

## Turbulente Quantenflüssigkeiten

Das Edelgas Helium besitzt bekanntlich zwei Isotope, das spinlose  $^4\text{He}$  und das  $^3\text{He}$  mit Spin  $1/2$ . Bereits vor 65 Jahren hat P. L. Kapitza (Nobelpreis 1978) aufgrund von Messungen der Viskosität vermutet, dass das flüssige  $^4\text{He}$  unterhalb einer Temperatur von 2,2 K eine Supraflüssigkeit ist. Erst rund 40 Jahre später haben die Experimentatoren D. M. Lee, R. C. Richardson und D. D. Osheroff (Nobelpreis 1996) sowie der Theoretiker und diesjährige Nobelpreisträger A. J. Leggett erkannt, dass die Fermiflüssigkeit  $^3\text{He}$  bei tiefen Temperaturen unterhalb von 2,7 mK sogar zwei supraflüssige Phasen mit einzigartigen Eigenschaften besitzt, die mit A- und B-Phase bezeichnet werden.

Wie in normalen Flüssigkeiten unterscheidet man auch in Quantenflüssigkeiten zwischen laminaren und turbulenten Strömungen, wobei es allerdings charakteristische Unterschiede gibt. In einem in Helsinki durchgeführten Experiment [1] wurde nun ein neues Kriterium für die Existenz von Turbulenz in Quantenflüssigkeiten entdeckt. So dient das supraflüssige  $^3\text{He}$ , ursprünglich selbst Gegenstand der reinen Grundlagenforschung, nunmehr als raffiniertes Werkzeug, um Turbulenz zu erforschen.

Analog zur Supraleitung in Festkörpern ist supraflüssiges  $^3\text{He}$  ein Kondensat von Cooper-Paaren. Im Grundzustand ist die makroskopische Wellenfunktion aus identischen Cooper-Paaren mit Spin  $S=1$  und intrinsischem Drehimpuls  $L=1$  aufgebaut [2]. Die korrelierte Orientierung dieser Triplet-Cooper-Paare (Orientierungskohärenz) führt zu einer kollektiv verstärkten Dipol-Dipol-Wechselwirkung zwischen den  $^3\text{He}$ -Kernen. In Gegenwart eines äußeren Magnetfelds ergibt sich daraus, wie Leggett erkannte, ein wichtiger Zusatzterm, der Spin- und Bahn-Dynamik koppelt.

Diesem Term ist es zu verdanken, dass sich die Dynamik von Wirbeln in der Supraflüssigkeit  $^3\text{He}$  mittels der kernmagnetischen Resonanzmethode (NMR) untersuchen lässt: Das um einzelne Wirbelfäden zirkulierende Strömungsfeld orientiert die Cooper-Paare im Ortsraum, was über den Spin-Bahn-Term wiederum Einfluss auf die Spin-Dynamik hat.

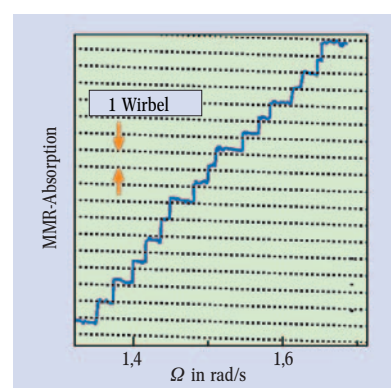
So lässt sich eine charakteristische Eigenschaft der Supraflüssigkeit  $^3\text{He}$ -B, dass Wirbel nur als quantisierte Vielfache der elementaren Zirkulation  $\kappa_3 = h/2m_3$  ( $m_3$ : Masse des  $^3\text{He}$ -Atoms) auftreten können, in der NMR-Absorptionslinie eindeutig als Abfolge quantisierter Stufen nachweisen (Abb. 1). Die NMR-Methode war und ist bis heute eines der wesentlichen Werkzeuge des Experimentators bei der Erforschung der Eigenschaften des supraflüssigen  $^3\text{He}$ ; auf ihr beruhen auch die neuen Ergebnisse aus Helsinki [1].

Normalerweise lässt sich in klassischen Flüssigkeiten wie Wasser oder Öl ein Strömungsfeld mit charakteristischer Strömungsgeschwindigkeit  $U=|v|$  durch die Reynolds-Zahl  $UR/\nu$  charakterisieren. Diese ist ein dimensionsloses Maß für die relative Stärke von viskosen Reibungskräften und Inertialkräften. Hierbei ist  $R$  die räumliche Ausdehnung des Systems und  $\nu$  die kinematische Viskosität, eine Materialkonstante.

Strömungsfelder mit kleiner Reynolds-Zahl sind durch die Viskosität dominiert und verhalten sich laminar. Bei großer Reynolds-Zahl dominieren Inertialkräfte, sodass eine primär laminare Strömung instabil wird. Wenn in so einem System Wirbel erzeugt werden, z. B. durch ein ruhend angebrachtes Gitter im Strömungsfeld, so findet hinter dem Gitter spontan ein Übergang zu einem chaotischen turbulenten Strömungsfeld statt. Dieser Übergang ist in einer Quantenflüssigkeit durch neue, fundamentale Gesichtspunkte charakterisiert.

Die finnischen Physiker untersuchten nun die Dynamik von Wirbeln in  $^3\text{He}$ -B. Hierbei standen sie vor der Herausforderung, dass es sehr großer Drehgeschwindigkeiten bedarf – die jedoch im Kryo-Labor nicht zur Verfügung stehen –, um die Wirbel direkt zu erzeugen. In  $^3\text{He}$ -A genügt jedoch bereits eine kleine Winkelgeschwindigkeit von  $\Omega \approx 1$  rad/s, um quantisierte Wirbel zu erzeugen. Die Physiker nutzten nun mit einem genialen Trick aus, dass bei großen Magnetfeldern nur die A-Phase und bei kleinen Magnetfeldern nur die B-Phase existiert, indem sie bei einem großen äußeren Magnetfeld in der A-Phase Wirbelfäden erzeugten, die durch Verringern des Magnetfeldes kontrolliert in das von Wirbeln freie  $^3\text{He}$ -B injiziert werden.

Die Experimente zeigen nun sehr schön, wie solche in die Supraflüssigkeit  $^3\text{He}$ -B injizierte, kurze Wirbelfäden in einem mit Winkelgeschwindigkeit  $\Omega \approx 1,3$  rad/s um seine Achse rotierenden zylindrischen Behälter an Länge zunehmen und sich im Lauf der Zeit parallel zur Rotationsachse des Zylinders hin orientieren, um so ins Gleichgewicht zu gelangen [1]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die supraflüssige Komponente des  $^3\text{He}$ -B die Rotation des Behälters prinzipiell nicht mitmacht. Lediglich die bei endlichen Temperaturen koexistierende viskose Normalflüssigkeit kann mit den Wänden des rotierenden Behälters ins Gleichge-



**Abb. 1:** In einer Quantenflüssigkeit können Wirbel nur als Vielfache einer elementaren Einheit auftreten.

wicht kommen und sich mitbewegen. Schon Onsager und Feynman erkannten aber, dass im Ruhesystem des rotierenden Behälters ( $v_N=0$ ) eine Supraflüssigkeit durch Wirbel mit quantisierter Zirkulation in Gestalt eines Wirbelgitters durchsetzt sein darf. Weil dann die lokale Wirbelstärke im räumlichen Mittel einen endlichen Wert besitzt, kann die Supraflüssigkeit auf einer räumlich ausgedehnten Skala dennoch als rotierend erscheinen kann.

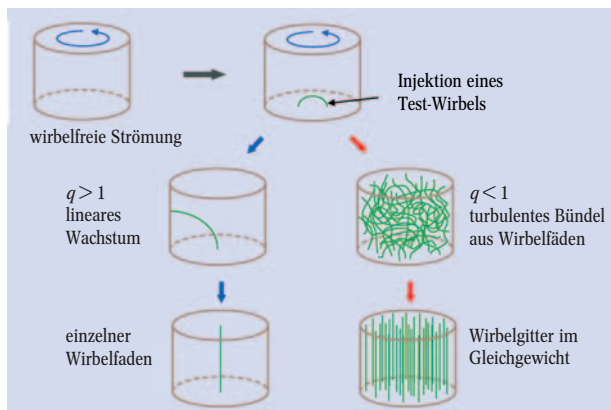
Bei großen Reynolds-Zahlen ( $\nu \rightarrow 0$ ) bleibt noch eine Restwechselwirkung der sich bewegenden Wirbelfäden mit der Normalflüssigkeit übrig (sog. mutual friction coefficient), deren Einfluss durch zwei von der Temperatur  $T$  abhängige Materialparameter  $\alpha$  und  $\alpha'$  beschrieben wird. Das Verhältnis des viskosen Anteils (dieser ist proportional zu  $\alpha(T) U\Omega/R$ ) zum Inertialterm (proportional zu  $[1-\alpha'(T)] U\Omega/R$ ) ist dann *unabhängig* von der Geschwindigkeit  $|v_S| \sim U = \Omega R$  und *unabhängig* von der Systemgröße  $R$ :

$$q = \frac{\alpha(T)}{1 - \alpha'(T)}$$

Mikroskopisch gesehen ist die Bedingung  $q=1$  zugleich eine Sta-

Prof. Dr. Nils Schopohl, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Institut für Theoretische Physik, Auf der Morgenstelle 14, 72076 Tübingen

bilitätsgrenze für das Wachstum elastischer Moden, die längs der Achse eines isolierten Wirbelfadens propagieren können („Kelvin-Wellen“). Die Messungen in Helsinki haben jetzt gezeigt, dass für  $q < 1$  Turbulenz existiert. Und zwar in



**Abb. 2:** Ein Testwirbel, der in die Supraflüssigkeit  $^3\text{He-B}$  injiziert wird, wächst linear oder turbulent, je nach dem Wert eines Parameters  $q$ .

dem Sinn, dass die Amplitude der Kelvin-Wellen auf dem ursprünglich injizierten Testwirbelfaden anwächst, bis sich entsprechend groß ausgelenkte Segmente mit anderen Teilen des Wirbelfadens zu „überschneiden“ beginnen. Dies führt zur Entstehung neuer Wirbelfäden und

– in der transienten Wachstumsphase – zur Ausprägung eines entsprechend „verknoteten“ Bündels von vielen Wirbelfäden (Abb. 2). Die Energie zum Anwachsen der Länge einzelner Wirbelfäden stammt dabei aus der Normalflüssigkeit und letztendlich aus dem Motor, der die Messzelle in Rotation versetzt. Im Verlauf der Zeit, so die Vorstellung, erreicht dann ein Bündel aus vielen Wirbelfäden über sog. „reconnection“-Prozesse allmählich den Gleichgewichtszustand in Gestalt eines Wirbelgitters. Dies ist aus  $N = N_{\text{eq}}$  parallel zur Rotationsachse orientierten Wirbeln aufgebaut, wobei die Fläche der Elementarzelle des Wirbelgitters genau ein Zirkulationsquant  $\kappa_3$  enthält. Für den Fall  $q > 1$  sind die Kelvin-Wellen allerdings gedämpft, was sich auf das Wirbelwachstum auswirkt, indem nunmehr die injizierten Testwirbel geradlinig in die Supraflüssigkeit hineinwachsen und sich parallel zur Rotationsachse ausrichten, ohne sich mit anderen Wirbelfäden zu überschneiden (Abb. 2). Bemerkenswert ist die Schärfe des in  $^3\text{He-B}$  experimentell gefundenen

Übergangs von  $q < 1$  zu  $q > 1$  als Funktion der Temperatur.

Diese Ergebnisse zum neuen Kriterium  $q < 1$  für Turbulenz in Supraflüssigkeiten mit großer Reynolds-Zahl liefern universelle Einsichten in die Entstehung und die Dynamik von Wirbeln in Quantenflüssigkeiten. Womöglich sind die neuen Erkenntnisse auch für die Physik rotierender Neutronensterne von Bedeutung: Bei Pulsaren werden spontane kleine Sprünge der Rotationsfrequenz beobachtet, die plötzlichen Änderungen des Wirbelgitters im supraflüssigen Inneren des Neutronensterns zugeschrieben werden.

\*

Mein besonderer Dank gilt G. E. Volovik und V. B. Eltsov für hilfreiche Diskussionen und für die Überlassung der Abbildungen.

NILS SCHOPHOHL

- [1] A. P. Finne et al., Nature **425**, 1022 (2003)
- [2] D. Vollhardt und P. Wölfle, The Superfluid Phases of Helium 3, Taylor & Francis, London (1990).