

Tröpfchen in der Achterbahn

Ob Gase verbrennen, Planeten entstehen, Wolken sich auflösen oder ob es regnet – immer bestimmen turbulente Strömungen, wie das abläuft. So wichtig die Turbulenz ist, so wenig wissen Physiker bislang über sie. **Eberhard Bodenschatz** und seine Mitarbeiter am **Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation** wollen das ändern.



TEXT PETER HERGERSBERG

Wenn Eberhard Bodenschatz seine Forschung vorstellt, fängt er mit der Schönheit an: Auf seinem Notebook präsentiert er Bilder von Wolken: mal prall, mal eher hingehaucht, aber immer fluffig – und unendlich formenreich. „Diese Vielfalt verdanken die Wolken der Turbulenz“, sagt der Direktor am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation. Und die Turbulenz macht aus dem weißen Elefanten am Himmel im Nu eine Maus und aus dem Prinzen einen Frosch. Ohne die Turbulenz gäbe es nur Nebel, so grau und langweilig wie ein trister Wintertag.

So viel für die Ästheten. Bodenschatz liefert aber auch zahlreiche praktische Gründe, warum es sich lohnt die Turbulenz zu untersuchen: Turbulente Strömungen vermischen die Verbrennungsgase in einem Motor, sie erzeugen die Reibung eines Schiffes, das durch die Wellen schneidet, steuern die Entstehung von Sternen und Planeten – und bestimmen das Geschehen in der Atmosphäre: Weil starker Wind hochturbulent bläst, bewegt sich die Luft mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten. So werden nicht nur Flugzeuge durchgerüttelt, auch Windräder produzieren Strom deshalb nicht so effizient, wie sie es in einer gleichförmigen Strömung könnten. Und ohne Tur-

bulenz hätten Meteorologen vielleicht auch schon besser verstanden, wie sich Wolken bilden und auflösen.

Dass eine turbulente Strömung Teilchen besonders gut durchmischt, hilft aber auch in manch banalem Zusammenhang. Wer Milch in seinen Kaffee rührt, nutzt das aus und kann dabei das Prinzip der Turbulenz gut beobachten: Mit dem Rühren wirbelt er die Flüssigkeit durcheinander und führt ihr damit Energie zu. Der große Wirbel des kreisenden Löffels bricht sofort in immer kleinere Wirbel auf, bis die kleinsten Wirbel schließlich von Reibung aufgezehrt werden. Am Ende hat sich die Milch mit dem Kaffee gemischt und alle Bewegungsenergie hat sich in Wärme umgewandelt.

Im Detail zu beschreiben, was genau beim Verrühren der Kaffeesahne passiert, macht Physikern an sich schon genug Schwierigkeiten. Noch viel komplizierter wird das Ganze, wenn kleine schwere Teilchen wie Wolkenröpfchen von der Turbulenz verwirbelt werden. Welchen Bahnen die Tröpfchen dabei folgen, können Physiker bislang nur ansatzweise beschreiben.

Die Prozesse in Wolken zu untersuchen, gestaltet sich auch deshalb schwierig, weil sich in der Atmosphäre die stärkste Turbulenz auf der Erde findet. Je stärker eine Turbulenz, desto deutlicher der Unterschied zwischen

Hier geht es rund: In den Wolken um die Zugspitze untersuchen die Göttinger Forscher, wie Nebelröpfchen turbulent verwirbelt werden und wie sie sich zu Regentropfen zusammenballen.

den größten und den kleinsten Prozessen, die sich dabei abspielen: Die größten Wirbel, die bei der Bildung von Wolkenröpfchen mitmischen, erstrecken sich über Längen bis zu 100 Metern, während die kleinsten kaum einen Millimeter messen. Ein Maß für die Bandbreite der beteiligten Größen liefert die Reynolds-Zahl: Je höher sie steigt, desto weiter die Spanne der Werte – und desto stärker ist die Turbulenz.

EIN WINDKANAL FÜR BESONDERS STARKE TURBULENZEN

Wie turbulent die Achterbahnfahrt der Teilchen – in dem Fall der Tröpfchen in einer Wolke – verläuft, müssen Atmosphärenforscher wissen, wenn sie das Schicksal einer Wolke vorhersagen wollen. Denn die Bewegungen der Teilchen entscheiden auch darüber, wie oft sie zusammenstoßen – wie schnell aus den Wolkenröpfchen also Regentropfen entstehen, in denen die Wolke schließlich vom Himmel fällt. Zudem mischt die Turbulenz trockene und nasse sowie kalte und warme Luft. „Solange wir diese Prozesse nicht realistisch beschreiben können, fehlen den Klimamodellen die Formeln, um die Wolkenbedeckung und damit die Klimaentwicklung besser vorherzusagen“, sagt Eberhard Bodenschatz. Daher arbeiten er und seine Mitarbeiter an einem besseren Verständnis der Turbulenz. Und weil das eine große Aufgabe ist, brauchen sie ein großes Gerät, um sie zu lösen.

Das Labor, das die Forscher dafür gebaut haben, erreicht locker die Ausmaße einer Schulturnhalle. Durch die Halle streckt sich der Länge nach die Hochdruck-Turbulenz-Anlage – ein gut mannshohes knallrotes Rohr, das sich zu einer lang gezogenen Schlaufe schließt. Eines der beiden 18 Meter langen Hauptrohre ruht in wuchtigen Halterungen knapp über dem Boden, das andere etwa drei Meter darüber. Durch den ringförmigen Kanal werden die Forscher einen Wind blasen, der an einer Stelle ein Gitter mit schachbrettartig angeordneten Klappen passieren muss. „Indem wir gezielt einzelne Klappen schließen, erzeugen wir unter-



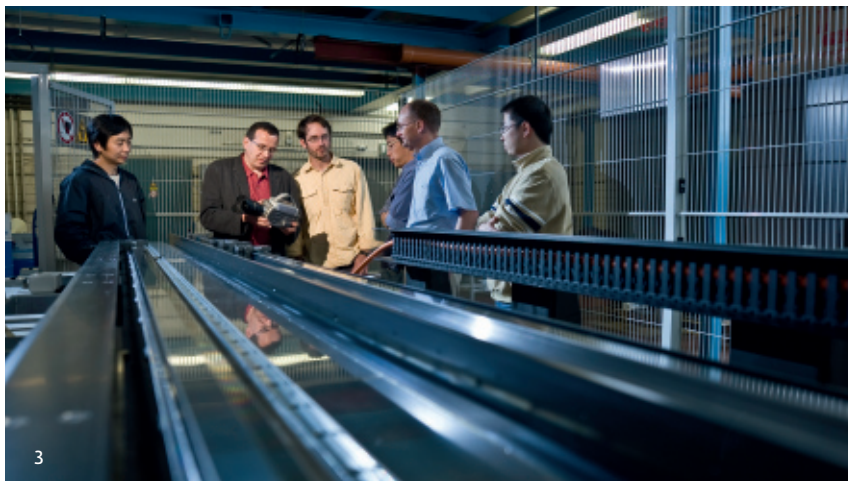
- 1 | Im Windkanal inspiziert Eberhard Bodenschatz das Messgerät, das die Geschwindigkeit der Strömung ermittelt.
- 2 | Für die nächste Runde in der Strömungsforschung: Der Göttinger Hochdruck-Windkanal ermöglicht es, die Bahnen einzelner Teilchen in extrem starken Turbulenzen zu untersuchen.
- 3 | Das Team hinter der Kamera: Haitao Xu, Eberhard Bodenschatz, Gregory Bewley, Ewe-Wei Saw, Holger Nobach und Hengdong Xi (von links). Im Vordergrund die Schiene, auf der ein Messschlitten einzelne Partikel in der Turbulenz verfolgen wird.

schiedliche turbulente Strömungen“, erklärt Holger Nobach, der den Aufbau des Windkanals als habilitierter Elektroingenieur betreut. Und das in Stärken, die sonst nur in der Atmosphäre zu beobachten sind.

Damit die Strömungen so turbulent verwirbelt werden wie in der Atmosphäre, schicken die Forscher nicht nur Luft durch den Windkanal, sondern auch Schwefelhexafluorid. Dessen Moleküle bringen besonders viel Masse mit und geben dem Gas so von Natur aus eine hohe Gasdichte. Zudem können die Göttinger Physiker es bis zum 15-Fachen des Atmosphärendrucks komprimieren. Dichte Gase erlauben nämlich Turbulenzen wie bei Wind und Wetter, ohne dass die Forscher ähnlich drastische Kräfte aufwenden müssten, um die Wirbel zu erzeugen. Denn dichte Gase besitzen eine niedrige effektive Viskosität – Physiker sprechen von der kinematischen Viskosität.

Die Viskosität gibt an, wie gut ein Gas oder eine Flüssigkeit fließt. Eine hohe Viskosität entspricht dabei einer zähflüssigen Angelegenheit. Die kinematische Viskosität ist gefragt, wenn wie bei der Turbulenz Beschleunigungen eine Rolle spielen. Dann beeinflusst auch die Dichte des Gases beziehungsweise die Masse seiner Moleküle das Fließverhalten. Je dichter das Gas, desto träger ist es und desto größer ist die Kraft, die man braucht, um es abzubremesen. So ermöglichen dichte Gase letztlich starke Turbulenzen.

Mit dem komprimierten Gas werden die Forscher winzige Teilchen durch den Windkanal jagen und sie beim Ritt auf der turbulenten Strömung live filmen. Zu diesem Zweck steuern sie einen Kameraschlitten über eine Schiene, die sich abgedeckt mit einer Plexiglasplatte über den Boden des unteren Hauptrohres zieht. Bis zu 30 000 Bilder pro Sekunde werden drei



Kameras jeweils von den Testpartikeln schießen und so ihre Bahn verfolgen. Noch in seiner Zeit an der Cornell Universität im US-amerikanischen Ithaca hat Eberhard Bodenschatz das Messprinzip ausgetüftelt – und hat eine völlig neue Perspektive auf das Phänomen eröffnet, indem er den Blick auf einzelne Partikel in der Achterbahn der Turbulenz ermöglichte.

LIVE-MITSCHNITT DER VERWIRBELTEN TEILCHEN

Benannt wird dieser Ansatz nach dem Wissenschaftler Joseph-Louis Lagrange, der das mathematische Instrumentarium entwickelte, um die Ergebnisse der Messungen an einzelnen Teilchen zu einer Theorie zu verarbeiten. Was Physiker bislang über die Turbulenz in Wolken wissen, hat ihnen ein ganz anderes Messprinzip verraten. Dabei sitzen die Forscher quasi an einem Punkt in der turbulenten Strömung und messen die schwankenden Geschwindigkeiten, mit denen Luft oder ein anderes Medium an ihnen vorbeiströmt. Dieser Blick auf das turbulente

Geschehen heißt Eulerisch, wiederum benannt nach dem Forscher, der den mathematischen Rahmen für die Messungen vorgab. Die Geschwindigkeitsschwankungen registriert dabei ein stromdurchflossener glühender Draht. Sein Widerstand reagiert extrem sensibel auf die Kühlung des vorbeiströmenden Gases, und der kühlende Effekt macht sich umso stärker bemerkbar, je schneller das Gas strömt.

„Solche Messungen haben viele grundlegende Beobachtungen ermöglicht“, sagt Haitao Xu, der in der Abteilung von Eberhard Bodenschatz ebenfalls turbulente Strömungen erforscht. So haben Eulerische Messungen ein gutes Bild von dem Geschwindigkeitsfeld geliefert, das in turbulenten Strömungen herrscht. Keinen Aufschluss haben diese Experimente dagegen über die Beschleunigungen gegeben, die Teilchen dabei erfahren. Denn um hierüber Aussagen treffen zu können, reicht es nicht, zu messen, wie schnell sich Teilchen aktuell an einem fixen Punkt bewegen. Die Beschleunigung der Partikel können Physiker nur ermitteln, wenn sie deren Flug verfolgen. So wie



Ein Spot für Wolkentröpfchen: Eberhard Bodenschatz und Haitao Xu bauen ein Gerät auf, das die Bahnen einzelner Tröpfchen mit einem Laser verfolgt.

Lage sind, turbulenten Luftströmungen zu folgen. Eigentlich sollte ihnen das schwerfallen. Denn im Vergleich zu den Molekülen der Luft sind selbst die winzigen Wolkentröpfchen noch träge Brocken. Sie werden daher leicht aus den stärksten Wirbeln der Turbulenz herausgeschleudert. Ganz so wie ein Lastwagen, der auf einer Autobahn mit lauter Personenwagen mitschwimmt, in einer Kurve ebenfalls leichter aus der Spur fliegt.

Fährt der Lastwagen dabei gerade auf der Überholspur – so wie ein Wolkentröpfchen, das ins Zentrum eines heftigen Wirbels gerät – wird er auf die Spuren mit ruhigerem Verkehr gedrängt. Daher tuckern Lastwagen eher gemächlich durch Kurven. Sowohl für den Lastwagen als auch für ein Wolkentröpfchen gilt jedoch: Sie müssen scharf bremsen, wenn sie aus den Bereichen mit Rasern herauskatapultiert werden und eine Kreuzung überqueren. Diese starke negative Beschleunigung beim Abbiegen erhöht das Kollisionsrisiko drastisch. Daher sollten die Tröpfchen in sehr turbulenten Wolken schneller aneinandergeraten und Regentropfen bilden als in ruhigerer Luft. „Bislang haben wir das in Wolken noch nicht beobachten können“, sagt Eberhard Bodenschatz.

In einer anderen Frage, die nur korrekt beantworten kann, wer genaue Kenntnis turbulenter Strömungen besitzt, sind die Physiker mit der Beobachtung einzelner Teilchen schon ein Stück weitergekommen. In der Frage nämlich, wie schnell sich zwei Fluide in einer turbulenten Strömung vermischen. Die Antwort darauf könnte dazu beitragen, viele geowissenschaftliche und technische Probleme zu lösen.

Als Fluide bezeichnen Physiker alle Stoffe, die fließen können, und meinen damit meistens Flüssigkeiten oder Gase,

das die Messungen ermöglichen, die Eberhard Bodenschatz und sein Team ersonnen haben.

Tatsächlich haben die Physiker direkt in den ersten Studien nach dem Lagrange-Prinzip herausgefunden, dass die Teilchen in einer turbulenten Strömung viel abrupter beschleunigt werden, als die gängige Theorie vorher sagte. Die Beschleunigung eines Wolkentröpfchens schwankt also sehr stark. Im Mittel ist die Beschleunigung so groß wie die Erdbeschleunigung und kann aber in der Spitze mehr als das 20-Fache erreichen. „Dieses Ergebnis zeigt, dass sich die Stöße von Tröpfchen in Wolken und damit ihr Wachstum nicht zuverlässig vorhersagen lassen, wenn wir nur die mittlere Beschleunigung berücksichtigen“, erklärt Eberhard Bodenschatz. Wie oft es zu Stößen komme, hänge nämlich nicht nur davon ab, wie sich das Gros der Teilchen

verhält. Darüber entscheide vor allem die Randgruppe der Teilchen, die zwar selten sind, aber besonders stark beschleunigt werden. Sie geraten besonders oft auf Kollisionskurs.

STARKE BESCHLEUNIGUNGEN FÜHREN ZU MEHR KOLLISIONEN

So könnten die starken Schwankungen in der Beschleunigung auch erklären, warum Tröpfchen in Wolken schneller zueinander finden, als die gängige Theorie erlaubt. Um das zu prüfen, wollen die Göttinger Forscher das Experiment unter den extrem ruppigen Bedingungen machen, wie sie in Wolken herrschen. Die ersten Messungen dazu sollen im Hochdruck-Windkanal noch in diesem Jahr starten.

In weiteren Experimenten wollen die Forscher auch aufklären, inwiefern Wolkentröpfchen überhaupt in der

aber auch Rauch oder feste Teilchen, die in einer Flüssigkeit schweben. Beispiele für die Mischung zweier Fluide sind die feuchte Wolkenluft, die mit der trockenen Luft in ihrer Umgebung vermischt wird, aber auch die Rauchschwaden aus einem Schornstein, die sich in der klaren Atmosphäre auflösen. Wie schnell die Mischung verläuft, lässt sich daran abschätzen, wie rasch sich etwa die Wege zweier Teilchen trennen, wenn sie durch die Turbulenz sausen. Klar ist, dass die Turbulenz die Stoffe besonders effektiv durchrührt, wie das im Detail abläuft, aber noch nicht.

MITTEN IN DEN WOLKEN – STUDIEN AUF DER ZUGSPITZE

Daher haben Eberhard Bodenschatz und Haitao Xu den Prozess in einem Modellsystem ebenfalls per Kamera verfolgt. Demnach werden sich zwei oder mehr Teilchen nur in sehr turbulenten Strömungen so schnell trennen, wie es eine lange akzeptierte Theorie vorhersagt. Meistens müssen die Physiker zudem die anfängliche Distanz zwischen den Teilchen berücksichtigen, um zu berechnen, wie schnell diese auseinanderdriften.

Dann gilt: Die Teilchen gehen umso rascher getrennte Wege, je näher sie sich anfangs sind. Das klingt vielleicht überraschend, doch es gibt dafür eine einfache Erklärung: Die großen Wirbel der Turbulenz bleiben länger stabil als die kleinen. Während die Partikel im Großen also lange gemeinsam im Kreis geführt werden, laufen ihre Bahnen im Kleinen schnell auseinander, wenn sich ihr kleiner gemeinsamer Wirbel auflöst.

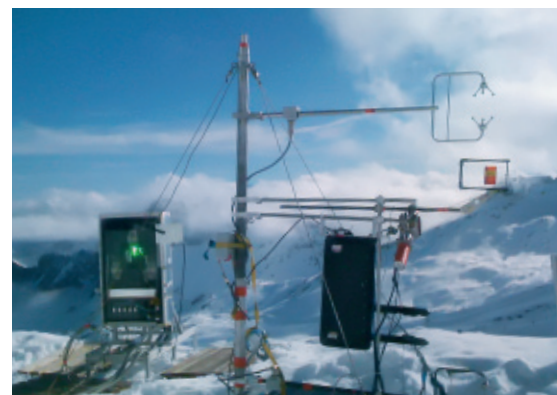
„Um zu prüfen, ob unsere Vermutung für die Trennung von kleinsten Tröpfchen zutrifft, müssen wir unsere Experimente noch bei höheren Reynolds-Zahlen machen“, sagt Haitao Xu. Die Untersuchungen im Labor helfen den Forschern dabei, die Gesetzmäßigkeiten aufzuklären, denen sehr starke Turbulenzen gehorchen.

Dafür brauchen sie Bedingungen, die sich genau kontrollieren lassen, wie eben im Windkanal.

Diese Experimente geben ihnen aber noch keine Sicherheit, dass sich die Tröpfchen in natürlichen Wolken genauso verhalten wie die Teilchen im Windkanal. Deshalb werden sie mit ihrer Technik auch die Tröpfchen in realen Wolken beobachten, und zwar an dem Ort in Deutschland, an dem man den Wolken wahrscheinlich am nächsten ist: auf der Zugspitze, genauer gesagt in der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus.

Dort werden die Göttinger Forscher im kommenden Frühjahr einen Messschlitten für die Kamera installieren, um damit ab dem Sommer in die Wolken zu spähen. „Um von den Tröpfchen 10 000 Bilder pro Sekunde schießen zu können, brauchen wir einen sehr starken Laser“, sagt Haitao Xu. Bereits im vergangenen Jahr haben er und seine Kollegen das System ausprobiert: „Und es hat gut funktioniert.“

Eulerische Messungen sollen das Bild vervollständigen. Diese Instrumente haben sie ebenfalls auf der Zugspitze installiert. Und Kollegen des Leibniz-Instituts für Troposphärenforschung und von der US-amerikanischen Michigan Technical University (USA) setzen die modernsten verfügbaren Messgeräte für Eulerische Untersuchungen auf der Zugspitze ein und haben sie auch in die Messstation *Actos* gepackt. Diese wird von einem Hubschrauber an einem Seil hängend durch die Wolken gezogen. Auf diese Weise wollen die Forscher letztlich einen Beitrag zu verlässlicheren Klimaprognosen leisten. Aber nicht nur: Sie wollen auch eine skeptische Äußerung des britischen Physikers Horace Lamb entkräften. Der sagte in den 1930er-Jahren: „Wenn ich in den Himmel kommen sollte, erhoffe ich Aufklärung über zwei Dinge: Quantenelektrodynamik und Turbulenz. Was den ersten Wunsch betrifft, bin ich ziemlich zuversichtlich.“ ◀



Wolken in Rundum-Überwachung: Partner der Göttinger Forscher messen auf der Zugspitze unter anderem Teilchengröße und -geschwindigkeit sowie Wassergehalt und Temperatur.

GLOSSAR

Reynolds-Zahl

Vereinfacht gesprochen: ein Maß für die Stärke der Turbulenz. Sie gibt an, welche Spanne die Werte charakteristischer Größen abdecken, also etwa die unterschiedlichen Abmessungen der Wirbel. Je höher die Reynolds-Zahl, desto größer der Unterschied zwischen den größten und den kleinsten Wirbeln.

Kinematische Viskosität

gibt die effektive viskose Kraft in einer Flüssigkeit oder einem Gas an. Die viskose Kraft wird von der Reibung der Teilchen untereinander verursacht, die Trägheitskraft von der Masse beziehungsweise der Dichte des Fluids. Die kinematische Viskosität sinkt, wenn die Dichte steigt. Sie bestimmt immer dann das Fließverhalten des Fluids, wenn es beschleunigt wird.

Lagrange-Messungen

verfolgen die Flugbahnen einzelner Teilchen. Sie erlauben daher Aussagen über Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Teilchens.

Eulerische Messungen

bestimmen die Geschwindigkeit turbulenter Strömungen an einem oder mehreren Punkten gleichzeitig. Aus diesen Messungen lässt sich das Geschwindigkeitsprofil der Turbulenz ermitteln.