

“Japansk” viftestrømning og hvirveldannelse i en sæbefilm

Af Anders Andersen, Tomas Bohr, Teis Schnipper og Laust Tophøj, Institut for Fysik og Center for Fluid Dynamik, Danmarks Tekniske Universitet

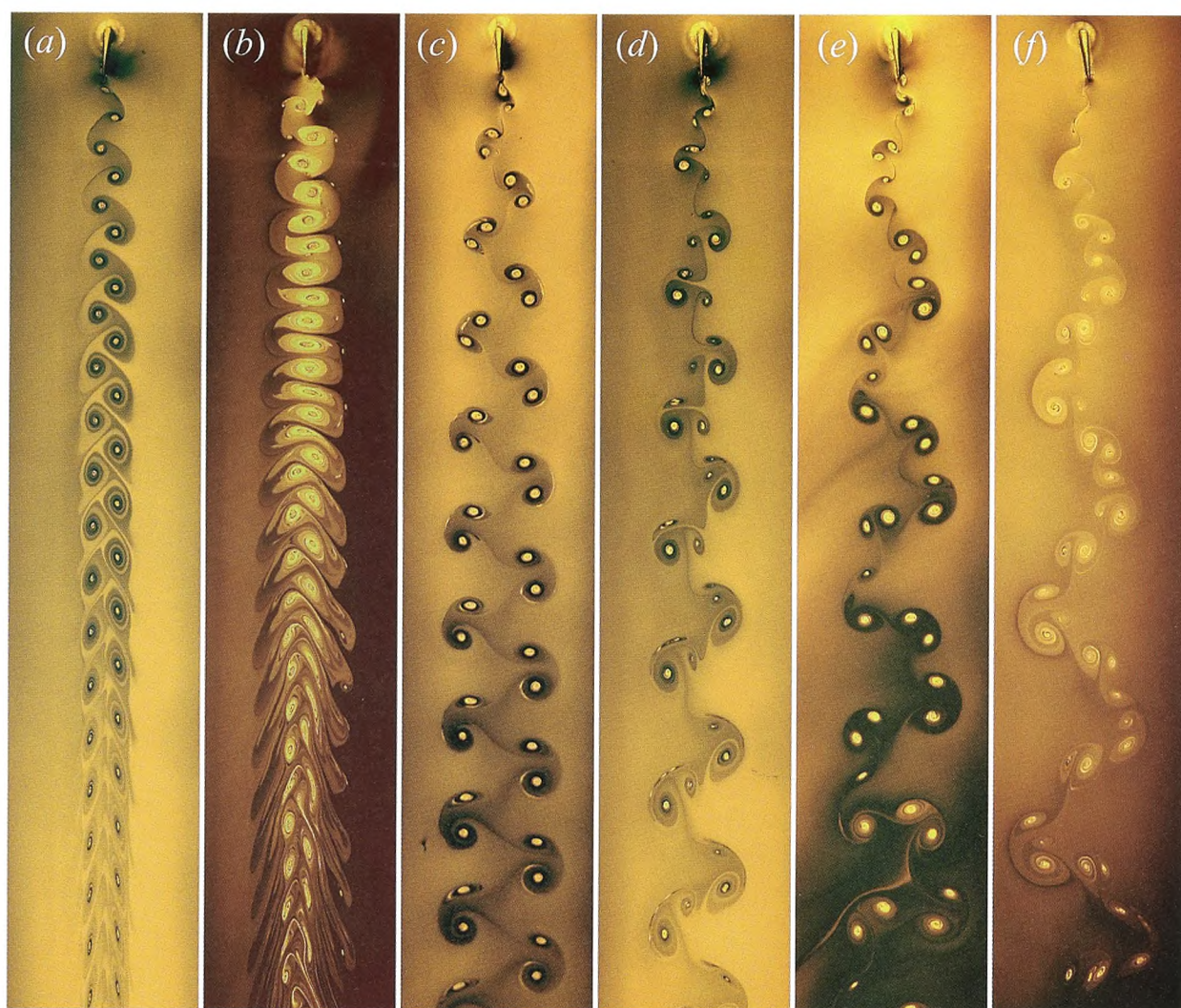
Vi ved alle, at en papirvifte, der viftes fra side til side, fremkalder en luftstrøm. Men hvordan dannes egentligt denne strømning? Hvordan ser den ud? Går strømningen altid “udad” eller kan der opstå et sug? Det var spørgsmål som disse, der motiverede et eksperiment i vores laboratorium, hvor en af os (TS) lavede sit ph.d.-projekt om hvirveldannelse [1].

Sæbefilmens to-dimensionale verden

For at gøre det så simpelt som muligt, valgte vi at studere viftefænomenet i to dimensioner. Hvordan kan man det? Det kan man ved at lade strømningerne foregå i en sæbefilm, en metode som specielt Yves Couder [2] og Mory Gharib [3] har demonstreret værdien af. Umiddelbart er en sæbefilm et ret indviklet system, hvor et mikrometertyndt vandlag er fanget mellem to lag af amphifile molekyler – lange molekyler, hvis hoveder er

hydrofile, men hvis haler er hydrofobe.

Strømningen i vandlaget er naturligvis meget tæt på at være to-dimensional, men til gengæld følges den af udsving i tykkelsen af sæbefilmen. Faktisk er det disse tykkelsesvariationer, som man typisk bruger til at visualisere strømningen. For ligesom tykkelsesvariationerne i en tynd oliefilm på en vandpyt leder sæbefilmens tykkelsesvariationer med det rette lys til farverige interferensmønstre, der nemt kan fotograferes.



Figur 1. Hvirvelmønstre bag finnen i den strømmende sæbefilm [5].

En sæbefilm har udover de hydrodynamiske frihedsgrader også mulighed for elastisk opførsel. Forstyrrelser i filmen vil fremkalde hurtige elastiske bølger, som opstår, fordi tætheden af de amphifile molekyler på overfladerne ændres og sætter overfladen i longitudinale svingninger. Disse såkaldte Marangoni-bølger er dog meget hurtige (cirka $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), og ved hastigheder langt under denne størrelse opfører sæbefilmen sig i forbavsende høj grad som en usammentrykkelig og to-dimensional væske, og samtidig bliver tykkelsesvariationerne passivt ført med strømmen og viser derved hvirvler og andre strukturer.

Komplekse hvirvelkølvand og hvordan de dannes

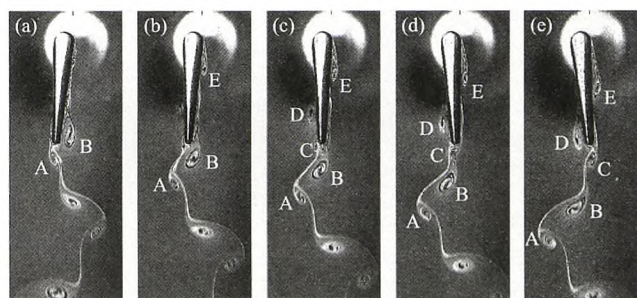
Vi anvendte sæbefilmsmetoden til at se på hvirvelafløsningen fra en simpel efterligning af en svømmende fisk. Mere præcist anbragte vi en lille mekanisk finne i en plan sæbefilm, der – udspændt mellem to fiskeliner – strømmede lodret nedefter som vist på figur 1 [5]. Her får man kølvand, som minder om den berømte von Kármán hvirvelallé, men ved at variere amplitude og frekvens for finnens viftebevægelse kan man derudover opnå en palet af andre mønstre som vist på figur 1. Finnen, der ses øverst i hvert billede, er 6 mm lang, 1 mm bred og roteres fra side til side omkring centeret af den cirkulære forkant.

Til højre for den lodrette centerlinje roterer hvirvlerne i den sædvanlige von Kármán hvirvelallé med uret, og til venstre roterer de mod uret. Mønsteret på figur 1 (b) afviger fra von Kármán hvirvelalléen (a) ved at hvirvlerne, som roterer med uret hhv. mod uret, har byttet plads henover centerlinjen. Dette er typisk når

“fisken” leverer baglæns impuls til strømmingen og selv svømmer fremad [6].

Hvirvlerne dannes ved vekselvirkning mellem finnen og sæbevandet. Når en væske strømmer forbi et fast legeme bliver den bremset ned og kan let “snuble” – dvs. danne hvirvler. Dette er faktisk en universel mekanisme for dannelse af komplekse strømninger i naturen og således også turbulens. Her fører det til forbavsende velordnede hvirvelmønstre med komplicerede periodiske kombinationer af enkelte hvirvler og hvirvelpar.

På figur 2 ses i detaljer, hvordan hvirvelafløsningen foregår. I det konkrete tilfælde leder dannelsesprocessen til et hvirvelmønster af samme type som i figur 1 (c). Man ser, at kølvandet dannes af hvirvler, som kommer dels fra forkanten af finnen, hvor væsken rammer den, dels fra den transversale bevægelse af finnens skarpe bagkant. Man kan endda se det tynde grænselag langs finnen, som gennem hvirvelafløsningen forgrener sig ud i væsken.



Figur 2. Hvirveldannelse ved finnens bevægelse fra venstre mod højre [5].



Figur 3. Viftestrøm frembragt af finnen i den vandrette sæbefilm [7]. Se også billedet på forsiden.

Viftebilledet der slog benene væk under os

Ud fra vores eksperimenter med finnen i den strømmende sæbefilm var det naturligt, at vi spurgte os selv, hvad der mon ville ske, hvis vi ikke lod sæbefilmen strømme, men blot lod finnen vifte i en ellers stillestående sæbefilm – altså den strømning en japansk geisha danner med sin vifte. Så vi placerede vores finne i en stationær sæbefilm udspændt på en stor metaltrådsramme og satte finnen til at vibrere med en frekvens på 100 Hz.

Resultatet ses i figur 3, og skønheden og detaljerigdommen i billedet kom helt bag på os [7]. Lige omkring og over finnen ses, hvordan væsken suges ned og tilsvarende skubbes nedad under finnen – så viften virker, som den skal. I løbet af hver oscillationsperiode dannes der to hvirvler, som af viftestrømmen skubbes ned, strækkes ud og vikles rundt i to spiralstrukturer, en på hver side af finnen. Billedet er taget efter lidt over et halvt sekund og viser resultatet af 70 vibrationer af finnen. Som man kan se, er alle 70 bølgeslag synlige gennem de tynde tråde, der er trukket ud af grænselagene omkring finnen. Det er forbavsende, at hele denne detaljerigdom er bevaret og ikke er flydt sammen. Men der er også kun gået omkring et halvt sekund.

Den væske, vi bruger til forsøget, er ret kompleks – det er en blanding baseret på “bubbles” fra legetøjsbutikken BR, som laver særligt stabile sæbefilm. Til gengæld er væsken også viskoelastisk [8] og tilfører altså ekstra elastiske egenskaber. Vi ved ikke, hvor stor en rolle det spiller, da enhver sæbefilm i forvejen har viskoelastiske egenskaber. Vi har siden gennemført lignende eksperimenter med mere newtonske blandinger og fundet kvalitativt tilsvarende foldningsmønstre under samme forhold.

Ved højere frekvenser eller større amplituder ser vi en helt anden type strømning, hvor hvirvlerne afstødes med så stor fart, at der dannes en koncentreret strømning omkring en regelmæssig serie af hvirvelpar, som sendes ud i en bestemt retning. Vores foreløbige eksperimenter indikerer, at der er en veldefineret overgang mellem de to strømningsmønstre [9]. Ved lave amplituder kan man ind imellem observere tilfælde, hvor viften faktisk suger. Men det er usædvanligt og ikke reproducerbart. Så vi mener nok, at geishaerne generelt kan stole på det kølige pust fra deres smukke vifter.

Litteratur

- [1] <http://www.dtu.dk/centre/FLUID/English.aspx>
- [2] Y. Couder og C. Basdevant (1986), Experimental and numerical study of vortex couples in two-dimensional flows, *Journal of Fluid Mechanics* **173**, 225-251.
- [3] M. Gharib og P. Derango (1989), A liquid film (soap film) tunnel to study two-dimensional laminar and turbulent shear flows, *Physica D* **37**, 406-416.
- [4] J.-M. Chomaz og B. Cathalau (1990), Soap films as two-dimensional classical fluids, *Physical Review A* **41**, 2243-2245.
- [5] T. Schnipper, A. Andersen og T. Bohr (2009), Vortex wakes of a flapping foil, *Journal of Fluid Mechanics* **633**, 411-423.

- [6] S. Vogel (2003), *Comparative Biomechanics*, Princeton University Press.
- [7] T. Schnipper, L. Tophøj, A. Andersen og T. Bohr (2010), Japanese fan flow, *Physics of Fluids* **22**, 091102.
- [8] Vi takker Ole Hassager og Rasmus Hansen fra Institut for Kemiteknik på DTU for reologiske målinger.
- [9] Mattias Lau Nøhr Palsgaard og Michael Sejer Wismer (2010), Strømningen omkring en vifte, Fagprojekt, Institut for Fysik, DTU.



Anders Andersen er lektor ved DTU Fysik. Han arbejder med hydrodynamik, herunder hvirveldannelse, strukturer og instabiliteter i strømninger med frie overflader og plankton hydrodynamik.



Tomas Bohr er professor i teoretisk fysik ved DTU Fysik og leder af Center for Fluid Dynamik ved DTU. Han arbejder med hydrodynamik og komplekse systemers fysik, herunder hvirveldannelse og saftstrømning i træer.



Teis Schnipper er postdoc ved DTU Mekanik. Han undersøger strømninger i skibsmotorer med optiske målemetoder, og i sit ph.d.-studium ved DTU Fysik arbejdede han med hvirveldannelse omkring og hydrodynamiske kræfter på baskende finner.



Laust Tophøj er ph.d.-studerende ved DTU Fysik. Han arbejder med teori for strømninger med frie overflader, hvirvler, topologi og kaos i hydrodynamiske systemer.