O. A. Druzhinin und S. Elghobashi, *Phys. Fluids* **10**, 685 (1998); A. Ferrante und S. Elghobashi, *Phys. Fluids* **15**, 315 (2003)
- [4] E. Climent und J. Magnaudet, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 4827 (1999); I. M. Mazzitelli, D. Lohse und F. Toschi, *Phys. Fluids* **15**, L5 (2003)
- [5] M. Lance und J. Bataille, *J. Fluid Mech.* **222**, 95 (1991); J. Rensen, S. Luther und D. Lohse, *J. Fluid Mech.* **538**, 153 (2005)
- [6] E. Calzavarini, M. Cencini, D. Lohse und F. Toschi, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 084504 (2008); E. Calzavarini, M. Kerscher, D. Lohse und F. Toschi, *J. Fluid Mech.* **607**, 13 (2008)

<sup>\*)</sup> Dieser Artikel ist eine gekürzte Übersetzung von „Particles go with the flow“, vgl. [physics.aps.org/articles/v1/18](http://physics.aps.org/articles/v1/18).