

Gerald H. Pollack

Wasser – viel mehr als H₂O

Bahnbrechende Entdeckung:
Das bisher unbekannte Potenzial
unseres Lebelements



VAK Verlags GmbH
Kirchzarten bei Freiburg

Inhalt

Vorwort.	9
Einführung: Verzeichnis der Fabelwesen im Wasser	18
Teil I: Wasser gibt uns Rätsel auf	
1. Wir sind umgeben von Geheimnissen	25
2. Das Sozialverhalten von H ₂ O	33
3. Das Rätsel des Grenzflächenwassers	45
Teil II: Das verborgene Leben des Wassers	
4. Ein vierter Aggregatzustand von Wasser?	67
5. Batterien aus Wasser	93
6. Wie die Wasserbatterie geladen wird	105
7. Wasser – der Motor der Natur	121
Teil III: Was das Wasser bewegt, das bewegt die Welt	
8. Wasser macht alles anziehend.	143
9. Browns Tanz – durch Energie angetriebene Bewegungen	157
10. Wärme und Temperatur: Neues Licht in die thermische Dunkelheit	177
11. Osmose und Diffusion passieren nicht einfach so	195
Teil IV: Erscheinungsformen des Wassers in der Natur	
12. Die Kraft protonierten Wassers	213
13. Tröpfchen und Blasen – Geschwister in der Wasserfamilie	231
14. Die Geburt einer Blase – eine Reise bis zur Reife	243
15. Wolken aus dem Kaffee – die bemerkenswerte Natur der Verdampfung	263
16. „Wassertrampoline“ – Schichten an der Wasseroberfläche.	287
17. Man kann sich auch für Eis erwärmen	311
Teil V: Resümee: Wie die Geheimnisse der Erde sich lüften lassen	
18. Die geheimen Regeln der Natur	335
Anhang	
Danksagungen	348
Fachbegriffe	353
Quellenverzeichnis	355
Urheber der Fotos	361
Stichwortverzeichnis	363
Über den Autor.	366

Für Gilbert Ling

*Er hat mich gelehrt, dass Wasser in einer Zelle
nichts anderes ist als Wasser in einem Glas.*

Sein Mut war für mich eine ständige Inspiration.

Vorwort

Mitten in meinem Wohnzimmer saß der Nobelpreisträger. *Er* war sehr zurückhaltend und *ich* ein wenig eingeschüchtert, eine Kombination, die prädestiniert war für peinliche Situationen. Es war, als müsste man Smalltalk mit Einstein führen. Was soll man da bloß sagen?

Sir Andrew Huxley war der Nobelpreisträger unter den Nobelpreisträgern. Ihm waren grundlegende Erkenntnisse in der Zellmembranforschung zu verdanken und zu dem Zeitpunkt, als wir uns trafen, war er ein führender Experte auf dem Gebiet der Muskelkontraktion. Zu seinen zahlreichen Auszeichnungen gehörten unter anderen diese: Präsident der *Royal Society*, Master des *Trinity College* (Cambridge) und Träger des Verdienstordens der Königin von England. Er gehörte zur angesehenen Familie der Huxleys, von der auch der legendäre Biologe Thomas Henry Huxley (sein Spitzname war „Darwins Bulldogge“) abstammte und der visionäre Schriftsteller Aldous Huxley. Hier in meinem Wohnzimmer saß also dieser überragende wissenschaftliche Aristokrat.

In dieser angespannten Situation wagte niemand, das eigentliche Problem anzuschneiden: Experimentelle Ergebnisse aus meinem Labor wiesen darauf hin, dass die Theorie meines Gastes möglicherweise falsch sein könnte. Der Grund seines Besuchs war seine Absicht, diese Belege zu überprüfen; das hatte er vor unserem Gespräch schon in den Räumlichkeiten des Labors getan. Doch in meinem Wohnzimmer vermieden wir es beide, auf diese haarige Angelegenheit zu sprechen zu kommen, und wir konzentrierten uns stattdessen auf ein so spannendes Thema wie das Wetter. Sogar nach einigen Gläsern Sherry zur allgemeinen Auflockerung blieb es mühsam, in Bezug auf das heikle Thema Klartext zu reden. Schließlich war Huxley ein wissenschaftliches Orakel – praktisch eine Gottheit.

Überragende Persönlichkeiten wie Huxley erscheinen ehrfurchtgebietend und wir neigen dazu, zu vergessen, dass auch die berühmtesten Wissenschaftler Menschen sind. Sie essen dieselbe Nahrung wie wir, haben dieselben Vorlieben und leiden unter denselben menschlichen Schwächen. Wenngleich wir also ihre Erkenntnisse bewundern und ihr Werk respektieren mögen, müssen wir uns nicht verpflichtet fühlen, dieses Werk als fehlerlos oder absolut anzusehen; wissenschaftliche Aussagen sind nicht heilig.

Es wäre ein großer Irrtum, jegliche wissenschaftliche Theorie als unumstößlich anzusehen. Jedes Erklärungsmodell, das wir entwickeln, muss auf einem soliden Fundament aus Ergebnissen von Experimenten stehen – und nicht auf doktrinären Thesen. Sonst könnte das Endergebnis eher einer von M. C. Eschers Zeichnungen von hintergründiger Unmöglichkeit gleichen und das sollte tunlichst vermieden werden. Auch bereits

lange gültige Modelle bleiben angreifbar, wenn es ihnen nicht gelingt, einfache und zufriedenstellende Erklärungen zu liefern. Die Geschichte von Galileo Galilei lehrt uns, dass dann, wenn etablierte Grundfesten der Wissenschaft auf die Unterstützung durch ausgefeilte theoretische Konstrukte – im Fall der Planetenbewegungen etwa auf „Epizyklen“ – angewiesen sind, um mit den empirischen Beobachtungen zur Deckung gebracht zu werden, dass es dann höchste Zeit ist, nach *einfacheren* Erklärungen zu suchen.

Dieses Buch versucht, verlässliche Grundlagen zu schaffen für eine neue Wissenschaft vom Wasser. Ihr Ursprung liegt in Entdeckungen aus jüngster Zeit. Auf diesen neuen Grundlagen werden wir ein verständliches Bezugssystem mit beachtlicher Voraussagekraft aufbauen: Alltägliche Beobachtungen werden damit – ohne die Notwendigkeit komplizierter Gedankensprünge und -verbiegungen – vollständig erklärbar. Und es gibt noch ein weiteres Plus: Die Entwicklung dieses neuen Konzepts wird vier neue wissenschaftliche Prinzipien hervorbringen – Prinzipien, die sich über das Wasser hinausgehend überall in der Natur anwenden lassen.

Meine Herangehensweise ist also unkonventionell. Sie baut nicht auf die „vorherrschende Doktrin“ und sie akzeptiert nicht automatisch alle aktuellen grundlegenden Prinzipien als von Haus aus gültig. Stattdessen kehrt sie zur ursprünglichen Methode zurück, Wissenschaft zu betreiben: sich auf die allgemeine Beobachtung zu verlassen, einfache Logik anzuwenden und die elementaren Prinzipien aus Chemie und Physik zum Verständnis zu nutzen. Ein Beispiel: Wenn Sie den Dampf beobachten, der aus Ihrem heißen Kaffee aufsteigt, können Sie die Dampfwolken tatsächlich *sehen*. Was sagt Ihnen dies über die Natur des Verdampfungsprozesses? Reichen die vorherrschenden Prinzipien aus, um das zu erklären, was Sie sehen? Oder müssen wir unseren Blick woanders hin ausrichten? (Sie werden erfahren, was ich damit meine, wenn Sie Kapitel 15 lesen.)

Diese altmodische Herangehensweise könnte leicht als respektlos angesehen werden, weil sie den „Göttern“ der Wissenschaft zu wenig huldigt. Andererseits glaube ich, dass dies der beste Weg ist, zu einem intuitiven Verständnis der Natur zu gelangen – einem Verständnis, das selbst Laien nachvollziehen können.

Ich habe mein Leben sicherlich nicht als Revolutionär begonnen. Tatsächlich war ich sehr konventionell. Als Student des Elektroingenieurwesens kam ich ordentlich angezogen und mit gebührendem Respekt zum Unterricht. Bei Partys trug ich Krawatte und Jackett, wie meine Kommilitonen auch. Wir sahen so revolutionär aus wie ein Handarbeitskränzchen älterer Damen.

Erst während meines Studiums an der *University of Pennsylvania* keimte die „Saat der Revolution“ in mir. Mein Studienfach zu dieser Zeit war das

Bioingenieurwesen. Ich fand damals den „Ingenieur-Anteil“ sehr bieder, während die biologische Komponente einen willkommenen Arbeitsbereich mit Zukunftspotenzial darstellte. Biologie war angesagt, hier passierte etwas; sie war voller Dynamik und Zukunftsversprechen. Dennoch machte keiner meiner Biologieprofessoren auch nur die geringste Andeutung davon, dass Studenten wie wir eines Tages einen wissenschaftlichen Durchbruch erzielen könnten. Unsere Aufgabe war lediglich, ein bereits existierendes wissenschaftliches Skelett mit Fleisch aufzufüllen.

Ich dachte, das schrittweise erfolgende Hinzufügen von Fleischstücken sei der Weg der Wissenschaft – bis ein Kollege die roten Warnlichter in mir aufleuchten ließ: Tatsuo Iwazumi kam an die *University of Pennsylvania*, als ich kurz vor meiner Promotion stand. Ich hatte eine einfache Computersimulation der Herzkontraktion gemäß dem Modell von Huxley entwickelt und Iwazumi sollte in meine Fußstapfen treten. Sein Kommentar: „Unmöglich!“ Das respektvolle Verhalten, das die meisten mir bekannten Japaner an den Tag legten, gehörte nicht zu seinen hervorstechenden Eigenschaften. Iwazumi machte mir unmissverständlich klar, dass meine Simulation wertlos sei: Sie beruhe auf der gängigen Theorie der Muskelkontraktion – doch dieser theoretisch konzipierte Mechanismus könne gar nicht funktionieren. „Diese Funktionsweise ist in Wirklichkeit instabil“, fuhr er fort. „Wenn ein Muskel wirklich so arbeiten würde, würde er bei seiner ersten Kontraktion in Stücke gerissen.“

Wow! Ein Frontalangriff auf Huxleys Muskeltheorie? Das konnte doch nicht sein.

Obwohl Iwazumi später in jeder Hinsicht brillierte und mit makellosen Qualifikationen der Universität von Tokio und des MIT glänzen konnte, schien er dem legendären Sir Andrew Huxley in keiner Weise gewachsen zu sein. Wie könnte ein solch anerkannter Nobelpreisträger sich dermaßen geirrt haben?! Wir glaubten, dass die wissenschaftlichen Zusammenhänge, die von solchen Koryphäen aufgezeigt worden waren, Grundwahrheiten und Lehrbuchwissen darstellten. Und dann kam so ein unverschämter, junger japanischer Ingenieurstudent daher und wollte mich glauben machen, dass dieser spezielle Sachverhalt nicht nur falsch, sondern sogar unmöglich war?!

Widerwillig musste ich eingestehen, dass Iwazumis Argumentation überzeugend war – klar, logisch und einfach. Meines Wissens wurde sie bis zum heutigen Tag nicht angefochten. Wer diese Argumentation zum ersten Mal hört, erkennt sehr schnell die Logik dahinter und ihre Einfachheit lässt alle kritischen Stimmen verstummen.

Für mich markierte dies einen Wendepunkt. Es hat mich gelehrt, dass stimmige, logische Argumente auch bereits lange bestehende Glaubenssysteme übertrumpfen können, selbst wenn letztere von ganzen Armeen unterstützt werden. Ist eine Theorie erst einmal widerlegt, bedeutet dies

ihr Aus. Sich auf ewig daran zu klammern, ist gleichbedeutend mit religiöser Anhängerschaft, aber nicht mit Wissenschaft. Die Begegnung mit Iwazumi hat mich auch gelehrt, dass unabhängiges Denken mehr ist als eine bloße Floskel; es ist ein notwendiger Bestandteil der Suche nach Wahrheit. Und es führte dann tatsächlich zu meinem Disput mit Sir Andrew Huxley über die Muskelkontraktion (der nie beigelegt wurde).

Konventionelle Denkweisen anzufechten ist kein Zuckerschlecken, das kann ich Ihnen versichern. Vielleicht glauben Sie, dass das wissenschaftliche Establishment frische Ideen, die neues Licht auf alte Denkweisen werfen, begeistert willkommen heiße, doch das ist meist nicht der Fall. Neue Denkansätze stellen bisherige Weisheiten infrage. Die im jeweiligen Fachgebiet führenden Wissenschaftler neigen dazu, defensiv zu reagieren, denn ein solches „Infragestellen“ bedroht ihren Status. Als Konsequenz daraus begibt sich derjenige, der die vorherrschenden Auffassungen anzweifelt, auf einen steinigen Weg – voller gefährlicher Wendungen und erheblicher Hürden.

Und dennoch ist es mir irgendwie gelungen, diese Anfangszeit zu überstehen. Indem ich vorsichtig ein Gleichgewicht zwischen „Respektlosigkeit“ einerseits und solider konventioneller Wissenschaft, ja, sogar taktvoller Ehrerbietung wahrte, konnte ich zum größten Teil unbeschadet weitermachen. Was wir infrage stellten, war offenkundig, doch wir waren die Ersten, die neue Technologien einsetzten, die so beeindruckend waren, dass meine Studenten weltweit gute Berufsaussichten hatten. Dass ich mir auf diese Weise Respekt verschaffte, bewahrte mich vor einem Schicksal, das zum wissenschaftlichen Aus führt, wie es den meisten „Herausforderern“ beschieden ist.

In der Mitte meiner Karriere begann sich mein Interesse auszuweiten und ich befasste mich mit *verschiedenen* wissenschaftlichen Gebieten. Während ich das tat, stieß ich überall auf Ungereimtheiten. Es wimmelte nur so von Widersprüchen. Auch in anderen Bereichen wurde vorherrschendes Wissen infrage gestellt und die Zweifel schienen ebenso grundlegend zu sein wie diejenigen im Bereich der Muskelkontraktion.

Ein Beispiel solchen Infragestellens fand ich auch auf dem Gebiet der Wasserforschung – dem Thema dieses Buches. Der bekannteste Zweifler war zu dieser Zeit Gilbert Ling. Ling hatte die Glasmikroelektrode erfunden, die die zelluläre Elektrophysiologie revolutionierte. Eigentlich hätte er für diese Leistung den Nobelpreis verdient, doch Ling geriet in Schwierigkeiten, weil seine Ergebnisse darauf hindeuteten, dass die Wassermoleküle in einer Zelle sich *ordnen*. Die Annahme einer solchen Ordnung war jedoch für die meisten Biologen und Physiker eine Irrlehre und damit tabu. Der wenig zurückhaltende Ling indes verbreitete seine Schlussfolgerungen, insbesondere bei denen, die vielleicht anderer Meinung waren.

Aus diesem Grund und auch wegen anderer Ketzereien fiel Ling schließlich in Ungnade. Wissenschaftler, die eher traditionelle Ansichten hatten, beschimpften ihn als Provokateur. Ich war anderer Meinung. Ich fand seine Ansichten in Bezug auf Zellwasser genauso stimmig wie Iwazumis Auffassungen über die Muskelkontraktion. Es blieben noch einige Fragen offen, doch insgesamt erschien mir seine Hypothese evidenzbasiert, logisch und potenziell von weitreichender Gültigkeit. Als ich Ling als Gastredner für eine Vorlesung an der Universität einlud, mahnte mich ein älterer Kollege ganz väterlich: Ich solle mir das doch besser noch einmal überlegen. Die Unterstützung einer solch umstrittenen Persönlichkeit könne auch meinen eigenen Ruf in irreparabler Weise schädigen. Ich nahm das Risiko auf mich – doch die Konsequenzen seiner Warnung klangen nach.

Die Geschichte mit Ling öffnete mir noch mehr die Augen. Ich begann zu verstehen, warum den Kritikern das Schicksal zuteil wurde, das sie erlitten: Sie bereiteten denen, die der orthodoxen Meinung anhängen, stets Unannehmlichkeiten. Und das brachte die unbequemen Zweifler in Schwierigkeiten. Mir wurde auch klar, dass es derer viele gab – mehr, als man normalerweise erwarten würde. Nicht nur auf dem Gebiet des Wassers und der Muskelkontraktion wurden Theorien angefochten; Stimmen des Widerspruchs wurden auch in anderen Bereichen laut, von der Signalübertragung in Nerven bis hin zur kosmischen Gravitation. Je mehr ich mich umsah, umso mehr konnte ich entdecken. Ich meine damit nicht die exzentrischen Behauptungen von ein paar Verrückten, die nach Aufmerksamkeit gierten. Ich beziehe mich auf die wohlüberlegten Widersprüche, die von klugen, professionell arbeitenden Wissenschaftlern kamen.

Auf ernsthafte Widersprüche trifft man also überall in der Wissenschaft. Diese kritischen Stimmen sind Ihnen vielleicht nicht bewusst – so ist es mir bis vor Kurzem ebenfalls ergangen –, denn sie verhalten oft außerhalb des wahrnehmbaren Bereichs. Das Establishment sieht wenig Nutzen darin, den Meinungsstreit öffentlich auszutragen, und so finden die Einwände keine Verbreitung. Selbst junge Wissenschaftler, die auf ihrem jeweiligen Feld die Arbeit aufnehmen, wissen möglicherweise nicht, dass dessen spezielles „Glaubensgerüst“ ins Wanken geraten ist.

Solche kritischen Einwände folgen einem vorhersehbaren Muster. Aufgerüttelt von der wachsenden Komplexität einer Theorie und ihrem Widerspruch gegenüber den Beobachtungen erhebt sich ein Wissenschaftler und berichtet von einem Problem; oft wird gleichzeitig mit dem Problem eine Ersatztheorie präsentiert. Normalerweise reagiert das Establishment darauf mit Ignoranz und schon ist das Schicksal vieler Einwände besiegelt, denn sie geraten in das Dunkel der Vergessenheit. Die wenigen Einwände, denen es gelingt, weiterhin Aufmerksamkeit auf

sich zu ziehen, werden oft aggressiv angegangen: Man begegnet dem Herausforderer mit Hohn und Verachtung und bescheinigt ihm Wahnvorstellungen.

Die Konsequenzen sind absehbar: Die Wissenschaft behält den *Status quo* bei. Es passiert nicht viel. Der Krebs ist nicht geheilt. Die Denkbauwerke der Wissenschaft wachsen weiter auf verwitterten und häufig bröckelnden Fundamenten, was zu umständlichen Modellen führt und zu noch dickeren Lehrbüchern, die mit Myriaden oft unbedeutender Details gefüllt sind. Einige Bereiche sind so komplex geworden, dass sie praktisch gar nicht mehr verstanden werden. Oft lässt sich nicht einmal mehr ein Zusammenhang herstellen. Viele Wissenschaftler behaupten, genau so müsse moderne Wissenschaft aber sein – kompliziert, unnahbar, getrennt von der menschlichen Erfahrung. Die Einfachheit von Ursache und Wirkung sei ein Relikt aus vergangenen Zeiten, das man zugunsten der komplexen, statistischen Korrelationen der Moderne über Bord geworfen hat.

Mir wurde noch eine ganze Menge mehr klar in Bezug auf die stillschweigende Billigung wissenschaftlicher Komplexität, als ich Richard Feynmans Buch über Quantenelektrodynamik las, treffend mit *QED* betitelt. Viele betrachten Feynman, eine legendäre Figur im Bereich der Physik, als den Einstein des späten 20. Jahrhunderts. In der Einleitung zu Feynmans Buch (in der Ausgabe von 2006) stellt ein berühmter Physiker fest, dass man den Inhalt dieses Buches wahrscheinlich nicht verstehen werde, doch man solle das Buch auf alle Fälle lesen, weil es wichtig sei. Ich fand diese Betrachtungsweise gelinde gesagt entmutigend. Dennoch war es nicht annähernd so beunruhigend wie all das, was Feynman selbst schreibt: „Es ist meine Aufgabe, Sie davon zu überzeugen, dass Sie das Buch jetzt *nicht* weglegen, weil Sie den Inhalt nicht verstehen. Sehen Sie, meinen Studenten erschließt es sich auch nicht. Und das kommt daher, weil ich es selbst nicht verstehe. Niemand kann das verstehen ...“

Das Buch, das Sie jetzt gerade in den Händen halten, verfolgt einen Ansatz, der der Vorstellung widerspricht, dass moderne Wissenschaft jenseits menschlichen Begreifens liegen müsse. Wir streben nach Einfachheit. Wenn die gegenwärtig anerkannten, orthodoxen Prinzipien der Wissenschaft einfache alltägliche Beobachtungen nicht erklären können, bin ich bereit, zu verkünden, dass der Kaiser keine Kleider trägt: Denn diese Prinzipien sind wahrscheinlich unzureichend. Obwohl auch sie von bedeutenden wissenschaftlichen Autoritäten postuliert wurden, können wir nicht die Möglichkeit außer Acht lassen, dass *neue* Prinzipien einfach besser funktionieren.

Unser spezielles Ziel ist es, das *Wasser* zu verstehen. Das Wasser *scheint* kompliziert zu sein. Das Verständnis alltäglicher Phänomene erfordert oft komplexe und wenig intuitive Überlegungen – und trotzdem gelingt es uns nicht, zu einem zufriedenstellenden Verständnis zu gelangen. Ein

möglicher Grund dieser nicht zufriedenstellenden Komplexität ist die gegenwärtig bestehende Untermauerung der Grundlagen: eine Ad-hoc-Sammlung bewährter Prinzipien aus verschiedenen Forschungsbereichen. Vielleicht könnte ein passenderes Fundament – das sich aus dem direkten Studium des Wassers ableitet – ein einfacheres Verständnis liefern. In diese Richtung wollen wir gehen.

Um dieses Buch zu verstehen, müssen Sie kein Wissenschaftler sein; das Buch wurde für jeden geschrieben, der die einfachsten wissenschaftlichen Grundlagen kennt. Wenn Sie also wissen, dass positiv geladene und negativ geladene Teilchen einander anziehen, und auch schon einmal vom Periodensystem der Elemente gehört haben, dann werden Sie die Botschaft verstehen. Wer jedoch all dem, was gegenwärtige Dogmen ernsthaft infrage stellt, nichts abgewinnen kann, wird meinen Ansatz geschmacklos finden, denn der Faden des Widerspruchs zieht sich durch das ganze Buch. Es ist unkonventionell – eine Story voller heißer Szenen und unerwarteter Wendungen, die sich aber alle in etwas auflösen, von dem ich hoffe, dass es Sie zufriedenstellt und Ihnen vielleicht sogar Spaß macht.

Ich habe formale Quellenangaben auf die Fälle beschränkt, bei denen Zitate absolut notwendig erschienen. Ist das Thema allgemein bekannt oder leicht zugänglich, wurde darauf verzichtet. Das wichtigste Ziel war, den Text in Bezug auf die Lesbarkeit möglichst zu glätten.

Zum Schluss möchte ich eingestehen, dass ich mir nicht einbilde, dass all die hier vorgestellten Ideen sich als Grundwahrheiten erweisen werden. Einige sind spekulativ. Sicher war es mein Ziel, wissenschaftliche *Fakten* anstatt wissenschaftlicher *Fiktion* zu produzieren. Wie Sie jedoch wissen, kann schon eine einzige unschöne Tatsache die schönste Theorie demolieren. Das Material dieses Buches stellt meinen besten und ernsthaftesten Versuch dar, verfügbare Belege in einem zusammenhängenden, erklärenden Bezugssystem umfassend darzustellen. Dieses Bezugssystem ist unkonventionell und ich weiß bereits im Voraus, dass manche Wissenschaftler nicht mit allen Aspekten einverstanden sein werden. Dennoch ist es ein ernst gemeinter Versuch, Verständnis dort zu schaffen, wo es noch wenig gibt.

Wenn wir jetzt also in dieses trübe „Gewässer“ springen, dann lassen Sie uns sehen, ob wir ein wenig Licht ins Dunkel bringen können.

Gerald H. Pollack
Seattle, im September 2012

*Entdecken heißt sehen, was jeder sieht,
und denken, was noch niemand gedacht hat.*

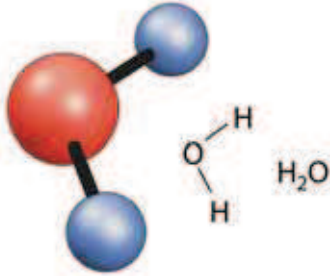
Albert Szent-Györgyi (1893–1986),
Nobelpreisträger

↻ Einführung: ↻

Verzeichnis der Fabelwesen im Wasser

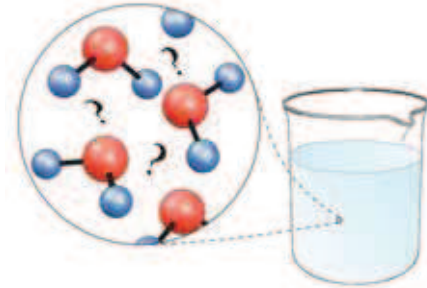
Ein kleiner Führer zu den seltsamen Wesen,
die sich im geheimnisvollen Reich des Wassers verbergen

Wassermolekül



Das bekannte Wassermolekül, bestehend aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom

Restwasser oder Bulkwasser

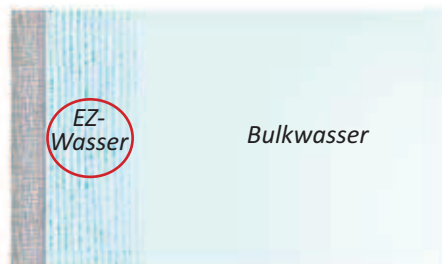


Die normale Ansammlung von Wassermolekülen, deren Anordnung immer noch diskutiert wird

[Der auch im Deutschen geläufige Begriff des Bulkwassers wird in diesem Buch aus dem Englischen übernommen, damit man bei „Restwasser“ nicht an irgendwelche Wasserreste denkt. Nähere Erklärung folgt weiter unten. Anmerkung des Verlags]

Ausschlusszone

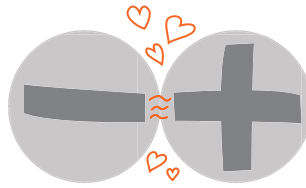
Auch: EZ (= die in diesem Buch benutzte Abkürzung für *Exclusion Zone*)



Hydrophiles (wörtlich: wasserliebendes), das heißt, stark mit dem Wasser wechselwirkendes Material

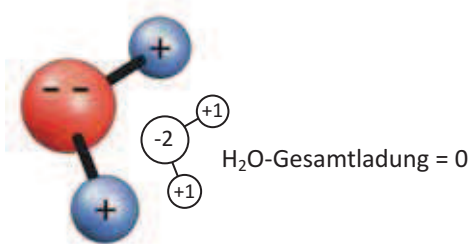
Die Ausschlusszone ist der unerwartet große Bereich von Wasser, der sich an der Grenzfläche vieler Materialien bildet, die mit Wasser in Berührung kommen oder sich im Wasser befinden. Sie verdankt ihren Namen der Tatsache, dass sie praktisch alles ausschließt. Die EZ ist stark geladen und ihr Charakter unterscheidet sich von dem des Bulkwassers. Manchmal wird sie als vierter Aggregatzustand von Wasser bezeichnet.

Elektron und Proton



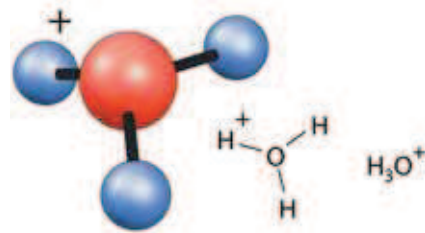
Elektronen und Protonen sind die Grundbausteine von Ladung. Sie ziehen einander an, denn das eine Teilchen ist negativ und das andere positiv geladen. Elektronen und Protonen spielen eine zentrale Rolle im Verhalten von Wasser – mehr, als Sie sich vorstellen können.

Ladung des Wassermoleküls



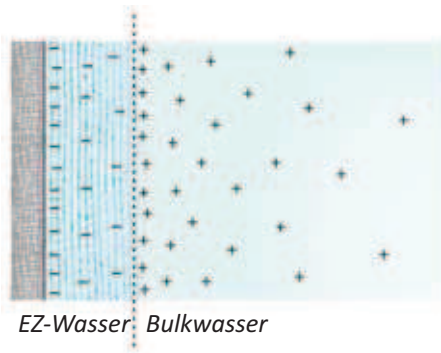
Das Wassermolekül ist neutral. Das Sauerstoffatom ist zweifach negativ geladen, jedes der beiden Wasserstoffatome hat eine einfache positive Ladung.

Hydroniumion



Freie Protonen binden an Wassermoleküle und bilden dadurch Hydroniumionen. Stellen Sie sich ein positiv geladenes Wassermolekül vor – genau das ist ein Hydroniumion. Geladene Teilchen wie diese Hydroniumionen sind hoch beweglich und können verheerende Schäden anrichten.

Grenzflächenbatterie



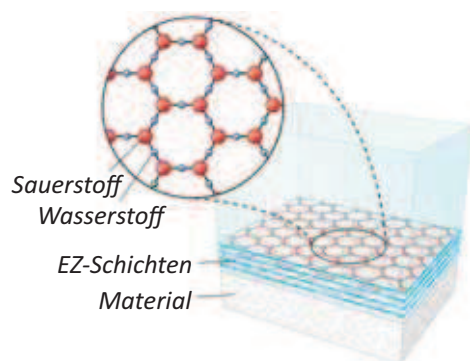
Diese Batterie umfasst die Ausschlusszone und den Bulkwasserbereich daneben. Diese beiden Zonen sind unterschiedlich geladen und die Trennung der Ladungen wird wie bei einer normalen Batterie aufrechterhalten.

Strahlungsenergie



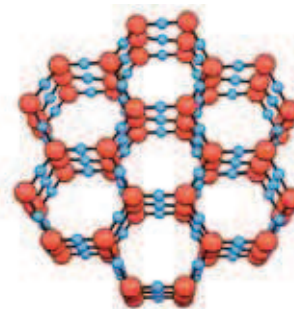
Strahlungsenergie lädt die Batterie auf. Die Energie kommt von der Sonne und anderen Strahlungsquellen. Das Wasser absorbiert diese Energien und nutzt sie zur Aufladung der Batterie.

Honigwabenschicht



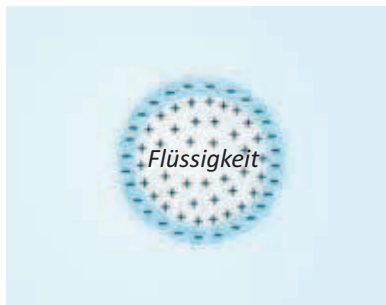
Die Honigwabenschicht ist die Struktureinheit der Ausschlusszone. Die Schichten (oder Ebenen) liegen parallel zum formgebenden Material, das die Ausschlusszone bildet.

Eis



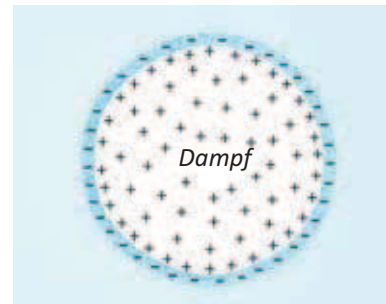
Die atomare Struktur von Eis ähnelt stark der atomaren Struktur der Ausschlusszone. Die Ähnlichkeit ist nicht zufällig: Jede der beiden Strukturen verwandelt sich leicht in die andere.

Tröpfchen



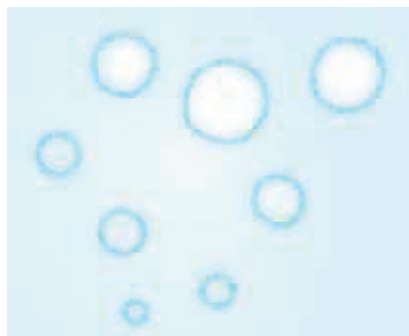
Das Wassertröpfchen besteht aus einer EZ-Hülle, die das Bulkwasser umgibt. Beide Bestandteile sind unterschiedlich geladen.

Blase



Die Blase ist wie das Tröpfchen strukturiert, außer dass ihr Inhalt gasförmig ist. Dieser besteht normalerweise aus Wasserdampf.

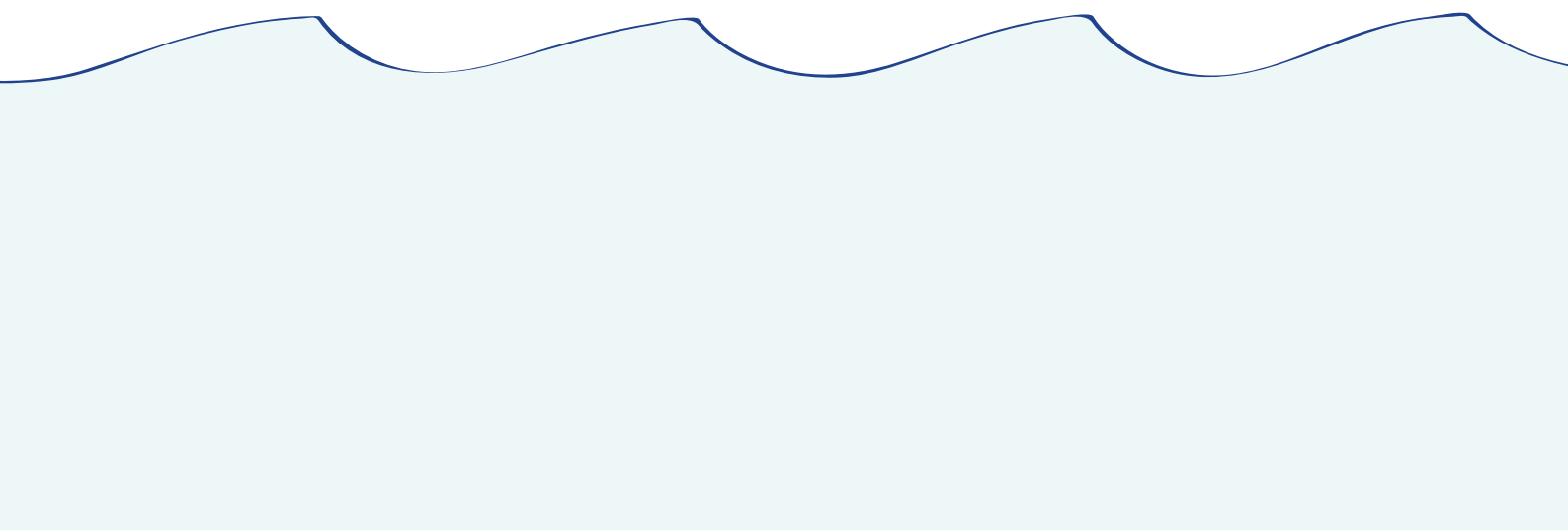
Vesikel



Da Tröpfchen und Blasen ähnlich aufgebaut sind, haben wir eine allgemeine Bezeichnung eingeführt: *Vesikel*. Ein Vesikel kann ein Tröpfchen oder eine Blase sein, je nach der Phase, dem Aggregatzustand, in dem sich das Wasser im Innenraum gerade befindet. Wenn ein Tröpfchen genug Energie absorbiert, kann es zu einer Blase werden.

Teil I

Wasser gibt uns Rätsel auf



1 Wir sind umgeben von Geheimnissen

Mit einem Becherglas in der Hand kamen zwei Studenten im Gang auf mich zugelaufen, um mir etwas Unerwartetes zu zeigen. Unglücklicherweise verschwand ihre Entdeckung, bevor ich sie mir anschauen konnte. Aber es war nicht nur ein einmaliger Glücksfall. Am nächsten Tag zeigte sich das Phänomen erneut und es war schnell klar, warum die Studenten mit solcher Aufregung reagiert hatten: Sie waren Zeuge einer durch das Wasser verursachten Erscheinung geworden, die nach einer Erklärung verlangte.

Wasser bedeckt einen großen Teil der Erde. Es durchzieht den Himmel. Es füllt Ihre Zellen – in größerem Ausmaß, als Ihnen vielleicht bewusst ist: Es macht zwei Drittel Ihres Volumens aus; allerdings ist das Wassermolekül so klein, dass – wenn Sie jedes einzelne Molekül in Ihrem Körper zählen wollten – 99 % davon Wassermoleküle wären. So viele Moleküle werden gebraucht, um zwei Drittel Ihres Volumens auszufüllen. Ihre Füße schleppen also sozusagen einen riesigen Sack von Wassermolekülen mit sich herum.

Was wissen wir über Wassermoleküle? Wissenschaftler erforschen sie, aber sie interessieren sich kaum für die großen Ansammlungen von Wassermolekülen, wie sie in einem Becherglas zu finden sind. Die meisten Wissenschaftler konzentrieren sich eher auf das *einzelne* Molekül und seine unmittelbaren Nachbarn, in der Hoffnung, das, was sie dort finden, auch auf die größer dimensionierten Phänomene übertragen zu können, die wir *sehen*. Viele also sind auf der Suche danach, das beobachtbare Verhalten von Wasser zu verstehen, das heißt, wie seine Moleküle sich „sozial“ verhalten. – Verstehen wir das Sozialverhalten des Wassers wirklich?

Da Wasser überall ist, könnten Sie leicht zu dem Schluss kommen, dass wir es komplett begriffen haben. Ich fordere Sie hier auf, diese gängigen Annahmen auf den Prüfstand zu stellen. Nachfolgend führe ich Ihnen eine Reihe alltäglicher Beobachtungen vor Augen und danach eine Handvoll einfacher Laborexperimente. Prüfen Sie mal, ob Sie sie erklären können. Wenn ja, habe ich verloren. Dann können Sie sofort damit aufhören, dieses Buch zu lesen. Wenn Ihnen die Erklärungen aber weiterhin fehlen, auch nachdem Sie vielleicht in einer Menge verfügbarer Quellen nachgeschaut haben, dann bitte ich Sie, die Annahme zu überprüfen, dass wir alles wüssten, was es über Wasser zu wissen gibt. Ich glaube *nicht*, dass wir alles wissen. Lassen Sie uns sehen, wie es *Ihnen* damit ergeht.



Wie ein Kuriositätenkabinett:
So rätselhaft erscheinen manche
Phänomene im Zusammenhang
mit Wasser ...



Abb. 1.1: Was hält das Wasser
davon ab, aus dem Jell-O-Würfel
(= Fruchtgel) herauszulaufen?

Alltägliche Geheimnisse

Hier beschreibe ich fünfzehn alltägliche Beobachtungen. Können Sie sie erklären?

- *Nasser Sand und trockener Sand:* Wenn Sie auf *trockenem* Sand gehen, sinken Sie tief ein. Doch auf *nassem* Sand – wenn Sie zum Beispiel am Meer den Strand entlanggehen – passiert das nicht. Nasser Sand ist so fest, dass Sie ihn zum Bauen trutziger Sandburgen oder großer Sandskulpturen verwenden können. Das Wasser scheint wie ein Klebstoff zu wirken. Aber wie genau klebt Wasser die Sandpartikel aneinander? (Die Antwort finden Sie in Kapitel 8.)

- *Ozeanwellen:* Normalerweise lösen sich Wellen nach einer verhältnismäßig kurzen Strecke auf. Doch Tsunamiwellen können die Erde mehrfach umrunden, bevor sie endlich auslaufen. Wieso bleiben sie über diese immens großen Entfernungen erhalten? (Das lesen Sie in Kapitel 16.)

- *Desserts aus Gelatine:* Nachspeisen aus Gelatine bestehen zum größten Teil aus Wasser. Bei so großem Wasseranteil könnte man erwarten, dass eine Menge davon herausläuft. (Abb. 1.1) Doch das passiert nicht. Sogar bei Gelen, die zu 99,95 % aus Wasser bestehen, sehen wir keine Tropfen.¹ Warum läuft all dieses Wasser nicht einfach heraus? (Lesen Sie Kapitel 4 und 11.)

- *Windeln:* Ähnlich wie ein Gel können Windeln mehr als das Fünfzigfache ihres Gewichts an Urin aufnehmen und das Achthundertfache ihres Gewichts an reinem Wasser. Wie können sie so viel Wasser festhalten? (Lesen Sie dazu Kapitel 11.)

- *Eisglätte:* Feste Stoffe gleiten gewöhnlich nicht leicht aneinander vorbei. Denken Sie an Ihre Schuhe, mit denen Sie eine ansteigende Straße hinaufgehen: Die Reibung verhindert, dass Sie ausrutschen. Doch wenn der Hügel vereist ist, müssen Sie sehr vorsichtig sein, damit Sie nicht auf die Nase fallen. Warum verhält sich Eis so grundlegend anders als die meisten festen Stoffe? (Kapitel 12 erklärt es Ihnen.)

● *Schwellungen*: Ihre Freundin bricht sich bei einem Tennismatch den Knöchel. Innerhalb von Minuten schwillt dieser auf das Doppelte seiner Größe an. Warum fließt Wasser so schnell in solche Verletzungen? (Kapitel 11 hat die Antwort.)

● *Gefrierendes warmes Wasser*: Ein besonders kluger Schüler beobachtete einmal etwas Seltsames in seinem Kocher: Er konnte aus seinem Eiscremepulver viel schneller seine geliebte Leckerei produzieren, wenn er warmes Wasser anstatt kaltem hinzufügte. Diese paradoxe Beobachtung ist berühmt geworden. Wie kommt es, dass warmes Wasser schneller gefriert als kaltes Wasser? (Schauen Sie in Kapitel 17 nach.)

● *Steigendes Wasser*: Blätter von Pflanzen und Bäumen sind durstig. Um das Wasser zu ersetzen, das durch Verdunstung verloren geht, fließt das Wasser von den Wurzeln in engen Wasserröhren aufwärts. Die gängige Erklärung besagt, dass die oberen Enden der Röhren eine aufwärtsziehende Kraft auf das Wasser ausübten. In 100 m hohen Redwood-Bäumen ist das aber problematisch, denn: Das Gewicht des Wassers, das sich in jeder der Röhren ansammelt, würde ausreichen, um die Röhre zu brechen. Wenn sie erst einmal abgebrochen ist, kann eine Röhre kein Wasser mehr aus den Wurzeln ziehen. Wie wendet die Natur dieses Debakel ab? (Schauen Sie bei Kapitel 15.)

● *Aufbrechender Beton*: Gehsteige aus Beton können durch Baumwurzeln, die darunter wachsen, aufgebrochen werden. Diese Wurzeln bestehen hauptsächlich aus Wasser. Wie ist es möglich, dass Wasser enthaltende Wurzeln so viel Druck ausüben können, dass Betonplatten brechen? (Gehen Sie Kapitel 12 durch.)

● *Tröpfchen auf Oberflächen*: Wassertröpfchen reihen sich auf manchen Oberflächen *perlenartig* auf und auf anderen *verteilen* sie sich. Der Grad der Verteilung wird sogar dazu benutzt, verschiedene Oberflächen zu klassifizieren. Doch damit, dass eine Einteilung festgelegt wurde, ist noch nicht erklärt, *warum* sich die Tröpfchen verteilen oder *wie weit* sie sich verteilen. Welche Kräfte lassen ein Wassertröpfchen sich auflösen? (Blättern Sie zu Kapitel 14.)

● *Auf Wasser gehen*: Vielleicht haben Sie schon einmal Filme über „Jesus-Christus-Eidechsen“ gesehen, die auf Teichoberflächen laufen. Die Eidechsen flitzen von einem Ende zum anderen. Kommt Ihnen die hohe Oberflächenspannung des Wassers als mögliche Erklärung in den Sinn?

Doch Oberflächenspannung kommt nur aus den oberen Molekülschichten. Diese Spannung wäre viel zu schwach. Was genau im Wasser (oder in der Eidechse) macht diese „biblisch“ anmutende Gangart möglich? (Lesen Sie Kapitel 16.)

● *Einzelne Wolken*: Aus sehr weit ausgedehnten Flächen von Meerwasser steigt Wasserdampf auf. Dieser Dampf müsste sich doch ebenso weit verbreiten, sollte man eigentlich denken. Aber: Es bilden sich bauschige



Abb. 1.2: Was zieht aufsteigenden Wasserdampf an bestimmten Orten zusammen?

weiße Wolken, oft als ganz separate Einheiten, die an einem sonst klaren, blauen Himmel Akzente setzen. (Abb. 1.2) Welche Kraft zieht den diffus aufsteigenden Dampf genau zu diesen speziellen Orten? (Die Kapitel 8 und 15 befassen sich mit dieser Angelegenheit.)

- *Gelenke, die nicht quietschen:* Kniebeugen bringen normalerweise keine Quietschgeräusche hervor. Das kommt daher, weil Wasser zwischen den Knochen (genauer gesagt: zwischen Knorpelschichten, die die Knochen bedecken) einen ausgezeichneten Feuchtigkeitsfilm bildet. Welche Eigenschaft des Wassers bewirkt, dass die Reibung hier so verschwindend gering ist? (Sehen Sie sich Kapitel 12 an.)

- *Schwimmendes Eis:* Die meisten Stoffe ziehen sich zusammen, wenn sie gekühlt werden. Wasser ebenso – zumindest bis 4 Grad Celsius. Unterhalb dieser kritischen Temperatur beginnt Wasser, sich auszudehnen, und das sehr weit, bis es in Eis übergeht. Das ist der Grund dafür, dass Eis schwimmt. Was ist so besonders bei 4 Grad Celsius? Und warum ist Eis um so viel weniger dicht als Wasser? (Kapitel 17 beantwortet diese Fragen.)

- *Die Konsistenz von Joghurt:* Warum hält Joghurt so fest zusammen, wie es das tut? (Das lesen Sie in Kapitel 8.)

Geheimnisse aus dem Labor

Als Nächstes beschreibe ich einige einfache Laborbeobachtungen. Ich beginne mit dem Ergebnis, das unsere beiden Studenten gesehen hatten, die aufgeregt auf mich zuliefen, um mir zu zeigen, was sie gefunden hatten.

Das Geheimnis der wandernden Mikrosphären

Die Studenten hatten ein einfaches Experiment durchgeführt: Sie legten ein Häufchen winziger Kügelchen, die als „Mikrosphären“ bezeichnet werden, in ein Becherglas mit Wasser. Sie schüttelten die Lösung, um eine gute Mischung zu gewährleisten, deckten das Becherglas zu, um die Verdunstung zu reduzieren, und gingen dann nach Hause. Feierabend. Am nächsten Tag kamen sie wieder, um das Ergebnis zu untersuchen.

Denkt man in konventionellen Bahnen, so sollte nicht viel passiert sein, außer dass vielleicht einige Ablagerungen am Boden des Glases zu sehen wären. Die Lösung hätte einheitlich trüb aussehen sollen, so, wie wenn man einige Tröpfchen Milch in Wasser gießt und danach kräftig schüttelt.

Die Lösung sah einheitlich trüb aus – *größtenteils*. Doch in der Nähe der Glasmitte (wenn man von oben nach unten schaut) hatte sich

unerklärlicherweise ein *klarer* Zylinder gebildet, der sich von oben bis unten erstreckte. (Abb. 1.3) Klarheit bedeutet hier, dass der Zylinder keinerlei Mikrosphären enthielt. Eine geheimnisvolle Kraft hatte die Mikrosphären aus diesem inneren Zentrum in Richtung der Außenwand des Glases vertrieben. Wenn Sie den Film *2001: Odyssee im Weltraum* gesehen haben und sich an das Erstaunen der Affenmenschen erinnern, als sie zum ersten Mal den Monolith erblickten, so bekommen Sie einen Eindruck davon, wie uns die Kinnladen herunterfielen. Das war etwas, was wir unbedingt weiter beobachten mussten!

Solange die anfänglichen Bedingungen innerhalb eines genau definierten Fensters lagen, zeigten sich die klaren Zylinder andauernd; wir konnten sie immer und immer wieder erzeugen.² Die Frage war: Was bewirkte die unerwartete Wanderung der Kügelchen weg von der Mitte? (Kapitel 9 liefert die Erklärung.)

Die Brücke aus Wasser

Ein anderes seltsames Phänomen aus dem Labor, die sogenannte „Wasserbrücke“, verbindet das Wasser, das in zwei separaten Bechergläsern steht, quer über eine Lücke zwischen den beiden Bechergläsern hinweg. Zwar ist die Wasserbrücke eine bereits seit Jahrhunderten bekannte Kuriosität, aber Elmar Fuchs und seine Kollegen haben ihr zu einer modernen „Wiedergeburt“ verholfen, die weltweit Aufsehen erregt hat.

Die Demonstration beginnt, indem die beiden Bechergläser beinahe bis zu ihren Rändern mit Wasser gefüllt werden. Dann stellt man sie nebeneinander, ihre oberen Ränder berühren einander. In jedem Becherglas ist eine Elektrode, die ein Spannungsgefälle von circa 10 kV erzeugt. Sofort springt das Wasser an die Oberkante eines der Gläser und bildet eine Brücke zum anderen Glas hinüber. Wenn diese erst einmal gebildet ist, kann man die beiden Bechergläser langsam voneinander wegbewegen. Die Brücke bleibt erhalten; sie wird immer länger und überspannt die Lücke zwischen den beiden Gläsern auch dann noch, wenn die Ränder mehrere Zentimeter voneinander entfernt sind. (Abb. 1.4)

Erstaunlicherweise tropft die Wasserbrücke kaum. Sie zeigt eine fast eisähnliche Starrheit, auch wenn das Experiment bei Zimmertemperatur durchgeführt wird.

Seien Sie vorsichtig und widerstehen Sie der Versuchung, dieses Hochspannungsexperiment zu wiederholen – es sei denn, Sie sind immun gegen Tod durch Stromschlag. Schauen Sie sich lieber ein Video dieses erstaunlichen Phänomens an.^{w1} Die Frage lautet nun: Was erhält diese Brücke aus Wasser aufrecht? (Schauen Sie in Kapitel 17 nach.)

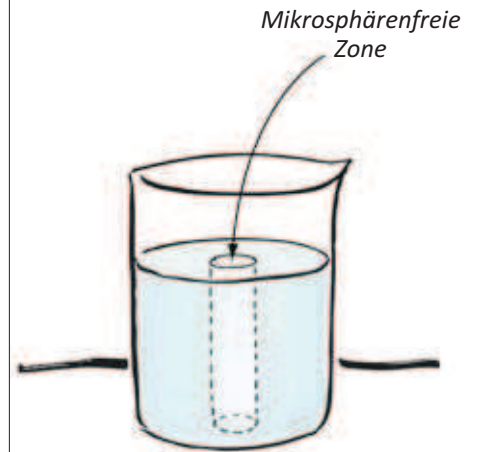


Abb. 1.3: Die zentrale klare Zone in der Mikrosphärenlösung. Warum taucht dieser mikrosphärenfreie Zylinder spontan auf?



Abb. 1.4: Die Wasserbrücke: Eine Brücke aus Wasser überspannt die Lücke zwischen zwei wassergefüllten Bechergläsern. Was erhält die Brücke aufrecht?

Schwimmende Wassertröpfchen

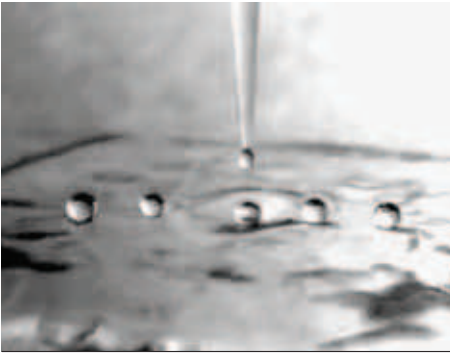


Abb. 1.5: Wassertropfen bleiben auf einer Wasseroberfläche einige Zeit erhalten.

Wasser sollte sich eigentlich sofort mit Wasser vermischen. Aber wenn Sie Wassertröpfchen aus einer engen Röhre tropfen lassen, die direkt über einem Gefäß mit Wasser angebracht ist, werden diese Tröpfchen oft eine Zeit lang auf der Oberfläche des Wassers schwimmen, bevor sie sich auflösen. (Abb. 1.5) Manchmal bleiben die Tröpfchen sekundenlang erhalten. Was noch paradoxer erscheint, ist, dass die Tröpfchen sich nicht einzeln auflösen. Sie tun es in einer *Folge* von Spritzern in das Wasserbad unter ihnen.³ Ihre Auflösung sieht wie ein choreografierter Tanz aus.

Schwimmende Wassertropfen können Sie auch in der Natur sehen, wenn Sie wissen, wo Sie hinschauen müssen. Eine gute Zeit dafür ist kurz nach einem Regenschauer, wenn das Wasser über eine Kante in eine Pfütze tropft oder vom Seitendeck eines Segelbootes in einen See. Sogar Regentropfen schwimmen manchmal, wenn sie direkt auf Wasser fallen. Die offensichtliche Frage: Wenn sich Wasser normalerweise mit Wasser vermischt, was könnte dieses natürliche Verhalten verzögern? (Sehen Sie nach in den Kapiteln 13 und 16.)

Lord Kelvins Entladung

Eine letzte rätselhafte Beobachtung in diesem Zusammenhang zeigt Abbildung 1.6.: Wasser, das aus einer auf dem Kopf stehenden Flasche oder einem ganz normalen Wasserhahn läuft, wird in ein zweigeteiltes Rohr geleitet. Aus jedem der beiden Rohre tropft Wasser durch einen Ring aus Metall und fällt dann in einen Behälter aus Metall. Wie Sie in der Abbildung sehen, sind Ringe und Behälter durch Strom leitende Drähte kreuzweise verbunden. Metallische Kugeln, die mit metallischen Befestigungen an jedem Behälter angebracht sind, weisen mit einem Abstand von mehreren Millimetern zueinander hin. Das ursprünglich von Lord Kelvin erdachte Experiment zeigt ein überraschendes Ergebnis. Ist eine bestimmte Menge an Tröpfchen gefallen, hört man ein knisterndes Geräusch. Dann entlädt sich kurz danach ein Lichtblitz über der Lücke zwischen den Kugeln, begleitet von einem hörbaren Knacken.

Elektrische Entladung findet nur dann statt, wenn sich zwischen den beiden Behältern ein großes Spannungsgefälle aufbaut. Das Spannungsgefälle kann leicht 100 000 Volt erreichen und ist abhängig von der Größe der Lücke zwischen den beiden Kugeln. Doch die massive Ladungstrennung, die benötigt wird, um das Spannungsgefälle zu erzeugen, entsteht *nur durch eine einzige Wasserquelle*.

Solch ein exotisches Gerät zuhause zu bauen, ist möglich^{w2}; doch es ist viel einfacher, sich die Entladung in einem Video anzuschauen. Ein

schönes Beispiel ist der von Professor Walter Levin produzierte Film.^{w3} Er zeigt darin die Entladung einem Raum voller ehrfürchtiger Anfänger am MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Danach gibt er den Studenten die Hausaufgabe, das Phänomen zu erklären. Können Sie erklären, wie eine einzige Wasserquelle diese massive Ladungstrennung erzeugen kann? (Lesen Sie darüber in Kapitel 15.)

Lektionen, die wir aus diesen Geheimnissen lernen können

Die Phänomene, die wir auf den vorangehenden Seiten gesehen haben, lassen sich nicht einfach erklären. Sogar bekannte Wasserwissenschaftler, die ich kenne, können keine zufriedenstellende Antwort geben. Die meisten kommen über oberflächliche Erklärungen nicht hinaus. Irgendetwas scheint in unserem Verständnis zu fehlen, denn sonst könnten wir die Phänomene ohne Weiteres erklären – wir können es aber nicht.

Ich möchte noch einmal betonen, dass wir es nicht mit Wasser auf der molekularen Ebene zu tun haben, sondern mit einer *Menge* von Molekülen. Wir verstehen noch nicht ausreichend, wie sich Wassermoleküle untereinander verhalten – also das „Sozialverhalten“ des Wassers.

Sozialverhalten ist eigentlich das Aktionsfeld von Sozialwissenschaftlern und Medizinerinnen; von ihnen könnten wir lernen. Ein Freund von mir, ein Psychiater, sagte mir einmal, dass wir, um das menschliche Verhalten zu verstehen, uns auf Spinner und Verrückte konzentrieren sollten. Deren Extremverhalten, so der Psychiater, liefere den Schlüssel zu dem dezentren Verhalten beim Rest der Bevölkerung.

Das gleiche Prinzip könnte man hier anwenden: Die vorher beschriebenen Fälle zeigen Situationen, in denen Wasser ein extremes „Sozialverhalten“ an den Tag legt. Als solche liefern sie Hinweise darauf, wie das normale Verhalten von Wassermolekülen zu verstehen ist.

Deshalb lassen Sie uns die Hinweise, die sie geben, doch besser verwerten, anstatt unsere Unfähigkeit, die genannten Erscheinungen zu verstehen, einfach beiseitezuschieben. So machen wir Unwissenheit zu einem Vorteil. Sie werden viele Beispiele eines solchen Prozesses gesehen haben, wenn Sie bei den mittleren Kapiteln dieses Buches angelangt sind.

Das nächste Kapitel liefert nützliches Hintergrundwissen. Es betrachtet, was wir bereits über das Sozialverhalten von Wasser wissen und was nicht, aber es konzentriert sich hauptsächlich auf die überraschenden Gründe dafür, dass wir über die auf der Erde am häufigsten vorkommende Substanz so wenig wissen.

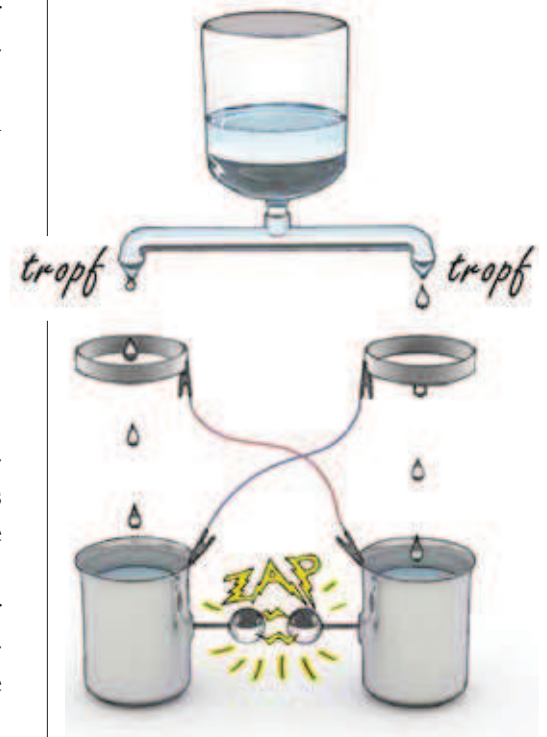


Abb. 1.6: Das Wassertropfexperiment von Kelvin: Steigende Wasserspiegel erzeugen eine Hochspannungsentladung. Warum geschieht das?

