

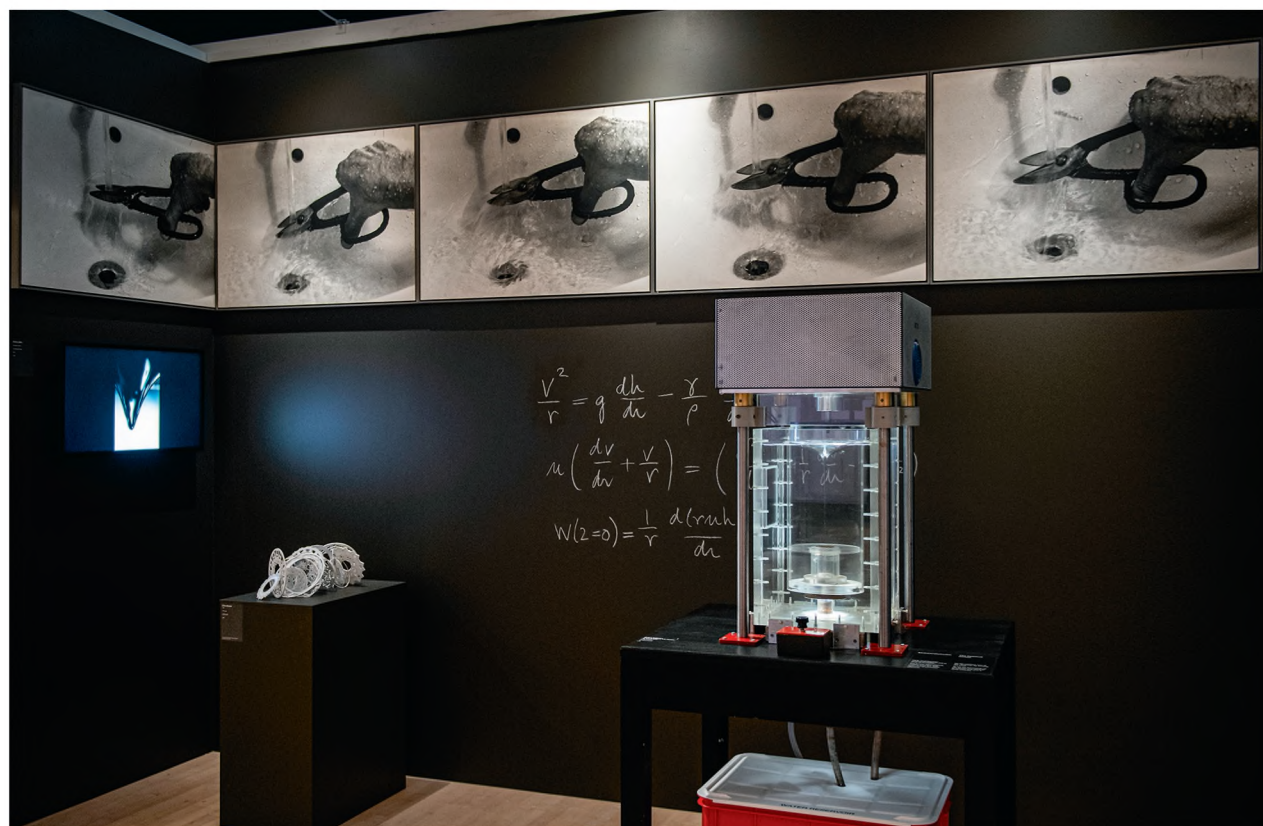
# Formen af strømmende vand

AF TOMAS BOHR

I 2017 vandt Esbjerg Kunstmuseums direktør Inge Merete Kjeldgaard og inspektør Christiane Finsen Bikubenfondens *Visionspris* med deres idé om tre udstillinger, alle med titlen *Wunderkammer*. Den første af disse udstillinger, *Wunderkammer I, Flydende form*, som vist på Esbjerg Kunstmuseum fra oktober 2018 til marts 2019, blev arrangeret i samarbejde med mig. Sammen med mine kolleger på DTU, Anders Andersen, Alexis Duchesne og Erik Hansen, skulle jeg skabe nogle eksperimentelle opstillinger, som beskæftigede sig med formen af strømmende vand, og til disse opstillinger skulle Inge Merete og Christiane finde nogle kunstneriske modsvar. Som bro mellem eksperimenterne og kunstværkerne optog filminstruktør Barbara Bohr en række videoer, hvori hun undersøger de visuelle muligheder, der er gemt i hvert af eksperimenterne. I det følgende vil jeg fortælle om de tanker, der lå bag udstillingens eksperimenter og undervejs vise billeder, dels fra selve udstillingen, dels fra nogle af Barbaras videoer. Teksten er baseret på det, jeg skrev til udstillingskataloget.

Noget af det mest fascinerende ved at iagttage bevægelser i vand og luft er alt det, man ikke ser. Både vand og luft er gennemsigtige, så man må slutte sig til bevægelsesmønstret ud fra støvkorn, skyer eller farvestof, hvis bevægelse man kan se. Når man arbejder med vands og lufts bevægelse, er en af de store udfordringer derfor netop at gøre bevægelsen synlig. I 1600-tallet lød opfordringen fra Galilei, en af naturvidenskabens pionerer: »Gør alt det måleligt, som endnu ikke er det.« I dag kunne vi måske tilføje: »Gør alt det synligt, som endnu ikke er det!« – som motto for en stor del af moderne videnskab. Vores øjne er nogle skarpe redskaber, som giver hjernen mulighed for at »forstå«, hvad der foregår – hvilket jo netop hedder »at få overblik«. Og her ligger der en frugtbar grænse-

FIGUR 1. Badekarshvirvlen på udstillingen *Wunderkammer I, Flydende form*, Esbjerg Kunstmuseum (2018-19). Foroven ses noget af Fabrizio Plessis fotoserie *Acqua Obliqua*, hvor han forsøger at klippe en vandstråle over. Til venstre ses skulpturen *Metropolis II* (2018) af Sirous Namazi samt en video af Barbara Bohr. Foto: Torben E. Meyer.



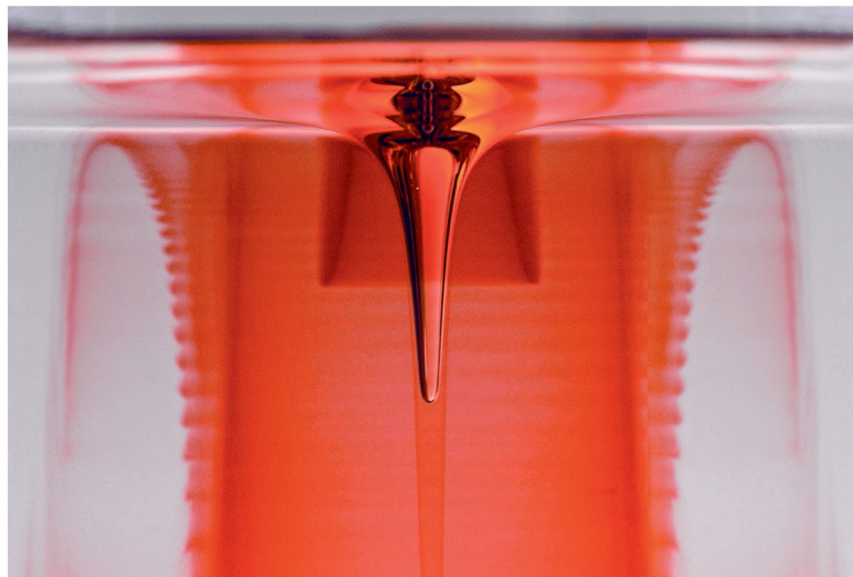


FIGUR 2. Close-up af badekarshvirvlen, der er ved at formes. Den beg-sortede spids er faktisk luft, der prøver at finde vej ned til udløbet. Foto: Barbara Bohr.

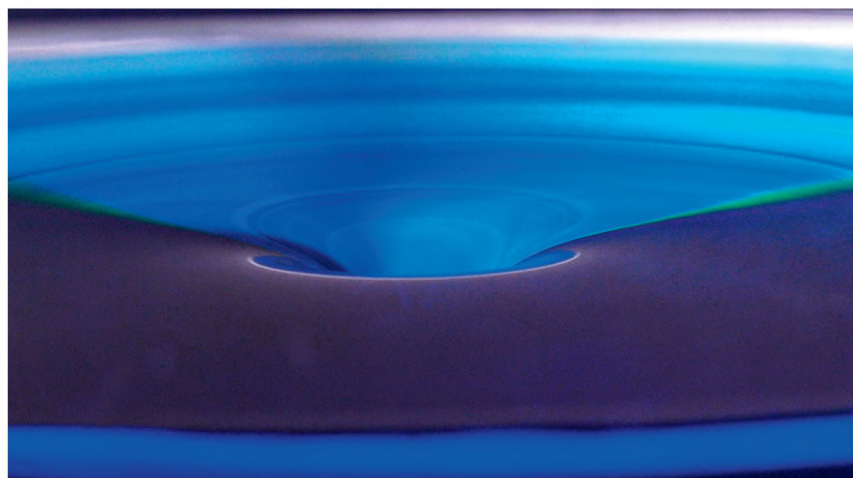
flade mellem videnskab og den visuelle kunst. Begge lever af at bruge øjnene.

### Badekarshvirvlen

I forsøget løber vand fra en cylindrisk beholder ud af et lille hul i beholderens bund. Derved dannes der ovenfra en tynd luftsøjle, som forsøger at nå udløbet – en »badekarshvirvel«, ligesom når vandet løber ud af et badekar. For at holde et konstant vandniveau i beholderen pumpes vandet tilbage og ledes forsigtigt ind i beholderen mellem plastpladen og beholderens sider. Eksperimentet er en idealisering af vand, der løber ud fra et badekar, og også inspireret af luftstrømningerne i en tornado. For at stabilisere strømmingen roteres den cylindriske beholder langsomt, hvorved man kan kontrollere luftsøjlelængde. Det kræver lidt tålmodighed, for det tager lang tid for vandet at blive »spundet op« og for luftsøjlen at få »sniffet« sig frem til det rigtige sted. I den stationære strømning vil



FIGUR 3. Den stationære badekarshvirvel set fra siden, med luftsøjlen i midten. Den stationære strømning er her tilsat rød farve, hvilket ikke kunne gøres på udstillingen. Kun på video. Foto: Barbara Bohr.



FIGUR 4. Den stationære badekarshvirvel set fra oven, tilsat blå farve. Foto: Barbara Bohr.



FIGUR 5. Når man stopper rotationen (i dette tilfælde på max-hastighed), forbliver hvirvlen der i nogen tid, men bliver ustabil og kraftigt deformet. Her igen tilsat blå farve. Foto: Barbara Bohr.

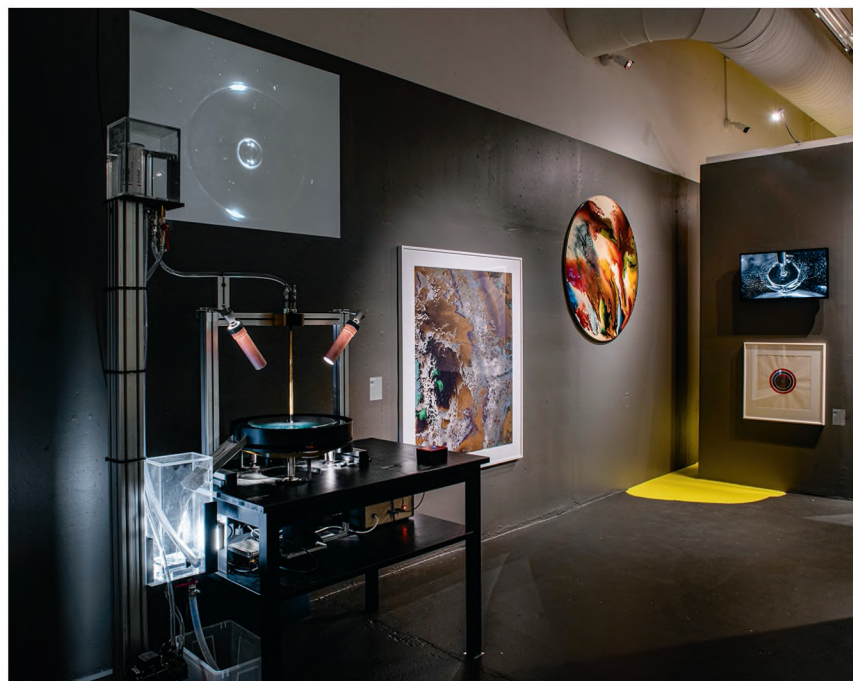
rotationshastigheden inde i midten være måske 1000 gange større end cylinderens. Eksperimentet var Anders Andersens ph.d.-projekt. Det oprindelige design er af Anders Andersen, Tomas Bohr, Bjarne Stenum, Jens Juul Rasmussen og Benny Lautrup og blev bygget på DTU Fysiks værksted i 1999 (Andersen et al. 2003, Andersen et al. 2006).

Bevægelsen af væsker og gasser, ofte sammenfattende kaldet »fluider«, kan være meget kompleks. Leonardo da Vinci registrerede dette med en kunstners sensitivitet kombineret med en videnskabsmands præcision, men det var først i midten af 1700-tallet, ca. 70 år efter, at Newton havde beskrevet de generelle bevægelseslove, at man fandt de ligninger, man skulle bruge – og først endnu næsten hundrede år senere, at man forstod, hvordan den indre friktion (viskositeten) kan inkluderes. Formlerne kaldes »Navier-Stokes-ligningerne«, og deres løsninger kan ikke generelt sættes på formel.

Vi har i mange år afholdt sommerskoler i en serie, som vi har kaldt »Complex Motion in Fluids«. Når jeg har indledt, har jeg ofte citeret den østrigsk-amerikanske fysiker Victor Weisskopf, som jeg engang hørte opstille det tankeeksperiment, at man samlede nogle dygtige teoretiske fysikere, der intet kendte til stoffernes tilstandsformer – måske fordi de kom fra en anden galakse. Hvis de kendte til molekyler og kræfterne imellem dem, ville de sikkert forudsige, at disse ved høje temperaturer flyver tilfældigt rundt uden at ænse hinanden ret meget – det, vi kalder en gas (f.eks. vanddamp) – måske også, at de ved lave temperaturer ville fryse fast i velordnede krystalgitter, hvor hvert molekyle sidder på sin plads holdt i skak af de andre – det, vi kalder et fast stof (f.eks. is). Men de ville nok aldrig forestille sig, at der kunne findes en væske-tilstandsform, hvor molekylerne er tæt bundet til hinanden, men alligevel bevæger sig frit, så materialet kan deformeres uhindret. I vand er afstanden mellem molekylerne mindre end i is, men de kan alligevel nemt bevæge sig ind mellem hinanden! Så sådan set er al bevægelse i væsker kompleks. Ikke så mærkeligt, at den har inspireret kunstnere fra de tidligste tider.

Når vi ser vand, der strømmer i en bæk eller ud af vandhanen, er det primært vandets overflade, vi ser. En vandoverflade er en slags (misundelsesværdigt) selvhelende hud dér, hvor vand og luft mødes. Hvis vi slår hul på en vandoverflade, danner det vand, vi slår af, straks dråber, og hullet forsvinder ved, at der bliver

dannet ny overflade. Overfladespændingen beskriver, hvor meget energi det kræver at danne ny overflade, og den sørger normalt for, at overfladens form er jævn og afrundet, så energien ikke bliver for stor. En strømmende vandoverflade er som toppen af et isbjerg: Dets form bestemmes ikke blot af overfladespændingen, men også af hele den usynlige strømning i vandet nedenunder.



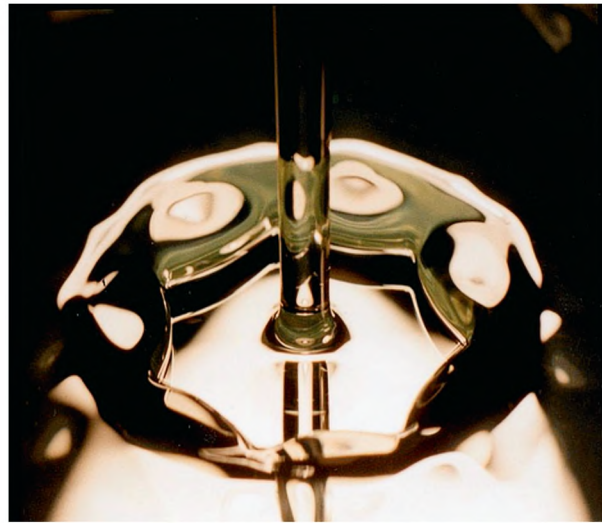
FIGUR 6. Det hydrauliske spring på udstillingen *Wundekammer I, Flydende form*, Esbjerg Kunstmuseum (2018-19). Foroven ses en projektion af et billede taget op gennem glaspladen, som viser springet set fra neden. Til højre ses James Welling: *G19BC* (2009/2012), Keith Tysons cirkulære *Nature Painting (Planet)* (2008) og Thorbjørn Lausten *Uden titel* (1971) under en video af Barbara Bohr. Det gule på gulvet i baggrunden er Rainer Splitts *Pouring (sulfur)* (2018). Foto: Torben E. Meyer.

Når en bølge brydes ind imod en klippe, er vi ikke så forbavsedede over, at vandoverfladen kan blive voldsomt kompliceret og endda opløses i skumsprøjt. Eksperimenterne på udstillingen var noget mere afdæmpede – ofte nede på et leje, hvor vi kunne få overfladerne til at blive fuldstændig stabile, som om de var skåret ud af glas. Alligevel kan man, hvis man har tålmodighed, se, at overfladerne kan få både bratte kanter, skarpe hjørner og tynde spidser – måske lidt mærkeligt for noget så blødt som vand. Og når vi ændrer lidt i betingelserne, kan en brat cirkulær kant blive omdannet til en mangesidet polygon. Selv når man sætter mere skub på og får mere uordnede, endda usammenhængende overflader, kan man se strukturer med en veldefineret overordnet form – f.eks. som en roterende femkant – trods den kaotiske strømning.



FIGUR 7. Det hydrauliske spring i vand. Foto: Barbara Bohr.

FIGUR 8. Det hydrauliske spring i ethylen-glycol (frysevæske) med en »syvkant«. Foto: Clive Ellegaard.



### Det hydrauliske spring

Det hydrauliske spring opstår, når en væskestråle rammer lodret ned på et vandret underlag, så væsken kan sprede sig frit ud til alle sider – en idealisering af det, man ser, når vandet løber ud af hanen og ned i køkkenvasken. Friktionen fra underlaget gør, at væsken efterhånden bremses. Forbavsende nok foregår denne opbremsning meget brat, idet væskehøjden pludselig øges ved en bestemt radius, hvor der opstår et »hydraulisk spring«. Inden for springet er der, på grund af den store væskehastighed, énvejskommunikation: Lokale forstyrrelser kan ikke bevæge sig indad mod strømmen, kun udad med strømmen.

Eksperimentet er forsynet med en knap, som starter en motor. Den hæver den cirkulære, afrundede rand, som væsken strømmer over før udløbet. Derved øges væskedybden gradvis uden for springet. I denne proces kan man se, at springet kan have meget forskellig struktur og strømning, bl. a. danne »polygoner« som vist i figur 8. For at stabilisere springet er der blandet glycerol i vandet (i forholdet 2:1). Eksperimentet er baseret på en udgave designet af Clive Ellegaard og Tomas Bohr og fremstillet af Niels Bohr Institutets værksted omkring 1998 (Ellegaard et al. 1998, Ellegaard et al. 1999, Watanabe et al. 2003, Martens et al. 2012).

Væskestrømninger spiller en stor rolle både i naturen og i teknologien. Der bruges mange ressourcer på at beregne og forudsige vejr, storme, havstrømninger eller strømninger omkring en møllevinge. Dyr og planter er fulde af vand, hvis strømninger sørger for tilførslen af livsnødvendige stoffer som ilt og sukker. Fisk og andre organismer skal manøvrere og overleve

i havet. Så for at forstå alt dette må man naturligvis kende de hydrodynamiske grundligninger.

I de eksperimenter, vi viste på udstillingen, tog vi udgangspunkt i dagligdags fænomener som vand, der strømmer ud af en hane eller løber ud af et badekar. Det er der flere grunde til. For det første ligner disse fænomener mere voldsomme storskala-naturfænomener som tidevandsbølger, tornadoer eller galakser tilstrækkeligt til, at man kan lære noget væsentligt af dem. For det andet er de aktive forskningsområder, hvor der hele tiden opdages nye fænomener, og hvor der ikke er enighed om de basale mekanismer. For det tredje synes vi simpelthen, at de er fascinerende, hvilket nok er en kombination af »smukke« og »forbavsende« – uden at vi kan definere det helt præcist. De skærper vores bevidsthed om de fænomener, som omgiver os. Og de lærer os ikke at tage noget for givet.

Niels Bohr blev engang i folkeskolen bedt om at skrive en stil om »Anvendelsen af naturkræfterne i hjemmet«. Hans korte besvarelse lød »I vores hjem anvender vi ikke naturkræfterne«. Det var naturligvis en provokation, idet han nok dels har tænkt, at naturkræfterne jo bestemmer hele vores verden og derfor ikke specielt hører til i hjemmet, dels måske har moret sig over tanken om, at hvert hjem kunne skrue op og ned for »naturkræfterne«, som de ville. Men naturkræfterne er der jo, også i hjemmet (i hvert fald hjemme hos mig); og specielt i køkken og badeværelse kan man i fred og ro studere, hvordan de skaber fascinerende væskestrømninger, hvis man altså lægger mærke til dem!

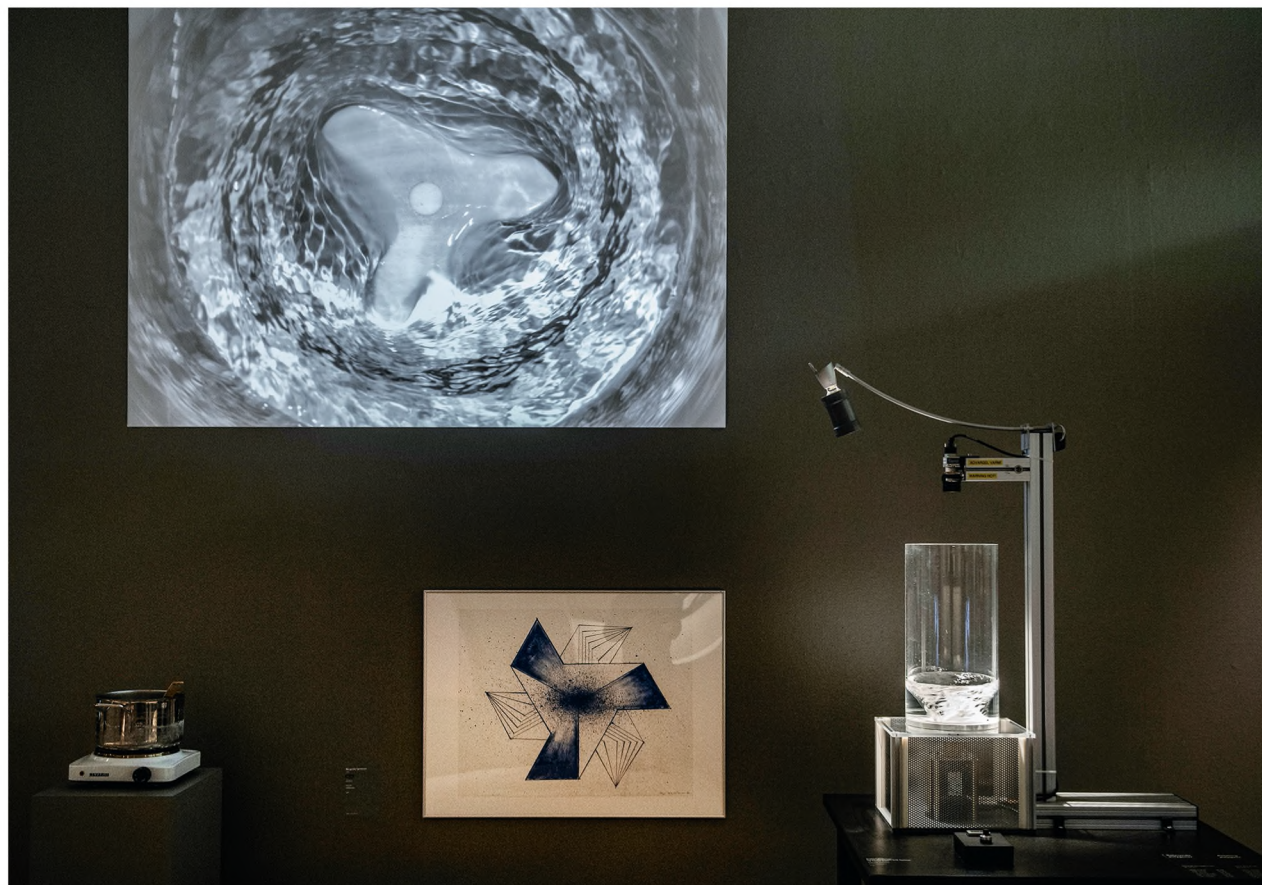
Vi bestræbte os på, at vores eksperimenter fremstod, så publikum kunne se alt, hvad der foregik uden nogen magisk »black box«, som man ikke kender

indholdet af. Og så havde vi installeret knapper, så publikum kunne ændre på rotationshastighed, dråbestørrelse, væskehøjde eller andre vigtige parametre, der ændrer udfaldet af eksperimenterne. Til gengæld gav vi ingen detaljerede forklaringer. For dem, der var interesserede, havde vi lagt nogle af vores videnskabelige artikler frem i de små nicher, som hørte til hvert af eksperimenterne, men de var naturligvis formuleret i det sædvanlige videnskabelige sprog med mange formler – de krævede nok en vis forhåndsviden om matematik og hydrodynamik.

Detaljerne i disse strømninger er ofte ret indviklede; de følger nok nogle simple regler (Navier-Stokes-ligningerne), men skaber samtidig utrolig komplekse strukturer, der har det med at løbe ud mellem fingrene på os, når vi forsøger at fastholde dem. Nogle gange er det svært at undgå at tillægge strømmingen personlige egenskaber og forklare strømninger ved, at vandet »gerne vil« løbe den vej. Det har jeg kaldt for »psykologisk hydrodynamik«, og det forsøger vi naturligvis ikke at henfalde for meget til.

## Roterende polygoner

Roterende væsker har været studeret flittigt – især fordi vi befinder os på en roterende jord. Newton lavede et berømt eksperiment, hvor han hængte en spand med vand op i et snoet reb. Da han slap spanden, kom den i rotation, og efterhånden faldt vandet til ro igen, men nu i forhold til den roterende spand. Overfladen var dog ikke længere flad men krummet parabolisk, og deraf sluttede Newton, at spandens roterende hvilesystem ikke var et »inertialsystem«, og at den simple form af bevægelseslovene, som han havde udviklet, derfor ikke gjaldt. Meget senere stillede Mach og Einstein spørgsmålet, hvorfor man ikke lige så godt kan sige, at det er os, der roterer i forhold til spanden, og det kom der så en helt ny teori for tyngdekraft ud af! Når kun bunden af »spanden« roteres er situationen er en helt anden: Vandet er »frustreret«, fordi det ikke kan falde til ro i noget referencesystem, og mærkelig nok giver det sig udslag i helt andre overfladeformer, hvor f.eks. rotations-



FIGUR 9. Roterende polygoner på udstillingen *Wundekammer I, Flydende form*, Esbjerg Kunstmuseum (2018-19). I forsøget vises, hvad der sker, når vand sættes i rotation, men forhindres i at rotere som et samlet legeme. Her er det bundpladen i et cylindrisk kar, der roteres, mens selve cylinderen står stille – lidt som en idealiseret mælkeskummer. Et videokamera viser vandoverfladen set ovenfra, som projiceres op på væggen bagved. Nedenunder ses det grafiske værk *Uden titel* af Margrethe Sørensen (1981). Foto: Torben E. Meyer.

symmetrien brydes og overfladen danner noget, der ligner en jævnt roterende polygon (Jansson et al. 2006, Bergmann et al. 2011, Tophøj et al. 2013, Mougel et al. 2017, Duchesne et al. 2019).

Vi bliver bombarderet med meninger og forudsigelser baseret på matematiske modeller af de meget komplicerede systemer, som omgiver os: økonomien, vejret – sågar universets opståen og fremtid. I den sammenhæng kan det måske bidrage til et gran af skepsis, at man stadig kan forbavses over vand, der strømmer ud af en vandhane. Hvis vi ikke havde haft eksperimenterne til hjælp, var teorien nok kommet bedrøveligt til kort. Vi håber derfor også, at udstillingen har kunnet bidrage til, at man bliver opmærksom på de fascinerende komplekse naturfænomener, der udspiller sig lige for øjnene af os.

Jeg vil gerne takke Inge Merete Kjeldgaard og Christiane Finsen for at have draget mig ind i et spændende og udfordrende kunstprojekt og Anders Andersen, Alexis Duchesne og Erik Hansen for deres medvirken, der gjorde det muligt at tage denne udfordring op. Jeg er Barbara Bohr taknemlig for de dejlige videoer, som fulgte med eksperimenterne og dermed for de fleste af billederne her i teksten.



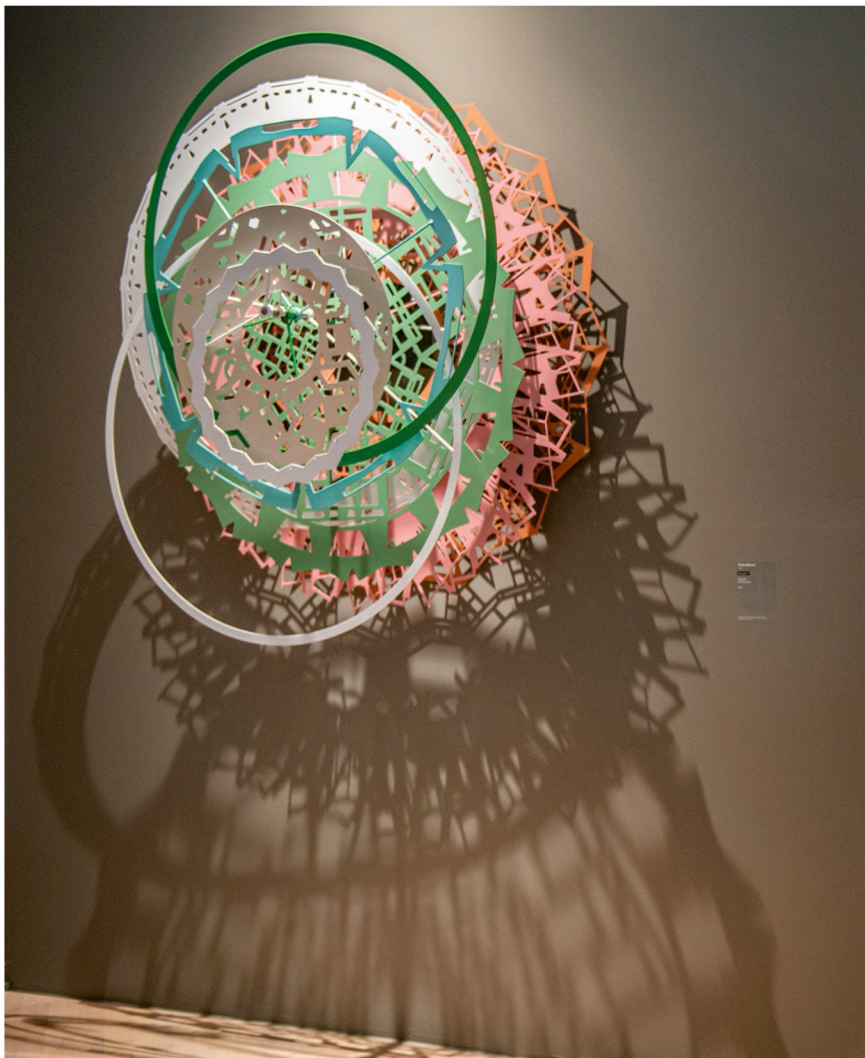
FIGUR 10. En roterende trekant set skråt ovenfra. Cylinderen er her 30 cm i diameter, og kun bunden roterer. Foto: Barbara Bohr.



FIGUR 11. Nærbillede af en roterende trekant. Foto: Barbara Bohr.

## Litteratur

- Andersen, A., Bohr, T., Stenum, B., Juul Rasmussen, J. & Lautrup, B. 2003: »Anatomy of a Bathtub Vortex«, *Physical Review Letters* 91, 104502.
- Andersen, A., Bohr, T., Stenum, B., Juul Rasmussen, J. & Lautrup, B. 2006: »The bathtub vortex in a rotating container«, *Journal of Fluid Mechanics* 556, 121-146.
- Bergmann, R., Tophøj, L., Homan, T.A.M., Hersen, P., Andersen, A., Bohr, T. 2011: »Polygon formation and surface flow on a rotating fluid surface«, *Journal of Fluid Mechanics* 679, 415-431.
- Duchesne, A., Bohr, T., Bohr, B. & Tophøj, L. 2019: »Nitrogen swirl: Creating rotating polygons in a boiling liquid«, *Phys. Rev. Fluids* 4, 100507.
- Ellegaard, C., Hansen, A.E., Haaning, A., Hansen, K., Marcussen, A., Bohr, T., Hansen, J.L. & Watanabe, S. 1998: »Creating corners in kitchen sinks«, *Nature* 392, 767-768.
- Ellegaard, C., Hansen, A.E., Haaning, A., Hansen, K., Marcussen, A., Bohr, T., Hansen, J.L. & S. Watanabe 1999. »Cover illustration: polygonal hydraulic jumps«, *Nonlinearity* 12, 1-7.
- Jansson, T.R.N., Jensen, K.H., Haspang, M.P., Hersen, P. & Bohr, T. 2006: »Polygons on a Rotating Fluid Surface«, *Physical Review Letters* 96, 174502.
- Martens, E.A., Watanabe, S., Bohr, T. 2012: »Model for polygonal hydraulic jumps«, *Physical Review E* 85, 836315.
- Mougel, J., Fabre, D., Lacaze, L., Bohr T. 2017: »On the instabilities of a potential vortex with a free surface«, *Journal of Fluid Mechanics* 824, 230-264.
- Tophøj, L., Mougel, J., Bohr, T. & Fabre, D. 2013: »The Rotating Polygon Instability of a Swirling Free Surface Flow«, *Phys. Rev. Lett.* 110, 194502.
- Watanabe, S., Putkaradze, V., Bohr T. 2003: »Integral methods for shallow free-surface flows with separation«, *Journal of Fluid Mechanics* 480, 233-265.



FIGUR 12. Det er umuligt at få bundpladen til at rotere helt horisontalt, og derfor var vi længe usikre på, om disse mærkelige tilstande skyldes pladens små rytmiske vip. Min daværende ph.d.-studerende Laust Tophøj fandt så på, at vi kunne udføre eksperimentet i en beholder, der står stille – når blot vi kunne finde en væske med så lav friktion, at den kan rotere længe nok, når først den er sat i gang. Vand har dog i forvejen en meget lav friktion, og det er svært at finde noget, der er endnu mere »tyndtflydende«. I stedet foreslog han, at vi skulle bruge »Leidenfrost-effekten«: at en vanddråbe kan bevæge sig næsten helt frit og gnidningsløst henover en varm kogeplade, fordi der dannes en pude af vanddamp, som den ligger på. I stedet for vand valgte vi flydende kvælstof, som koger allerede ved ca.  $-200^{\circ}\text{C}$  og derfor koger for fuld damp ved stuetemperatur. Vi kunne desværre ikke vise dette eksperiment »live« på udstillingen, da det var for vanskeligt at håndtere og fremskaffe de store mængder flydende kvælstof. Men på videoen i midten kan man se, hvad der sker, når man hælder flydende kvælstof i en varm gryde (til højre) rører rundt og derefter lader væske rotere i fred (med et løst låg på så vanddampen kan komme ud). Til venstre ses Sirous Namazis *Metropolis* (2018), som også indeholder polygoner. Foto: Torben E. Meyer.



FIGUR 13. Et kig ned i gryden med roterede kvælstof. Trods den voldsomt kaotiske, kogende væskestrømning dannes der spontant polygonale strukturer (her en femkant), der roterer næsten som et stift legeme. Foto: Alexis Duchesne, Tomas Bohr, Barbara Bohr og Laust Tophøj.

