Wirbel und Schrauben in Scherströmungen

Reinhard Koehler

Wenn wir Wasser in einem Topf rühren und dann sich selbst überlassen, so entsteht eine Strömung, die wir, auf die ganze Wassermasse gesehen, einen «Wirbel» nennen. Darin fasst die Alltagssprache viele Einzelheiten in ein Bild zusammen: z. B. das langsame Kreisen entlang des Topfrandes und das schnellere in der Mitte, das Herumwandern des Wirbeltrichters und sein Auf- und Abwogen. Man beobachtet auch ein spiraliges Nach-Innen-Laufen von Teilchen, die zum Topfboden absinken; kleinere, noch schwebende Teilchen zeigen ein langsames Absteigen des Wassers am Topfrand und ein Aufsteigen in der Mitte an. Aus diesen Einzelheiten ergibt sich insgesamt eine Bewegung, die eine ringförmig in sich zurücklaufende Spirale oder Schraubenlinie beschreibt. Der einfache, durch Rühren erzeugte «Wirbel» zeigt also der genauen Beobachtung schon eine recht komplizierte Bewegung. Es fehlt aber der Massstab, der eine Beurteilung der Strömung mit allen Einzelheiten erst ermöglichen würde. Einen geeigneten Massstab hoffen wir in diesem Aufsatz an einer Reihe von Experimenten zu gewinnen, an denen wir die Bedingungen für die Entwicklung der Strömungsformen kennenlernen können.

Wir werden dann zwei Bewegungselemente, Wirbel und Schraube, zu unterscheiden haben, weil sie sich in polarer Weise entwickeln. Je nach den experimentellen Bedingungen wird die Strömung entweder mehr durch die Bildung von Wirbeln oder überwiegend durch Schrauben bestimmt. Die Bildung dieser Bewegungselemente können wir, ebenso wie durch Rühren beim «Topfwirbel», in mannigfaltiger Weise dadurch einleiten, dass wir Geschwindigkeitsunterschiede quer zur Hauptströmung erzeugen. Weil die Flüssigkeit dabei eine Scherung erfährt, sprechen wir von Scherströmungen.

Wirbel in Strahlströmungen

Zuerst wollen wir das Einströmen eines Flüssigkeitsstrahls in eine ruhende Flüssigkeitsumgebung betrachten, weil hier die Entstehung der Wirbel besonders gut zu übersehen ist. Den Strahl kann man aus einer Düse mit rundem Querschnitt ausströmen lassen; färbt man die Innenwand der Düse an einzelnen Stellen, so wird die Farbe fadenförmig ausgezogen und dadurch die Grenzfläche zwischen Strömung und ruhender Umgebung markiert. *Bild 1* zeigt die Momentaufnahme einer solchen Strömung, bei der durch Verwendung zweier Farbfäden der Strahl wie in einem Schnitt durch seine Längsachse erscheint. Man sieht, wie sich der zuerst glatte Farbfaden kurz nach der Düse wellt und wie er weiter stromab aufgewickelt wird. Diese Drehung der Flüssigkeit um eine Achse, die quer zur Strömung ausgerichtet ist, nennt man einen Wirbel. Dieser wächst, indem er Strahl- und Umgebungsflüssigkeit in seine Drehung einbezieht und schichtförmig ineinander aufrollt *(Bild 1)*.

Eine nähere Untersuchung der Strömungsverhältnisse zeigt, wie sich zwischen dem runden Strahlkern, wo die Flüssigkeit ihre Geschwindigkeit von der Düse an beibehält, und der umgebenden, fast ruhenden Flüssigkeit eine Grenz- oder Scherschicht ausbildet. In dieser wird der Geschwindigkeitsunterschied allmählich ausgeglichen. Kurz nach der Düse ist die Grenzschicht noch dünn, die Scherung deshalb stark; stromab nimmt eine breitere Flüssig-

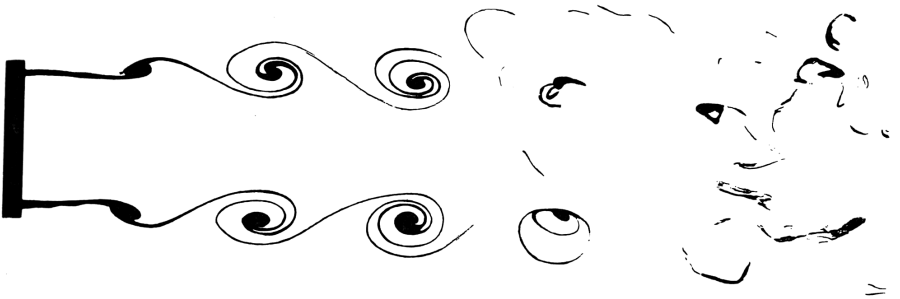

Bild 1: Farbfadenaufnahme der vollständigen Strahlentwicklung in Wasser (Düsendurchmesser 2 cm, Ausströmgeschwindigkeit 8,8 cm/sek).

Bild 2: Farbfäden an den Grenzen des laminaren Strahls (Ausströmgeschwindigkeit 1 cm/sek). – *Bild 1, 2* gezeichnet nach *E. Berger* (1961).

keitsschicht an dem Geschwindigkeitsausgleich teil, und die Scherung ist entsprechend schwächer. Die Scherschicht umschliesst den runden Strahl mantelförmig und verbreitert sich sowohl in die umgebende Flüssigkeit hinein als auch auf Kosten des Strahlkerns *(Bild 7* oben). Durch die schnelle Kernströmung innen bekommt die Scherschicht dauernd neuen Antrieb; aussen reisst sie die vorher ruhende Flüssigkeit mit und setzt dadurch in der ferneren Umgebung eine langsame Zirkulation in Gang.

Die einfache Bewegung in parallel laufenden, aber nicht unbedingt «geradlinigen» Schichten bezeichnet man als laminare Strömung; diese zeigt *Bild 1* jedoch nur unmittelbar an der Düse. Danach schwingt die Grenzschicht auf beiden Seiten des Strahlkerns seitlich aus und rollt sich dann, vom Strahlkern nach aussen greifend, auf. Dies geschieht in rhythmischer Folge, und so entsteht eine Reihe von Wirbeln, welche den Strahlkern ringförmig umschliessen und mit ihm fortwandern. Diesen Entwicklungszustand bezeichnen wir als Wirbelstadium. – Die geordnete Wirbelreihe erweist sich jedoch als labiler Zustand: Es kommt häufig vor, dass ein Wirbel gegen den anderen beschleunigt wird, durch den vorauseilenden Wirbel hindurchschlüpft und sich mit ihm zu einem stärkeren vereinigt. Die so entstehenden Wirbel zerfallen schnell in kleinere, schnelldrehende Wirbel, deren Bewegung im einzelnen nicht mehr verfolgt werden kann. So werden innerhalb der jetzt turbulenten Scherschicht immer neue Wirbel gebildet, während die in die äussere Flüssigkeitsumgebung abwandernden Wirbel gedämpft werden. Dieses chaotische Stadium der Strömung nennt man turbulent. An einem im ganzen Querschnitt gefärbten Strahl mit einer etwa 12mal grösseren Strahlgeschwindigkeit als in *Bild 1* kann man sehen, wie sich die turbulente Strömung kegelförmig ausbreitet. Die gefärbte Strahlflüssigkeit wird mit der Umgebungsflüssigkeit vermischt und der ganze Strahlkern wird von der Mischung erfasst. Der Bewegungsimpuls, den der Strahl mitgebracht hat, verteilt sich auf die gesamte, von der turbulenten Vermischung erfasste Zone, so dass sich die Geschwindigkeit entsprechend vermindert. Ist der Flüssigkeitsraum, in den sich der turbulente Strahl ausbreitet, genügend gross, dann wird schliesslich die Strömung so langsam, dass neue Wirbel nicht mehr gebildet werden können; die Zähigkeit der Flüssigkeit hemmt in diesem Stadium die Bewegung. Die turbulente Strömung beruhigt sich allmählich, und zwar in der Weise, dass zuerst die kleinsten Wirbel verschwinden und zuletzt nur noch grössere Wirbel in unregelmässiger Verteilung zu beobachten sind. Eine geordnete Bewegung tritt in dieser zur Ruhe kommenden Strömung nicht mehr auf.

Betrachten wir den Gesamtverlauf der beschriebenen Strömung, so können wir hier zunächst zwei Phasen voneinander abgrenzen: In einer ersten Phase entwickelt sich aus der einfachen, laminaren Strömung zuletzt die turbulente; das Ende dieser Entwicklung wird erreicht, wenn keine neuen Wirbel mehr in der Mischungszone gebildet werden. Deshalb bezeichnen wir als zweite Phase das Ablaufen der wirbelnden Strömung bis zur Ruhe. – Innerhalb der ersten Phase kann man die laminare Strömung als eine geformte bezeichnen. Dieser Formung des Strahls in seinem Anfangszustand wirkt eine mit der Strömung verbundene Kraft entgegen; sie ist bestrebt, die gegebene Anfangsform aufzulösen. Dies beginnt damit, dass die geradlinig verlaufende Grenze des Strahls seitlich ausschwingt. Dann verstärkt sich die der Strömung innewohnende Kraft, bis die Gestalt der rhythmisch einsetzenden Wirbel einen Ausgleich der beiden Kräfte erkennen lässt, die wir jetzt als Formtendenz und Bewegungstendenz bezeichnen wollen. Aber auch die Gestalt der Wirbelfolge wird aufgelöst, die Bewegungstendenz verstärkt ihren Einfluss mit fortschreitender Strömung und überwiegt schliesslich ganz in dem turbulenten Stadium. Die Bahn im Bereich der Scherschicht, auf der die Wirbel in regelmässiger Folge angeordnet waren, wird verlassen; die Wirbel vervielfachen sich – man sagt, sie zerfallen – und die entstandenen kleinen Wirbel durchsetzen chaotisch Strahlströmung und umgebende Flüssigkeit. Scheinbar weist die kegel-