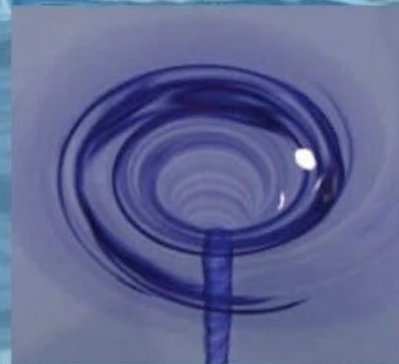


Andreas Wilkens · Herbert Dreiseitl · Jennifer Greene
Michael Jacobi · Christian Liess · Manfred Schleyer
Wolfram Schwenk

Wasser bewegt

Phänomene
und Experimente



**Andreas Wilkens / Herbert Dreiseitl / Jennifer Greene
Michael Jacobi / Christian Liess / Manfred Schleyer
Wolfram Schwenk**

Wasser bewegt

**Phänomene
und Experimente**

Zu den Autoren

Andreas Wilkens (geb. 1955), Botanik- und Zellbiologiestudium. Seit 1989 Mitarbeiter am Institut für Strömungswissenschaften, Herrischried.

Prof. Herbert Dreiseitl (geb. 1955), Künstler und Landschaftsarchitekt. DREISEITLconsulting.com, Überlingen, Professur für klimagerechte, lebenswerte Stadtentwicklung, Freiraumplanung und Stadthydrologie.

Jennifer Greene (geb. 1945), Gründerin und Direktorin des Wasserforschungsinstituts Blue Hill in Maine (USA).

Michael Jacobi (geb. 1949), Physik-, Mathematik- und Astronomiestudium. Seit 1990 Wissenschaftler und Forschungstätigkeit am Institut für Strömungswissenschaften.

Prof. Dr. Christian Liess (geb. 1941), Maschinenbaustudium. Professur für Strömungslehre und Strömungsmaschinen im Fachbereich Maschinenbau an der Fachhochschule Konstanz. Freie Mitarbeit am Institut für Strömungswissenschaften.

Dr. Manfred Schleyer (geb. 1961), Biologiestudium mit Vertiefung in Mikro- und Molekularbiologie, Waldorflehrer, seit 2007 Leitung des Instituts für Strömungswissenschaften.

Wolfram Schwenk (1942-2014), Biologie- und Limnologiestudium. 1976–2007 in der Leitung des Instituts für Strömungswissenschaften.

Die Herausgabe dieser Publikation wurde unterstützt durch:

- Anthroposophische Gesellschaft in Deutschland e.V., Eichwalde, Bereich Forschung und Forschungsförderung
- Iona Stichting, Amsterdam (Niederlande)
- Pädagogische Forschungsstelle beim Bund der Freien Waldorfschulen e. V., Stuttgart
- Walter und Adeline Ostheimer Stiftung, Zell unter Aichelberg
- Mitglieder und Förderer des Vereins für Bewegungsforschung e.V.

Umschlagabbildungen

Vorn: Großes Bild: Windwellen (S. 105);

Kleine Bilder: Wasserglocke (S. 97), Abflusswirbel (S. 37), Tautropfen (S. 123)

Hinten: Großes Bild: Windwellen (S. 104);

Kleine Bilder: Ringwirbel (S. 67), Gebirgsbach (S. 95), Wasserlamelle (S. 92)

Gestaltung und Satz: Atelier Mühlberg, Basel (Schweiz); Kooperative Dürnau, Dürnau

Einbandgestaltung: Andreas Pahl

Neubearbeitung und Lektorat: Christian Liess, Institut für Strömungswissenschaften

3. neu bearbeitete Auflage: 2022

Bibliografische Information der *Deutschen Nationalbibliothek*

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation

in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten

sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-931719-11-1

Alle Rechte vorbehalten.

Copyright © 2022 Institut für Strömungswissenschaften im Verein für Bewegungsforschung e.V.

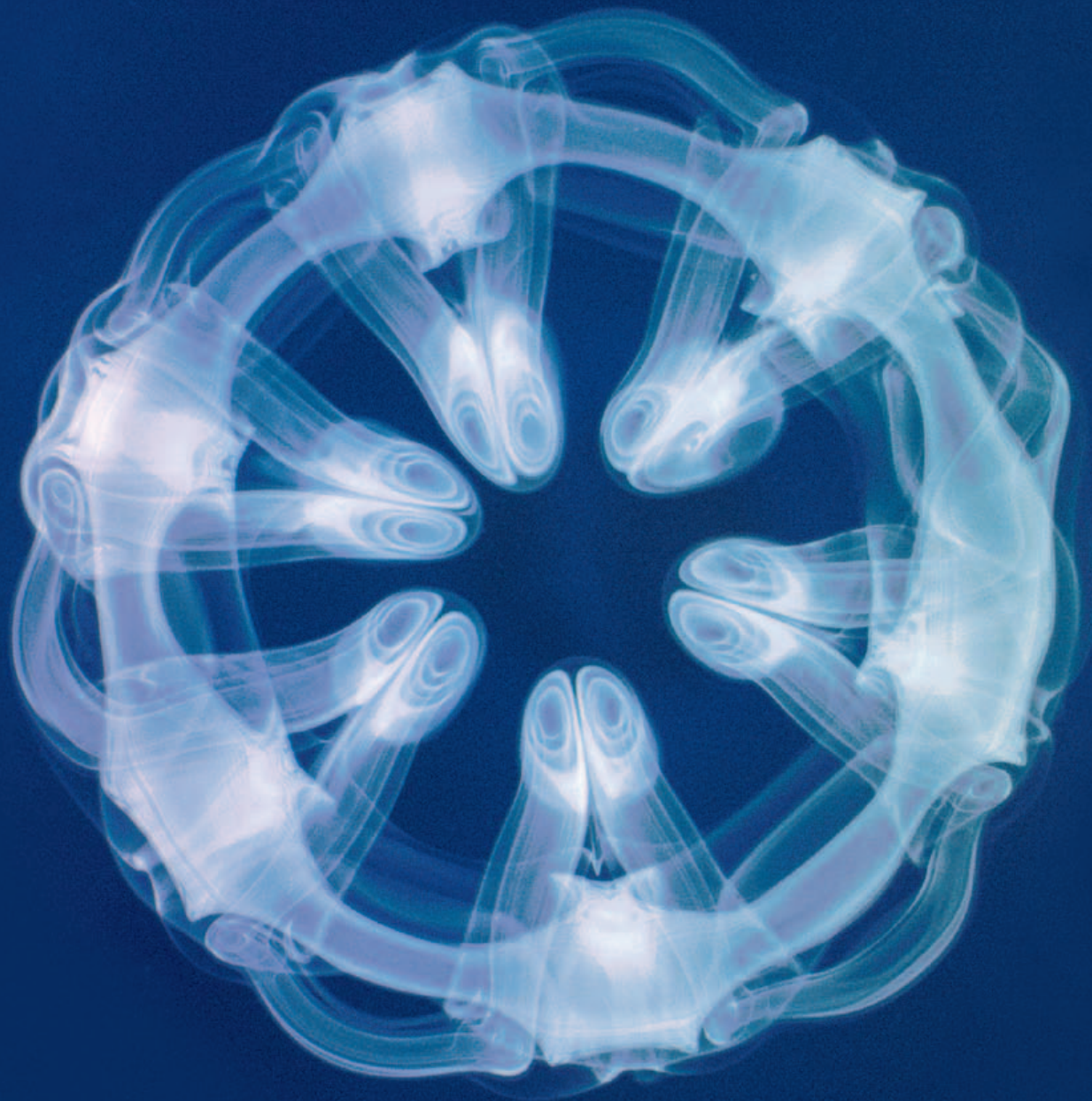
Jede Art der Vervielfältigung ohne Genehmigung des Vereins für Bewegungsforschung e.V. ist unzulässig.

Printed in Germany.

www.stroemungsinstitut.de

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	8
I Einleitung	10
1 Flüssiges verhält sich anders als Festes	20
II Organisierendes Strömen – Gestaltungsprozesse im Inneren des Wassers	28
2 Wirbel – die Meister der Pirouetten	30
3 Wirbelstraßen – strömende Choreographie	50
4 Ringwirbel – die königlichen Wirbel	58
III Gestaltendes Fließen an äußeren Grenzen	70
5 Mäander – das Schlingeln von Flüssen und Rinnsalen	72
6 Sandrippel – Dünen unter Wasser	82
7 Durchströmte Form – Stoff und Form gehen nicht zusammen	88
IV Die Wasseroberfläche – die Außenseite des Wassers	100
8 Wellen – Emanzipation in Rhythmen	104
9 Wassertropfen – schwingende Sphären	122
V Fallende Tropfen erregen den Wasserspiegel	134
10 Aufprallende Tropfen – platzende Gasblasen	136
11 Tropfbilder – Strömungsformen offenbaren die Wasserbeschaffenheit	150
12 Experimente zum Verständnis von Tropfbildern	156
VI Vom Wasser lernen: Wasser-Workshops – soziale Experimente	168
13 Workshops zu Wasserphänomenen (<i>Jennifer Greene</i>)	170
14 Gemeinsames Experimentieren – Bürgerbeteiligung im Städtebau auf einem fruchtbaren Weg (<i>Herbert Dreiseitl</i>)	180
15 Was lehrt uns das Wasser? Eine Zusammenfassung	186
VII Physikalische Grundlagen	188
16 Physikalische Gesetze der Wasserströmungen	190
VIII Anhang	206
17 Übersicht der Versuche	208
18 Zusatzinformationen und Versuchsanleitungen	210
19 Sicherheitshinweise und Bezugsquellen	244
Literatur und Quellenangaben	246
Bildnachweis	249
Register	250



VORWORT

Vorwort zur Neuauflage 2022

Als nach 10 Jahren die erste Auflage von *Wasser bewegt* vergriffen war, wurde 2020 die Nachfrage durch eine kleine 2. Auflage befriedigt und beschlossen, das Buch gründlich zu überarbeiten und zu aktualisieren. Vor allem sollte der Umfang des Buches durch Inhalte erweitert werden, die in der ersten Auflage keinen Platz gefunden hatten. Deshalb sind zusätzliche Wasserphänomene und Beispiele aus der großen Fülle von besonders interessanten Strömungserscheinungen ergänzt.

Eine weitere Änderung betrifft die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Wasserströmungen, die in der ersten Auflage vor allem in Kapitel 3, aber auch über das Buch verstreut zu finden waren. Diese sind nun für interessierte Leserinnen und Leser am Ende des Buches in einem eigenen Kapitel 16 zusammenhängend überschaubar dargestellt. Schließlich wurde noch versucht, manche schwerer verständlichen Inhalte klarer zu formulieren und die Inhalte übersichtlicher anzuordnen.

Seit der ersten Auflage von *Wasser bewegt* im Jahr 2009 hat sich der Wasserhaushalt der Erde durch den Klimawandel sehr verändert: Starkregen mit Überflutungen, lange Trockenzeiten und bisher nie dagewesene Waldbrände treten immer häufiger auf und machen uns die Notwendigkeit eines neuen und nachhaltigeren Umgangs mit der Natur und mit dem Wasser, der Grundlage allen Lebens auf der Erde, sehr deutlich. Dabei ist es besonders wichtig, das Wasser nicht mehr nur als beliebigen, physikalischen Stoff anzusehen und zu behandeln, sondern vor allem seine lebensvermittelnden Möglichkeiten der Verwandlung und Gestaltbildung und seine enge Verwandtschaft zum Bereich des Lebens ernst zu nehmen. Hierzu möchte dieses Buch einen Beitrag leisten.

Den Freunden *Dr. David Auerbach, Prof. Herbert Dreiseitl, Michael Jacobi, Dr. Erhard Meißner, Dr. Manfred Schleyer, Hans van Sluis* und *Andreas Wilkens* danke ich sehr für ihre fachliche Beratung, *Georg Nitsche* für das gründliche Korrektur-Lesen und *Andreas Wilkens* außerdem noch für die Bereitstellung von weiteren Versuchsbeschreibungen und Wasserfotos hoher Qualität. Der *Kooperative Dürnau* gilt mein herzlicher Dank für die gute Zusammenarbeit und die hohe Qualität der 3. Auflage.

Herrischried, im Mai 2022, *Christian Liess*

Vorwort zur ersten Auflage 2009

In den 1960-er Jahren, in der Anfangszeit des Instituts für Strömungswissenschaften in Herrischried, entwickelte *Theodor Schwenk* (1910–1986) für Institutsführungen Vorführversuche, um die Besucher das Wasser unmittelbar erleben zu lassen. Es waren die klassischen beeindruckenden Experimente, wie Wirbelstraßen, Wirbeltrichter und aufsteigende Ringwirbel (vgl. *Schwenk* 1962 und 1967). Oft und immer häufiger wurde nach Anleitungen für solche Experimente gefragt. Im Lauf der Jahre entwickelten die Institutsmitarbeiter weitere Vorführversuche, die von 1999 an in den Institutsmitteilungen *WASSERZEICHEN* als Experimente zum Selbermachen beschrieben wurden (*Wilkens* 1999–2008, *Schwenk* 1999–2000,

Jacobi 2007, *Liess* 2008). Sie waren als Vorarbeiten für ein Buch angelegt, das einem weiteren Kreis von Interessenten Beobachtungshilfen für das Wasser geben sollte. Dieses Buch, erweitert um grundsätzliche Ausführungen und um viele neue, von *A. Wilkens* entwickelte Experimente, liegt nun vor Ihnen.

Bücher über Wasserexperimente legen gewöhnlich den Schwerpunkt darauf, physikalische Gesetzmäßigkeiten zu vermitteln. In diesem Buch steht dagegen vor allem das Wasser als Flüssigkeit, das Bewegliche, Formenschaffende, Gestaltbildende und Verwandlende des flüssigen Wassers – wie es frei mit den Gesetzmäßigkeiten spielt – im Vordergrund. Dieser Aspekt erscheint uns wesentlich und geeignet, sich dem immer noch rätselhaften Phänomen Wasser und seinen dem Leben dienenden Funktionen anzunähern. Es kommt darauf an, das Wasser direkt zu erleben, wie es immer in Bewegung, in Verwandlung und in Prozessen ist. Die Wasserphänomene sind nicht statisch, sie ereignen sich in der Zeit. Dieser zeitliche Aspekt ist nur denjenigen zugänglich, die direkt am Geschehen teilhaben. Deshalb soll dieses Buch vor allem anregen und anleiten, Prozesse des Entstehens, Wandeln und Vergehens selbst zu beobachten und im Experimentieren zu erleben.

Wir begegnen dem Wasser im alltäglichen Leben in der Natur wie auch in der Stadt, zuhause oder bei der Arbeit, in einer Fülle verschiedener Erscheinungen. Besonders charakteristische werden hier hervorgehoben und durch Versuche dem bewussten Wahrnehmen und dem Verstehen erschlossen. Alle am Wasser Interessierten möchten wir mit diesem Buch ansprechen, auch Schülerinnen und Schüler und Physik-Laien. Die Experimente sind daher so angelegt, dass sie mit einfachsten Mitteln realisiert werden können. Aber auch diejenigen Menschen, die nicht die Möglichkeit haben, selbst Versuche durchzuführen, bekommen durch die ausführlichen Beschreibungen und die zahlreichen Bilder Anregungen, Wasserphänomene im Alltag zu beobachten und für sich selbst neu zu entdecken. Lehrerinnen und Lehrern bietet das Buch Material für den Unterricht. Lassen sich am Wasser doch viele grundsätzliche Lerninhalte vermitteln und Denkanstöße geben.

Das Buch wurde als Gemeinschaftswerk der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Strömungswissenschaften unter der Federführung von *Andreas Wilkens* gemeinsam mit *Prof. Dr. Christian Liess* und *Michael Jacobi* erarbeitet und liegt jetzt in einer von *Wolfram Schwenk* überarbeiteten Fassung vor. *Dr. Manfred Schleyer* gab Hinweise zur Anpassung der Ausführungen in pädagogischer Hinsicht. *Jennifer Greene* vom *Water Research Institute of Blue Hill*, Maine (USA) stellte ihr Konzept für einführende Wasser-Workshops zur Verfügung und *Prof. Herbert Dreiseitl* von *DREISEITLconsulting*, Überlingen, berichtet über seine Erfahrungen mit Wasser-Workshops anlässlich der Bürgerbeteiligung bei der Planung städtebaulicher Wasserprojekte. Beide geben Einblick in bemerkenswerte Lernprozesse und soziale Fortschritte, die beim Entdecken des Wassers angestoßen werden können.

Herrn *Erich Bäuerle* danken wir für seine Ideen und Anregungen zu einzelnen Versuchen.

Das Erarbeiten der Versuche und die Herausgabe des Buchs wurden durch die verständnisvolle und großzügige Unterstützung vieler am Wasser interessierter Menschen und Institutionen möglich. Ihnen allen sei dafür herzlich gedankt! Unser besonderer Dank geht an die *Anthroposophische Gesellschaft in Deutschland e.V.*, Eichwalde, Bereich Forschung und Forschungsförderung, an die *Iona Stichting*, Amsterdam (Niederlande), die *Pädagogische Forschungsstelle* beim *Bund der Freien Waldorfschulen e.V.*, Stuttgart, die *Walter und Adeline Ostheimer Stiftung*, an den *Haupt Verlag*, Bern (Schweiz) und nicht zuletzt an den *Verein für Bewegungsforschung e. V.*, Herrischried, und alle, die ihn fördern.

Herrischried, im März 2009, *Andreas Wilkens*



3 WIRBELSTRASSEN – STRÖMENDE CHOREOGRAPHIE

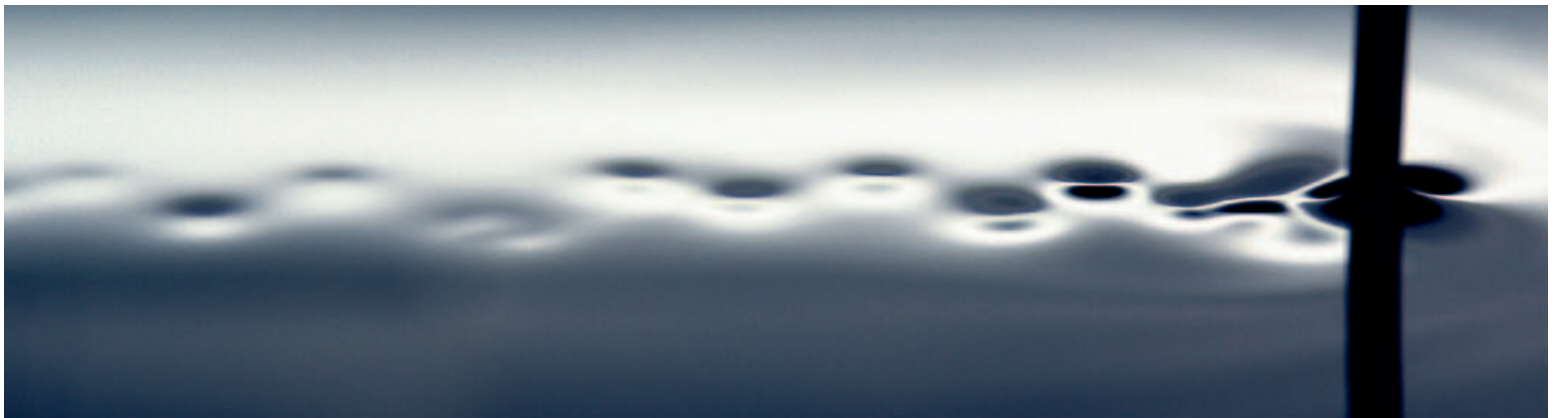
Wir stehen auf einer Brücke über einem großen Fluss und blicken auf das züchtig fließende Wasser. Die Strömung an einem der Brückenpfeiler fesselt unsere Aufmerksamkeit. Hier fallen uns intensiv kreisende trichterförmige Strudel auf, die sich vom Pfeiler stromabwärts in scheinbar unregelmäßiger Folge und leicht hin und her pendelnd ablösen. Sie können viele Meter weit verfolgt werden. Manchmal erweist sich die ganze Kette dieser Strudel im Überblick als eine wohlgeordnete Reihe von Wirbeln, als sogenannte Wirbelstraße (Abb. 3.1 und 3.2).

Nachlaufströmungen dieser Art kommen in der Natur bei den vielfältigsten Gelegenheiten vor, bleiben aber der direkten Beobachtung oft verborgen. Jeder Felsblock und Stein im Bach, jede in das fließende Wasser ragende Baumwurzel, jeder Pfahl und Brückenpfeiler geben Anlass für sich ablösende Wirbel im vorbeifließenden Wasser. Wirbelstraßen entstehen aber auch im umgekehrten Fall, wenn ein Hindernis durch eine ruhende Flüssigkeit streicht, z. B. beim Rühren im Kochtopf oder in der Tasse. Ganz anders begegnen wir Wirbelstraßen, wenn wir ins Wasser eintauchen und die Wirbel auf der Haut spüren. Bewegen wir beispielsweise die gespreizte Hand schnell durch das Wasser, vibrieren die Finger durch die Kraftwirkungen der entstehenden Wirbelstraßen hin und her.

Wie kommen Wirbelstraßen zustande? Sie entstehen im *Inneren* von Flüssigkeiten und hinterlassen an deren Oberfläche nur unscheinbare Spuren, wie zum Beispiel Trichter oder Näpfchen in den Wirbelzentren. Erst durch Anfärben lernen wir sie genauer kennen und geraten ins Staunen, wenn wir die Entwicklung einer Wirbelstraße (Abb. 3.2 und 3.4) verfolgen können: die Vielfalt der Bewegungen und Formen, deren Harmonie und Ordnung, die sich zu einem einheitlichen Ganzen fügen, hervorgerufen durch die einfache Bewegung eines Stabes, den wir geradlinig durch die Flüssigkeit führten.

ABBILDUNG 3.1

Kleine Einsenkungen in der Wasseroberfläche zeigen die Anordnung einer Wirbelstraße im Nachlauf eines Stabes an.



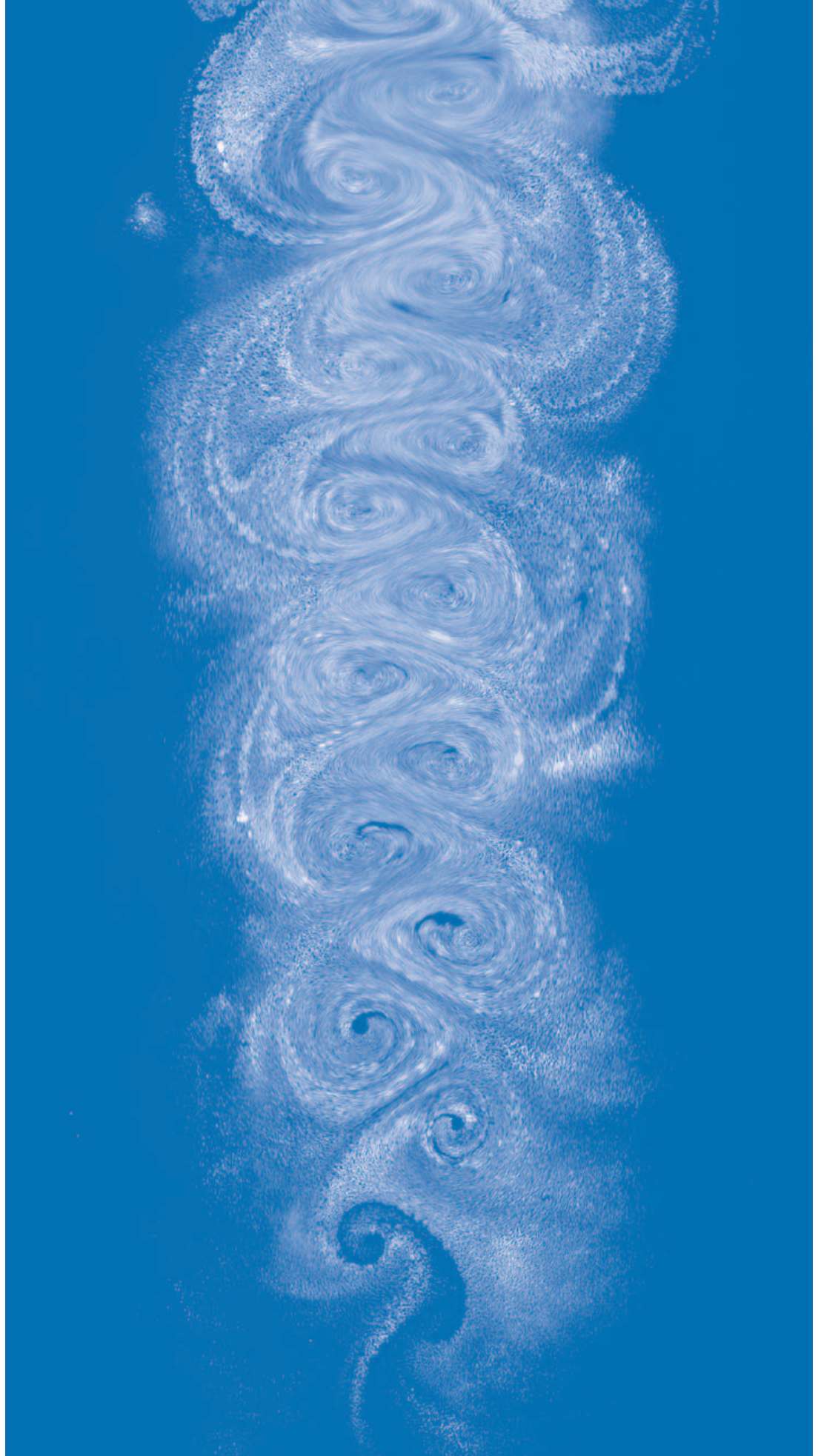


ABBILDUNG 3.2
Wirbelstraße in zäher Flüssigkeit (Aufsicht;
siehe Versuch 3.1).

Wirbelstraße in großer Wanne 💧💧

In eine große flache Wanne mit dunklem ebenem Boden füllen wir eine wenige Zentimeter tiefe Flüssigkeitsschicht mit der Konsistenz eines dünnen Sirups ein. Diese Schicht regen wir mit einem Stab oder Pinsel zur Bewegung an, indem wir diesen senkrecht bis zum Boden eintauchen und mit mäßiger Geschwindigkeit geradlinig längs durch die Wanne ziehen. Außer einer unruhigen Bewegung der Oberfläche ist dabei nichts Besonderes zu erkennen.

Nun streuen wir schwimmfähigen Puder – zum Beispiel Bärlapp-Sporen – dünn auf die Flüssigkeits-Oberfläche, sodass viele, wenige Zentimeter große Flecken entstehen, und ziehen den Stab erneut hindurch. (Anstelle des Puders können wir auch einige Kleckse Tinte oder einen feinen Streifen von Tinte vorsichtig auf den Boden der Wanne aufbringen; in diesem Fall ist ein heller Boden geeigneter.)

Nun wird sichtbar, wie die Flüssigkeit reagiert. Wenn die Versuchsbedingungen gut aufeinander abgestimmt sind (siehe die ausführliche Darstellung in Kapitel 18), entstehen hinter dem Stab intensive Bewegungen (Abb. 3.3). Wirbel bilden sich im Nachlauf des Stabes, abwechselnd auf der einen und der anderen Seite, wachsen und lösen sich von ihm. So bleiben zwei Reihen von gegeneinander versetzt angeordneten Wirbeln zurück, die anfangs noch langsam dem Stab folgen. Jeder der entstandenen Wirbel ist sowohl mit dem einen wie mit dem anderen gegensinnig drehenden Nachbarn verbunden. Sie entstehen in starker Wechselwirkung miteinander, wie weiter unten beschrieben ist.

Wir erleben besonders die hin und her pendelnde Bewegung der Wirbel hinter dem Stab und die relativ schnellen Drehungen, die von jedem Wirbelzentrum nach außen hin immer langsamer werden. Sie beziehen die umgebende Flüssigkeit in ihre Bewegung ein, werden größer und klingen dann bald ab. Eine Bewegungsgrenze kann man nicht angeben, der ganze Umkreis bis zum Rand der Wanne ist beteiligt (Abb. 3.5).

Das Flüssigkeitsvolumen erfährt durch diese Bewegungen eine intensive Umgestaltung. Die Puderflecken werden zu aneinander vorbei gleitenden Bändern und Linien auseinandergezogen und spiralg eingerollt. Je nach Anfärbung erhalten wir einen anderen, neuen Aspekt. Bei halbseitiger Anfärbung (Abb. 3.4) wird deutlich, wie die Grenze zwischen den beiden Seiten in die Wirbel eingewickelt wird und sich beide Bereiche innig vermischen. So findet sich in jedem Wirbel Flüssigkeit von jeder der beiden Seiten, in benachbarten Schichten aufgewickelt. Wie Bewegung und Form zueinander im Verhältnis stehen, ist in Abbildung 3.5 angedeutet.

Eine Miniatur-Wirbelstraße in einer kleinen Schale ist in Kapitel 18 als Versuch 3.4 beschrieben.

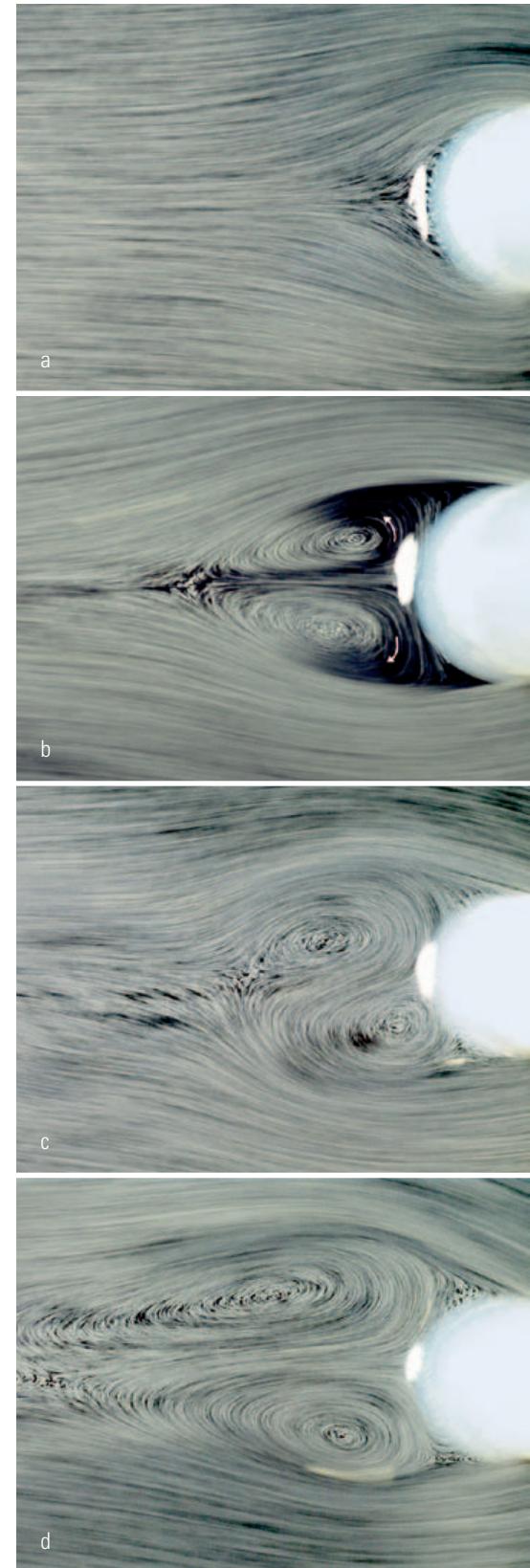


ABBILDUNG 3.3

Bewegungsspuren von Bärlapp-Sporen auf Wasser hinter einem Stab. Die Kamera wurde mit dem Stab mitgeführt. a: Zu Beginn der Bewegung schließt sich die Strömung hinter dem Stab; b: sogleich entsteht ein Nachlaufwirbel-Paar mit gegenläufigem Drehsinn (Pfeile), das dem Stab folgt; c, d: die Symmetrie des Wirbelpaars wird instabil; einer der Wirbel wird größer und löst sich vom Stab.

Wasserglocken

Wasserglocken 💧💧

Lassen wir den Wasserstrahl von Versuch 7.3 statt auf eine große auf eine kleine und glatte, kreisrunde Platte aufprallen, beispielsweise auf die Stirnseite einer runden Stange, dann schießt das Wasser als dünne Lamelle weit über den Rand hinaus (Abb. 7.11). Diese zieht sich im Fallen zu einer Glocke zusammen und zerfällt dann in Tröpfchen. Je nach dem Durchmesser der Platte und der Stärke und Kontinuität des Strahls entstehen verschiedene Glockenformen (Abb. 7.12).

ERLÄUTERUNGEN: Die Glockenform macht sichtbar, wie Oberflächenspannung und Trägheitskräfte der horizontal abfließenden und dann fallenden Wasserlamelle im konkreten Fall zusammenspielen.

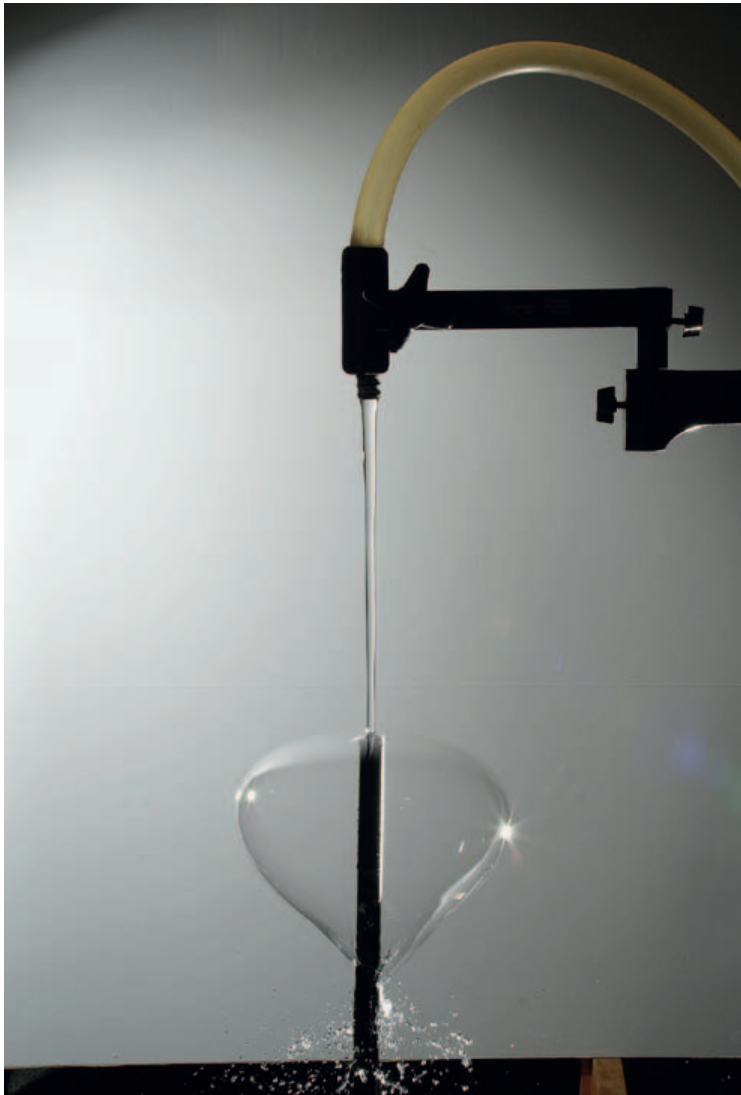


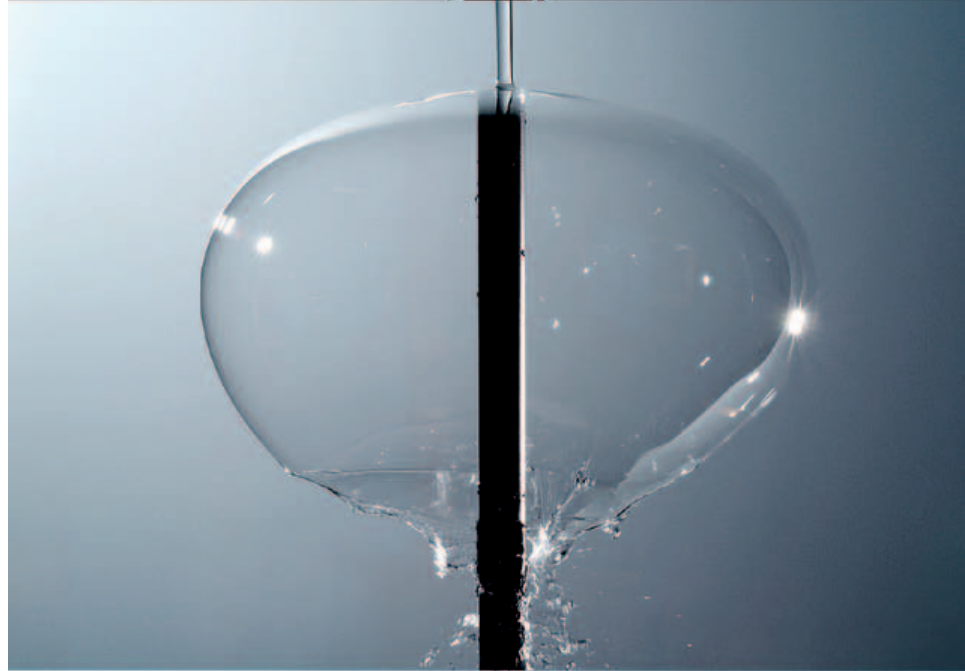
ABBILDUNG 7.11

Der Wasserstrahl prallt auf das glatte scharfrandige Ende einer Stange mit 2 cm Durchmesser.

a



b



c

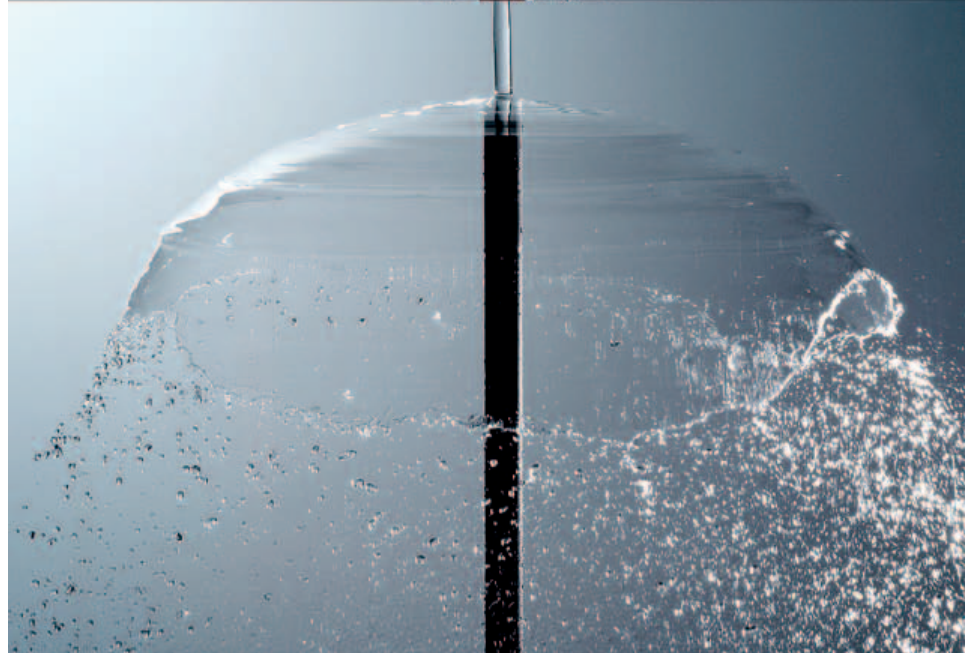


ABBILDUNG 7.12

Verändert man den Wasserfluss, ergeben sich unterschiedliche Glockenformen.
a: kleiner, b: mittlerer, c: großer Wasserfluss