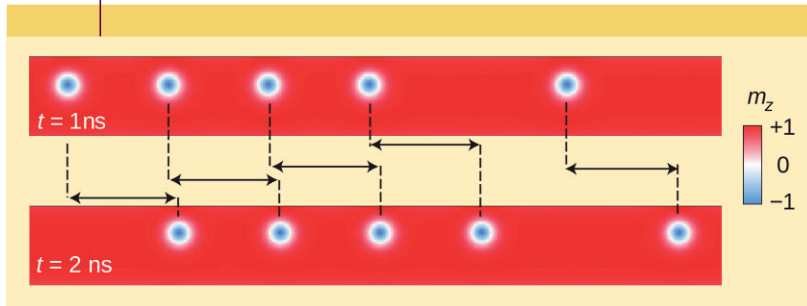


ABB. 2 | SHIFT-REGISTER



Eine Bit-Sequenz, realisiert durch An- oder Abwesenheit von Skyrmionen (blau), wird synchron durch einen 1 ns langen Strompuls um genau eine Bitlänge verschoben. So kann die gewünschte Information zu einem Schreib-Lese-Kopf gebracht werden (nach [1] mit Erlaubnis von Macmillan Publishers Ltd., Nature, copyright 2013).

sich prinzipiell in alle Richtungen innerhalb der Ebene senkrecht zur Magnetisierung im Zentrum bewegen können, sind Abbildungen bisher die einzige Möglichkeit, die Bewegung eindeutig nachzuvollziehen. Technisch möglich sind solche dynamischen Abbildungen am Synchrotron mit hochintensiver, zeitlich gepulster, kohärenter Röntgenstrahlung. Die Röntgenstrahlung ist monochromatisch und zirkular polarisiert, weshalb sich mit ihr magnetische Strukturen abbilden lassen.

Zwei besonders geeignete Abbildungstechniken sind die Röntgen-

Rastertransmissionsmikroskopie und die Röntgenholographie. Mit beiden Techniken haben wir vor kurzem die ersten Videos von Skyrmionendynamik gedreht. Dabei konnte gezeigt werden, dass Skyrmionen aufgrund ihrer Topologie intrinsisch eine Kraft senkrecht zu ihrer Bewegung erfahren, die so genannte Gyrokraft. Sie bewirkt, dass sich Skyrmionen nach Abschalten einer Anregung auf komplexen Bahnen bewegen, aus denen sich wiederum ihre Topologie bestimmen lässt [2].

Bei der Translation von Skyrmionen in einem Prototypen eines Shift-

Registers beobachteten wir eine effiziente Bewegung von mehreren Skyrmionen synchron in einem Draht mit hoher Geschwindigkeit [3]. Wegen der Gyrokraft bewegen sich die Skyrmionen nicht komplett parallel zum Stromfluss, sondern unter einem Winkel. Das führt dazu, dass ein Skyrmion sich nicht nur entlang des Drahtes, sondern auch Richtung Rand des Drahtes bewegt. Dort hilft ihm auch seine topologische Stabilität nur begrenzt, da das Skyrmion aus dem Draht herausgedrückt werden kann, was einem Datenverlust entspricht. Dies zu verstehen und möglichst zu kontrollieren ist eine der Herausforderungen für zukünftige Anwendungen. Erste Ideen, um die Skyrmionen in der Drahtmitte zu halten, sind bereits vorgeschlagen worden und werden im nächsten Schritt experimentell realisiert.

Literatur

- [1] J. Sampaio et al. Nature Nanotech. **2013**, 8, 839.
- [2] F. Büttner et al. Nature Phys. **2015**, 11, 225.
- [3] S. Woo et al. Nature Mat., advance online pub. 29.2.2016, doi:10.1038/nmat4593.

Felix Büttner, Mathias Kläui,
Uni Mainz

BIOPHYSIK

Der Hummelflug in Turbulenz

Fliegende Tiere im Allgemeinen und insbesondere Insekten schlagen mit den Flügeln, um ihren Vor- und Auftrieb zu erzeugen. Landläufiger Meinung zum Trotz können Hummeln erstaunlich gut fliegen. Mit Hilfe der bisher aufwändigsten Computersimulationen haben wir zeigen können, dass die aerodynamischen Mechanismen des Schlagfluges auch dann noch funktionieren, wenn das Insekt in starke Turbulenz gerät.

Das hartnäckige Gerücht, dass die aerodynamischen Gesetze Hummeln das Fliegen verbieten würden, entstand in den 1930er Jahren. So ulkten Ludwig Prandtls Studenten in Göttingen, das Verhältnis von Flügelfläche zu Gewicht sei dafür viel zu klein. Bis heute hält sich dieses auf eine Serviette gekritzelte Resultat,

unter anderem in Verschwörungstheorien zur Diskreditierung wissenschaftlicher Arbeit.

Tatsächlich war schon damals klar, dass die Koeffizienten in den Formeln zur Berechnung von Flugzeugen hier angepasst werden müssten, und man vermutete, dass Hummeln und andere Insekten

geschickt Wirbel in der Luft ausnutzen würden. Das ist auch der Fall, wurde aber erst 1996 von Charles Ellington von der Universität Cambridge bewiesen. In der Tat produziert das Tier bei jedem Halbschlag an seiner Flügelvorderkante einen Luftwirbel, der sich wie ein winziger Tornado mit dem Flügel mitbewegt. Am Bewegungsumkehrpunkt verlässt der Wirbel den Flügel, allerdings wird sofort ein neuer gebildet. Der im Inneren des Wirbels reduzierte Luftdruck sorgt für den zusätzlichen Auftrieb, der in der simplen Formel fehlte, und erklärt somit, warum Hummeln tatsächlich fliegen können.

Wir interessieren uns für die Frage, welchen zusätzlichen Nutzen es hat, mit den Flügeln zu schlagen.

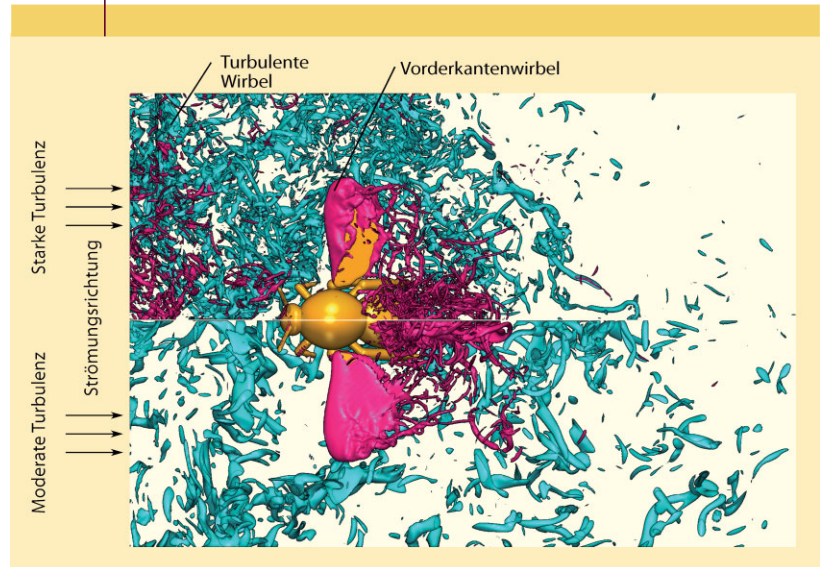
Ein erster Vorteil ist die extreme Manövrierbarkeit, die zusätzlich durch die geringe Körpermasse begünstigt wird und jene von Flugzeugen spielend übertrifft. So können Insekten scharfe Kurven fliegen oder in der Luft schweben, andere können rückwärts starten.

Unsere Leitfrage hier ist, wie Insekten mit Turbulenzen zurechtkommen, da sie, anders als Flugzeuge, in ihrer hindernisreichen Welt mit ständig wechselnden Winden und Verwirbelungen konfrontiert werden. So stellt sich die Frage, ob die auftriebserzeugenden Vorderkantenwirbel durch turbulente Anströmungen zerstört werden könnten – mit dramatischen Folgen für das Tier oder einen Roboter, der den Schlagflug nachahmt.

Um eine schlüssige Antwort zu finden, benutzen wir hochauflösende Computersimulationen, die die Navier-Stokes-Gleichungen, welche die Bewegung der Luft beschreiben, numerisch lösen. Das erfolgt auf einem engmaschigen Gitter mit 680 Millionen Punkten. Diese Berechnungen sind sehr präzise und können die Strömungsdynamik exakt wiedergeben, erfordern aber den Einsatz moderner Supercomputer mit mehreren zehntausend Prozessorkernen [1]. Dafür ermöglichen sie einen detaillierten Einblick in die Aerodynamik, der experimentell nicht ohne Weiteres verfügbar ist, wie auch das Video der Visualisierung zeigt [4] (Abbildung 1).

Unser numerisches Modellinsekt macht genau, was wir ihm sagen und ermöglicht so, die exakt gleiche Flügelbewegung in verschiedenen turbulenten Strömungen zu wiederholen. Wie in einem Windkanal bleibt das Insekt fixiert; seine Vorwärtsgeschwindigkeit von 2,5 m/s wird von der Anströmung kompensiert. Die anfänglich unverwirbelte (laminare) Luftströmung wird dann durch eine stark verwirbelte, turbulente Anströmung ersetzt, die wenig später auf die Flügel trifft. Je stärker die Turbulenz, desto feinskaliger und intensiver sind die Wirbel. Weil die turbulente Bewegung inhärent chaotisch ist,

ABB. 1 VIRTUELLE HUMMEL IN TURBULENZ



Die virtuelle Hummel (gelb) in einem Windkanal mit turbulenter Einströmung. Das Bild ist zweigeteilt in starke (oben) und moderate Turbulenzintensität (unten), gezeigt sind Flächen gleicher Wirbelstärke. Die Anströmung von links transportiert die turbulenten Wirbel bis zur Hummel, wo sie auf die Flügel treffen. Selbst bei starker Turbulenzintensität mit Fluktuationen an die 100 % bildet sich ein gut sichtbarer Vorderkantenwirbel, der somit robust ist und Auftrieb generiert. Unter Turbulenzintensität versteht man den Mittelwert der Geschwindigkeitsfluktuationen bezogen auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit (hier 2,5 m/s).

muss das numerische Experiment hinreichend häufig wiederholt werden, mit einer anderen, zufälligen Realisierung einer turbulenten Strömung. Im Anschluss können statistische Aussagen, also Ensemble-Mittelungen, getroffen werden.

Es zeigt sich, dass selbst in stärkster Turbulenz, bei denen die Geschwindigkeits- und damit verbundenen Druckfluktuationen fast genauso groß sind wie bei der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (99 %), immer noch genug Auftrieb produziert wird; mehr noch: Es wird im statistischen Mittel genau so viel Auftrieb erzeugt, als wenn gar keine Turbulenz vorhanden ist [2]. Auch die benötigte Muskelleistung bleibt praktisch unverändert.

Dass Insekten in starker Turbulenz abstürzen hat vielmehr damit zu tun, dass sie ihre Fluglage nicht mehr kontrollieren können, wenn die Turbulenz sie zu sehr durchschüttelt, aber nicht damit, dass sich im Mittel Auftriebskräfte oder Drehmomente verändern.

Dieses Ergebnis unterscheidet sich signifikant von Flugzeugflügeln, wo schon kleine Geschwindigkeitsstörungen von weniger als ein Prozent [3] Veränderungen im Strömungsfeld auslösen können, wodurch sich die gemittelten aerodynamischen Kräfte in laminarer und turbulenter Umgebung signifikant unterscheiden können. Diese Robustheit bezüglich Turbulenzen kann somit als ein weiterer Vorteil des Schlagfluges gesehen werden und gibt der Entwicklung insekteninspirierter bionischer Flugroboter weiteren Auftrieb.

Literatur

- [1] T. Engels et al., SIAM J. Sci. Comput (einger. 2016); arXiv:1506.06513.
- [2] T. Engels et al., Phys. Rev. Lett. **2016**, 116, 028103; arXiv:1512.07614.
- [3] T. J. Mueller et al., Exp. Fluids **1983**, 1, 3.
- [4] t1p.de/youtube-hummel.

Thomas Engels, Jörn Sesterbenn,
TU Berlin; Dmitry Kolomenskiy,
Chiba University; Kai Schneider,
Aix-Marseille Universität;
Fritz-Olaf Lebmann, Uni Rostock