

utb.

Fohrer (Hrsg.) | Bormann | Miegel
Casper | Bronstert | Schumann | Weiler

Hydrologie

basics

utb 4513



Eine Arbeitsgemeinschaft der Verlage

Böhlau Verlag · Wien · Köln · Weimar

Verlag Barbara Budrich · Opladen · Toronto

facultas · Wien

Wilhelm Fink · Paderborn

A. Francke Verlag · Tübingen

Haupt Verlag · Bern

Verlag Julius Klinkhardt · Bad Heilbrunn

Mohr Siebeck · Tübingen

Nomos Verlagsgesellschaft · Baden-Baden

Ernst Reinhardt Verlag · München · Basel

Ferdinand Schöningh · Paderborn

Eugen Ulmer Verlag · Stuttgart

UVK Verlagsgesellschaft · Konstanz, mit UVK/Lucius · München

Vandenhoeck & Ruprecht · Göttingen · Bristol

Waxmann · Münster · New York



basics



Nicola Fohrer (Hrsg.), Helge Bormann, Konrad Miegel, Markus Casper, Axel Bronstert, Andreas Schumann, Markus Weiler

Hydrologie

Mit Beiträgen von:

Helge Bormann, Axel Bronstert, Markus Casper, Peter Chiffard, Markus Disse, Mariele Evers, Nicola Fohrer, Andreas Grohmann, Björn Grüneberg, Uwe Haberlandt, Stefan Harnischmacher, Georg Hörmann, Martin Jekel, Jens Lange, Lukas Menzel, Bruno Merz, Konrad Miegel, Brigitte Nixdorf, Natascha Oppelt, Martin Reiss, Britta Schmalz, Andreas Schumann, Niels Schütze, Kerstin Stahl, Markus Weiler und Gerd Wessolek

Haupt Verlag

1. Auflage 2016

Die Realisierung dieses Buches wurde unterstützt durch die Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG)



Die Deutsche Bibliothek – CIP Einheitsaufnahme

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

2016 © by Haupt, Bern

Das Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlaggestaltung und Satz: Atelier Reichert, Stuttgart

Umschlagbild: © OliverSved / shutterstock.com

UTB-Band-Nr.: 4513

ISBN: 978-3-8252-4513-9

eBook-Herstellung und Auslieferung:
Brockhaus Commission, Kornwestheim
www.brocom.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Allgemeine Hydrologie

- 1 Geschichte der Hydrologie (*Georg Hörmann*)**
 - 1.1 Naturmythologie
 - 1.2 Naturphilosophie
 - 1.3 Hydrologie im Zeitalter der Naturwissenschaften
 - 1.4 Wasserwirtschaft

- 2 Wasser als Stoff (*Martin Jekel, Andreas Grohmann*)**
 - 2.1 Molekularer Aufbau
 - 2.2 Wasser als polares Molekül – Wasserstoffbrückenbindungen
 - 2.3 Physikalische Eigenschaften

- 3 Globaler und regionaler Wasserkreislauf (*Markus Weiler, Konrad Miegel*)**
 - 3.1 Wasservorkommen und Wasserkreislauf der Erde
 - 3.2 Strahlung als Hauptantrieb des Wasserkreislaufs
 - 3.3 Globale Unterschiede des Wasserhaushalts

- 4 Niederschlag (*Uwe Haberlandt*)**
 - 4.1 Bildung und Charakterisierung des Niederschlags
 - 4.2 Niederschlagsmessung
 - 4.3 Gebietsniederschlag
 - 4.4 Bemessungsniederschlag
 - 4.5 Schneeniederschlag

- 5 Bodenwasserhaushalt (*Gerd Wessolek*)**
 - 5.1 Hydraulische Bodeneigenschaften und Kennwerte
 - 5.2 Potenzialkonzept, Wasserspannung und Wassergehaltsmessungen
 - 5.3 Wasserbewegung im Boden
 - 5.4 Infiltration

- 6 Grundwasser (*Martin Reiss, Stefan Harnischmacher*)**
 - 6.1 Grundwasser im hydrologischen System
 - 6.2 Messung und Kennzeichnung
 - 6.3 Grundwasserdynamik
 - 6.4 Grundwassernutzung

- 7 Verdunstung (*Konrad Miegel*)**
 - 7.1 Die Verdunstung als physikalischer Prozess
 - 7.2 Die Verdunstung als hydrologischer Prozess
 - 7.3 Experimentell gestützte Erfassung der Verdunstung
 - 7.4 Berechnungsverfahren der Verdunstung

- 8 Abfluss im Gewässersystem (*Markus Casper, Helge Bormann*)**
 - 8.1 Der Abflussprozess
 - 8.2 Messmethoden
 - 8.3 Statistische Auswertungen und Berechnungsverfahren

- 9 Abflussbildung in der Landschaft (*Axel Bronstert*)**
 - 9.1 Einführung
 - 9.2 Abflussbildung als Teil des Wasserkreislaufs
 - 9.3 Oberirdische Abflussprozesse
 - 9.4 Unterirdische Abflussprozesse
 - 9.5 Abflussbildung infolge von Schnee- und Eisschmelze
 - 9.6 Abfluss von Siedlungsflächen

- 10 Seen (*Brigitte Nixdorf, Björn Grüneberg*)**
 - 10.1 Natürliche Seen
 - 10.2 Anthropogene Seen

10.3 Limnologische Probenahme- und Messmethoden

Spezielle Bereiche der Hydrologie

11 Einfluss von Landnutzung und Landbedeckung auf den Wasserkreislauf (Markus Weiler)

- 11.1 Einführung
- 11.2 Forst
- 11.3 Landwirtschaft
- 11.4 Stadthydrologie

12 Einfluss des Klimas und des Klimawandels auf den Wasserkreislauf (Helge Bormann, Markus Casper)

- 12.1 Einführung
- 12.2 Quantifizierung der Wirkung des Klimas auf den Wasserkreislauf
- 12.3 Hydrologische Signale des Klimawandels
- 12.4 Berechnung des Einflusses des Klimas auf den Wasserkreislauf

13 Ökohydrologie (Nicola Fohrer)

- 13.1 Einführung
- 13.2 Ökohydrologie der Landoberfläche: Die Interaktion zwischen Pflanze, Boden und Atmosphäre
- 13.3 Einzugsgebietsökohydrologie: Flüsse und ihre dynamischen Auensysteme
- 13.4 Ökohydrologie von Seen, Ästuarien und Küstenzonen

14 Hydrologische Extreme (Andreas Schumann, Lucas Menzel)

- 14.1 Hochwasser (Andreas Schumann)
- 14.2 Merkmale eines Hochwasserereignisses (Andreas Schumann)
- 14.3 Niedrigwasser (Lucas Menzel)
- 14.4 Dürren (Lucas Menzel)

Hydrologische Verfahren und Methoden

15 Hydrologische Modelle (Georg Hörmann)

- 15.1 Komponenten und Eingangsdaten von hydrologischen Modellen
- 15.2 Modelltypen
- 15.3 Workflow der Modellierung
- 15.4 Überprüfung der Modellgüte
- 15.5 Probleme und Fehlerquellen bei der Modellierung
- 15.6 Beispiele für hydrologische Modelle

16 Tracer in der Hydrologie (*Jens Lange*)

- 16.1 Künstliche Tracer
- 16.2 Natürliche Tracer
- 16.3 Tracer für hydrologische Systeme

17 Fernerkundung in der Hydrologie (*Natascha Oppelt*)

- 17.1 Was ist Fernerkundung?
- 17.2 Der Einsatz der Fernerkundung in der Hydrologie
- 17.3 Fernerkundung und hydrologische Modellierung
- 17.4 Qualitätsmanagement von Fernerkundungsprodukten

Regionale Hydrologie

18 Tieflandhydrologie (*Britta Schmalz*)

- 18.1 Einführung in das Tiefland als naturräumliche Großregion
- 18.2 Charakteristika hydrologischer Steuergrößen
- 18.3 Hydrologische Prozesse in Tieflandgebieten
- 18.4 Messungen in und Modellierung von Tieflandgebieten

19 Hydrologie der Mittelgebirge (*Peter Chiffard*)

- 19.1 Einführung in den Naturraum Mittelgebirge
- 19.2 Charakteristika hydrologischer Steuergrößen
- 19.3 Hydrologische Prozesse der Mittelgebirge

20 Hydrologie der Hochgebirge (*Kerstin Stahl*)

- 20.1 Einführung in den Naturraum Hochgebirge
- 20.2 Charakteristika hydrologischer Steuergrößen
- 20.3 Hydrologische Prozesse im Hochgebirge
- 20.4 Besonderheiten der Hydrologie vergletscherter Gebiete

21 Hydrologie von Trockenregionen (Axel Bronstert, Jens Lange)

- 21.1 Bedeutung der Hydrologie in Trockenregionen
- 21.2 Räumliche Abgrenzung
- 21.3 Niederschlag
- 21.4 Verdunstung
- 21.5 Infiltration und Abflussbildung
- 21.6 Abflussereignisse und -verluste
- 21.7 Grundwasser und Grundwasserneubildung

Anwendungen der Hydrologie

22 Bewässerung (Niels Schütze)

- 22.1 Grundlagen der Bewässerung
- 22.2 Der Betrieb von Bewässerungsanlagen

23 Hydrologische Bemessung und hydrologisches Risiko (Bruno Merz)

- 23.1 Einführung
- 23.2 Hydrologische Bemessung
- 23.3 Risikomanagement

24 Integriertes Wasserressourcenmanagement (Markus Disse)

- 24.1 Geschichte und Ziele des Integrierten Wasserressourcenmanagements (IWRM)
- 24.2 Die EG-Wasserrahmenrichtlinie als Referenz für erfolgreiches IWRM
- 24.3 Beschreibung der Komponenten wasserwirtschaftlicher Systeme
- 24.4 Optimierung und Beurteilung von integrierten wasserwirtschaftlichen Maßnahmen
- 24.5 Multikriterielle Entscheidungsanalyse

25 Partizipation im Wassermanagement (Mariele Evers)

- 25.1 Einführung
- 25.2 Definitionen und Differenzierung des Begriffs «Partizipation»
- 25.3 Partizipation im Wassermanagement
- 25.4 Methoden und Forschungsansätze

Anhang

Symbolliste

Literatur

Die Herausgeber und Autoren

Die Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG)

Register

Vorwort

Hydrologie ist die Wissenschaft des Wassers und seines Kreislaufs. Ihr Verständnis ist die Grundvoraussetzung für den nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser. In Deutschland ist sie als Fachdisziplin oft in Umwelt- oder Ingenieurstudiengängen angesiedelt. Auch in der Geographie oder den Agrar- oder Forstwissenschaften ist sie Bestandteil des Studiums. Der UTB-Basics-Band «Hydrologie» richtet sich an Studierende aller Bereiche ohne hydrologisches Vorwissen. Im ersten Teil des Buches werden grundlegende hydrologische Zusammenhänge erläutert, die als Voraussetzung für die darauffolgenden Kapitel gedacht sind. Der Wasserkreislauf und seine Komponenten werden dort ausführlich beschrieben. Im Teil «Spezielle Bereiche der Hydrologie» werden aktuelle Arbeitsrichtungen der Fachdisziplin aufgegriffen. Der Einfluss von Klima und Landnutzung auf den Wasserhaushalt wird dargestellt. Die Ökohydrologie und hydrologische Extreme wie Hoch- und Niedrigwasser gehören ebenfalls in diesen Teil. Im Teil «Hydrologische Verfahren und Methoden» werden Werkzeuge der modernen Hydrologie wie hydrologische Modelle, Tracerstudien und Fernerkundungsverfahren vorgestellt. Da der Wasserkreislauf sehr stark von Landschaftsraum und Klima beeinflusst wird, ist seine regionale Ausprägung Gegenstand von Teil 4. Die Besonderheiten des Wasserhaushalts im Tiefland, Mittel- und Hochgebirge sowie von Trockenregionen werden dort anhand von Beispielen vorgestellt. Der letzte Teil des Buchs zeigt Anwendungen von hydrologischem Wissen im Bereich des nachhaltigen Wassermanagements. Bewässerung, hydrologische Bemessung, Risiko- sowie Flussgebietsmanagement und letztlich das Einbeziehen der Akteure spannen den Bogen von der reinen Natur- und Ingenieurwissenschaft bis hin zur Soziohydrologie.

An der Entstehung dieses Buches haben 26 Kolleginnen und Kollegen aus der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft und befreundeter Gesellschaften mitgewirkt. Ich möchte mich für die großartige Zusammenarbeit und die Bereitschaft, an diesem Buch mitzuarbeiten, herzlich bedanken. Die Diskussionen um die Struktur und Inhalte der einzelnen Kapitel waren sehr bereichernd und haben meiner Ansicht nach den Dialog über die universitäre Lehre in unserem Fach ein großes Stück vorwärtsgebracht. Ein Dankeschön für die kritische Durchsicht der Kapitel und die konstruktiven Hinweise geht an meine Miteditoren Helge Bormann, Konrad Miegel, Markus Casper, Axel Bronstert, Andreas Schumann und Markus Weiler. Gerade diese Vielfalt an Koeditoren aus unterschiedlichsten Fachbereichen mit ihren verschiedenen Blickwinkeln und Erfahrungen war die ideale Mischung!

Ohne den großartigen Support von Jannik Petersen gäbe es das Buch in der vorliegenden Form nicht. Er hat mich in diesem Unterfangen mit unglaublichem Engagement unterstützt und die ganze Unternehmung auch in turbulenten Phasen umsichtig auf Kurs gehalten. Er hat die gesamte Kommunikation mit den Autoren und die freundlichen Erinnerungen an unseren Zeitplan geschultert und das Manuskript akribisch von der ersten bis zur letzten Seite Korrektur gelesen. Zusätzlich war er unser studentisches «Versuchskaninchen», was die Verständlichkeit des Texts für Hydrologieneulinge anbelangt, und hat sich der Löwenaufgabe gestellt, unsere zentralen Symbol- und Literaturverzeichnisse zu erstellen. Danke für diesen unglaublichen Einsatz!!

Herrn Dr. Martin Lind, dem Lektor des Haupt Verlags, danke ich sehr für den folgenschweren Anruf, mit dem er dieses Buchprojekt ins Leben gerufen hat. Danke, dass Sie unser Projekt so umsichtig und geduldig über die gesamte Entstehungsphase begleitet haben.

Danke an meine Studierenden und meine Arbeitsgruppe, die mir die Motivation für dieses Buch gegeben haben. Mein größter Dank gebührt meiner Familie, die alle meine Projekte und Ideen und die damit verbundenen Arbeitsspitzen bisher gelassen ertragen hat und immer an meiner Seite ist. Danke!

Kiel, im Februar 2016
Nicola Fohrer

Allgemeine Hydrologie

Geschichte der Hydrologie

| 1

Georg Hörmann

Inhalt

1.1 Naturmythologie

1.2 Naturphilosophie

1.3 Hydrologie im Zeitalter der Naturwissenschaften

1.4 Wasserwirtschaft

Die Geschichte der Hydrologie kann in drei Phasen eingeteilt werden: die Naturmythologie, Naturphilosophie und Naturwissenschaft. Die Hydrologie als exakte Naturwissenschaft wurde in der Renaissance begründet. Das Schicksal vieler Hochkulturen ist eng mit der Beherrschung der hydrologischen Rahmenbedingungen, z.B. durch Bewässerung und Hochwasserschutz, verknüpft.

1.1 | Naturmythologie

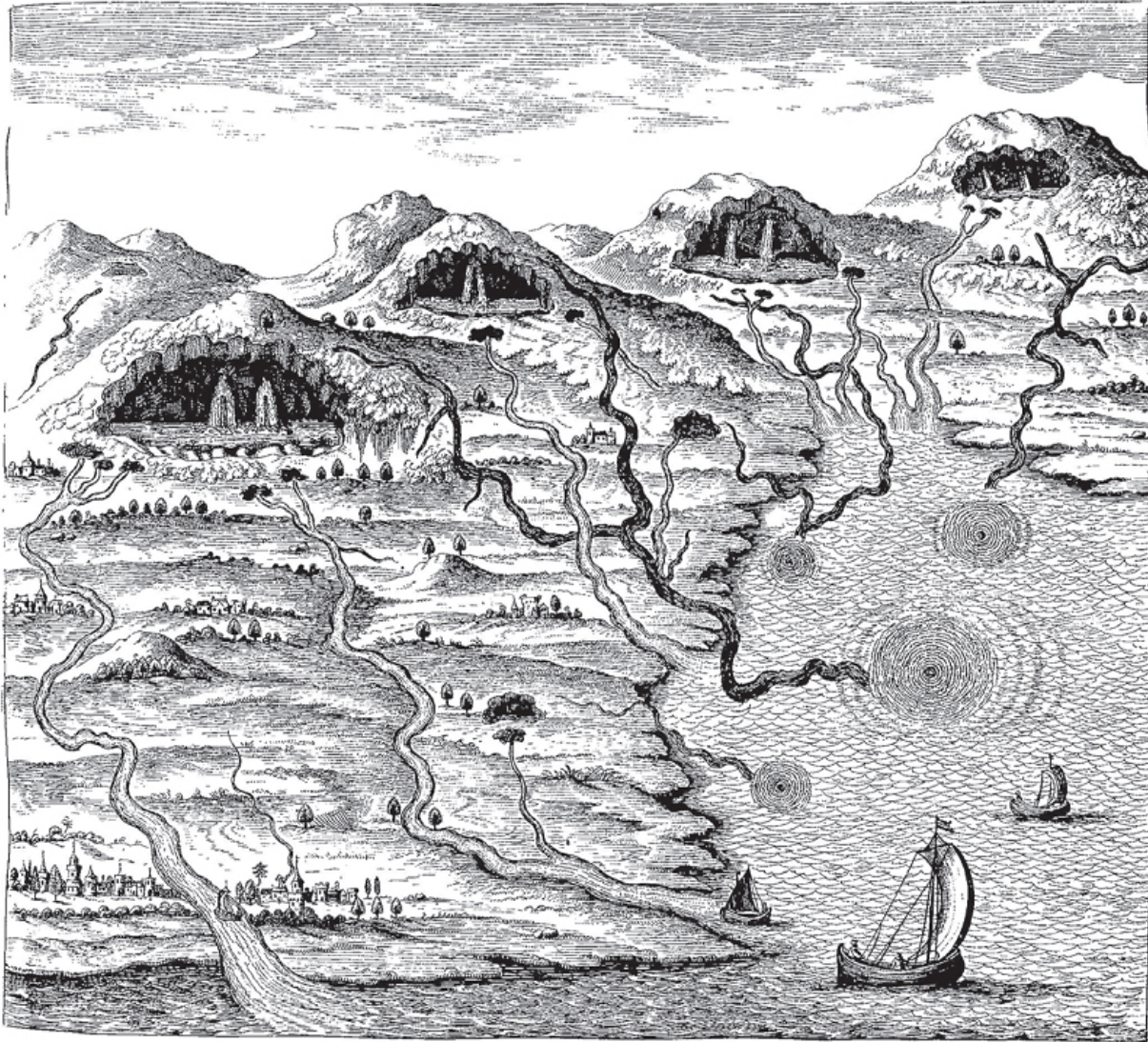
In allen Kulturen diente zunächst die Mythologie der Erklärung der Welt. Die Zuständigkeiten der **Götter** waren klar geregelt, auch im Bereich der Hydrologie. Hydrologische Extreme wie Dürren und Hochwasser waren keine logisch erklärbaren Phänomene, sondern wurden durch die Götter in Abhängigkeit vom Wohlverhalten und von den Opfern der Menschen gesteuert. So lag z.B. die Verantwortung für

die Wasserwirtschaft im alten Ägypten und in Mesopotamien in den Händen der **Priester**.

1.2 | Naturphilosophie

Die Anfänge der empirischen Naturwissenschaften wurden im abendländischen Kulturraum im alten Griechenland gelegt. Dort beschäftigten sich verschiedene philosophische Schulen mit der **Naturbeobachtung**. Thales (ca. 624–546 v. Chr) glaubte, dass das Wasser aus den unterirdischen Vorräten wie in einem Schwamm nach oben in die Quellen gesogen wird. Hippokrates von Kos (460–380 v. Chr.) stellte erste Versuche zur Verdunstung an, durchschaute aber zentrale Prozesse des Wasserkreislaufs noch nicht. Selbst Kircher ging in seinem Buch über die «Unterirdischen Welten» von 1665 noch von den falschen Ansichten Thales' aus ([Abb. 1-1](#)). Erst Perrault (1611–1680) beschrieb die Verdunstung als Teil des Wasserkreislaufs und berechnete erste Wasserbilanzen.

Abb. 1-1 | Darstellung des Wasserkreislaufs von Kircher (1665)



Merksatz: Die Entwicklung der Hydrologie als exakte Naturwissenschaft begann in der Renaissance.

1.3 | Hydrologie im Zeitalter der Naturwissenschaften

Mit der Renaissance ab Mitte des 14. Jahrhunderts begann der Aufstieg der Naturwissenschaften allgemein und damit auch der Hydrologie. Die religiösen Dogmen der Kirche wurden durch

Beobachtungen ersetzt, es entstand «Wissenschaft», wie man sie heute kennt. Wichtig für die Hydrologie sind zum einen die Schaffung der **mathematisch-theoretischen Grundlagen** und zum anderen der **Aufbau von Messnetzen** für meteorologische Größen wie Temperatur oder Niederschlag und hydrologische Kennzahlen wie Wasserstand und Abfluss. Messungen begannen an einzelnen Orten um 1800, ab ca. 1900 gab es im deutschen Sprachraum verlässliche Messungen in größeren Netzwerken.

Viele Grundlagen der theoretischen Hydrologie wurden ebenfalls im ausgehenden 19. Jahrhundert gelegt. Henry Darcy (1803–1858) beschrieb den Zusammenhang zwischen Wasserhöhe, Durchlässigkeit und durchflossener Fläche in porösen Medien wie Böden. Der Abfluss im Gewässer war ebenfalls Gegenstand vieler Untersuchungen. Jakob Bernoulli veröffentlichte 1738 seine Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Druck. Der Mathematiker Leonhard Euler stellte die allgemeinen Bewegungsgleichungen für ideale Flüssigkeiten auf. Die erste empirische Gleichung zur Berechnung der Verdunstung als Funktion von Windgeschwindigkeit und Sättigungsdefizit geht auf John Dalton (1766–1844, publiziert 1801) zurück. Die quantitative Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss wurde bereits von Claude Perrault und Edme Mariotte im 17. Jahrhundert untersucht, aber erst 1932 stellte Leroy K. Sherman mit dem Einheitsganglinienverfahren eine empirische Beziehung zwischen den beiden Zeitreihen her.

1.4 | **Wasserwirtschaft**

Unabhängig vom theoretischen Verständnis des Wasserkreislaufs haben viele Hochkulturen Methoden zur Steuerung des Wasserhaushalts entwickelt. Zwei Bereiche der Wasserwirtschaft sind dabei oft verbunden mit Aufstieg und Niedergang von Hochkulturen: **Bewässerung und Hochwasserschutz**. Bewässerung schuf in vielen Kulturen die Voraussetzung für höhere landwirtschaftliche Erträge und ermöglichte deshalb die Entwicklung von Städten.

Hochwasserschutz war oft verbunden mit technischen Hochleistungen wie Deichbau und erforderte eine hoch entwickelte Verwaltung zur Koordination der komplexen Baumaßnahmen. Auch der Bereich der Wasserver- und -entsorgung ist hier zu erwähnen: Die von den Römern gebauten **Aquädukte** und die Abwasserleitungen sind heute noch zu sehen ([Abb. 1-2](#)).

Vor allem in ariden Regionen sind der Aufstieg und der Niedergang von Kulturen oft direkt mit der Produktivität der Landwirtschaft, und damit mit der Bewässerung ([→ Kap. 22](#)) verbunden. Typische Beispiele dafür sind Mesopotamien im heutigen Irak und Iran sowie der Jemen. In Mesopotamien wurde Wasser in unterirdischen Kanälen, den sogenannten **Qanaten**, über viele Kilometer aus den Bergen in die Wüstenregionen transportiert.

Abb. 1-2 | Der Pont du Gard in Südfrankreich, ein von den Römern erbautes Aquädukt (Foto: Wikicommons).



Ein Beispiel der Verknüpfung von Wasserbau und nationalem Wohlstand ist der **Ma'rib-Damm** im Jemen, dessen Überreste heute noch zu besichtigen sind. Mit dem Bau des Erddamms wurde ca. 1700 v. Chr. begonnen. Zur Zeit der Königin von Saba wurden mit dem Wasser des 14 m hohen Damms 100 km² bewässert. Der erste größere Bruch des Damms ca. 145 n. Chr. führte zu einer verheerenden Flut. In der Folge wurde der Damm immer wieder repariert. Der endgültige Zusammenbruch erfolgte um 500 n. Chr. und führte zum Niedergang der Bewässerungswirtschaft und damit des ganzen Reichs.

Weiterführende Literatur

Biswas, A. K. (1970): History of Hydrology. Amsterdam/New York.

Deutsche Wasserhistorische Gesellschaft. URL: <http://www.dwhg-ev.com/> (Stand: 29.06.2015).

Garbrecht, G. (1996): Geschichte der Hydrologie. In: Baumgartner, A. und H.-J. Liebscher (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrologie. 1. Band. Allgemeine Hydrologie. Quantitative Hydrologie. Stuttgart, S. 11–70.

Martin Jekel, Andreas Grohmann

Inhalt

2.1 Molekularer Aufbau

2.2 Wasser als polares Molekül – Wasserstoffbrückenbindungen

2.3 Physikalische Eigenschaften

Wasser besitzt einzigartige Eigenschaften und ist für alle biologischen und ökologischen Vorgänge unverzichtbar. Sein molekularer Aufbau mit gewinkelten Bindungen zwischen Sauerstoff- und Wasserstoffatomen ist von zentraler Bedeutung für die Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen. Alle physikalischen und chemischen Prozesse mit Wassermolekülen beruhen darauf und sind ungewöhnlich im Vergleich mit ähnlichen Molekülen.

2.1 | Molekularer Aufbau

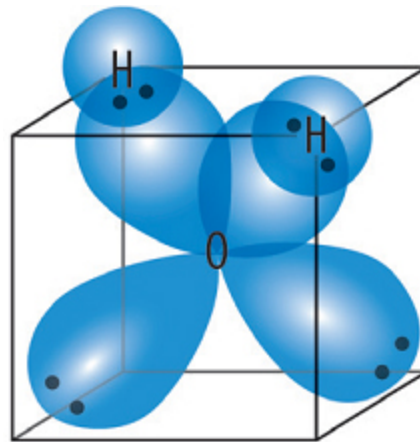
Wasser (H_2O) ist die bei Weitem wichtigste binäre, aus Atomen zweier Elemente bestehende Verbindung. Sie entsteht aus der Vereinigung der Elemente **Wasserstoff** mit dem Elementsymbol H (gr.-lat. hydrogenium, «Wasserbildner») und **Sauerstoff** mit dem

Elementsymbol O (gr.-lat. oxygenium, «Säurebildner»). Der Grundzustand der Elemente ist jeweils das zweiatomige Molekül H₂ bzw. O₂. Namen im Rahmen der wissenschaftlichen Nomenklatur sind **Dihydrogenoxid** und **Oxid**.

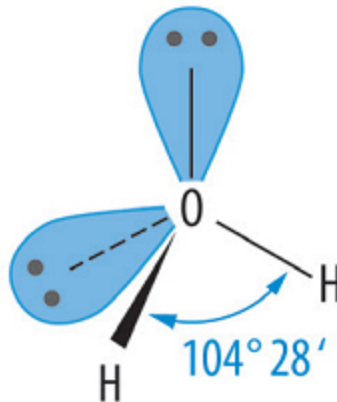
Wasser besitzt einzigartige physikalische und chemische Eigenschaften und ist für alle biologischen und ökologischen Vorgänge unverzichtbar. Diese Eigenschaften bedingen seine Rolle als Träger des Lebens und machen Wasser zum Ausgangspunkt einer Vielzahl von Wechselbeziehungen, die unseren blauen Planeten prägen. Die besonderen Eigenschaften des Wassers gründen in der Struktur des Wassermoleküls und in der Art der in ihm zwischen Sauerstoff- und Wasserstoffatomen geknüpften **kovalenten Bindungen**.

Das Element Wasserstoff findet sich in der 1. Hauptgruppe des Periodensystems bzw. der 1. Gruppe und der 1. Periode mit der Ordnungszahl 1, das Element Sauerstoff in der 6. Hauptgruppe, bzw. der 16. Gruppe und der 2. Periode mit der Ordnungszahl 8. Ein Wasserstoffatom mit dem Symbol H weist ein Elektron in seiner Elektronenhülle auf und ein Sauerstoffatom O acht Elektronen, davon sind sechs an Bindungen beteiligt. Die **Elektronenkonfiguration** des Wasserstoffatoms im Grundzustand wird als 1s¹ notiert, diejenige des Sauerstoffatoms als 1s² 2s² 2p⁴. Die führenden Ziffern in dieser Notation sind die Hauptquantenzahlen der Elektronenhülle, die Kleinbuchstaben sind aus der Spektroskopie abgeleitete Bezeichnungen der besetzten Atomorbitale, und die Exponenten geben die Elektronenanzahl in den jeweiligen Atomorbitalen an. Die in diesen Orbitalen befindlichen Elektronen werden als **Valenzelektronen** bezeichnet.

Abb. 2-1 | Zwei Darstellungen der räumlichen Anordnung der Atome und freien Elektronenpaare im H₂O- Molekül. Der angegebene Bindungswinkel ist der für die Gasphase bestimmte Wert (nach Grohmann et al. 2011).



einsame Elektronenpaare



Das Wassermolekül hat die Form eines Tetraeders.

Die Verknüpfung von Atomen zu Verbindungen, wie z.B. die Bildung von Wasser (H₂O) aus einem Atom Sauerstoff und zwei Atomen Wasserstoff, befriedigt in der Regel das Bestreben der Atome, besonders stabile **Elektronenkonfigurationen** zu erlangen. Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, warum die **Summenformel** für das Wassermolekül H₂O lautet, sich also bei der Bildung von Wasser aus den Elementen genau zwei Wasserstoffatome mit einem

Sauerstoffatom unter Ausbildung zweier kovalenter Bindungen verknüpfen. Im Zuge der Reaktion steuern zwei Wasserstoffatome je ein Valenzelektron und das Sauerstoffatom sechs Valenzelektronen bei.

Von zentraler Bedeutung für die Eigenschaften des Wassers ist der gewinkelte Bau des H_2O -Moleküls, d.h., die Anordnung der Atome HOH ist nicht linear. Der von den beiden Verbindungslinien O–H eingeschlossene Winkel beträgt $105 \pm 0,5^\circ$. Dieser Wert variiert leicht, je nachdem, ob das Wassermolekül isoliert oder von anderen Wassermolekülen umgeben betrachtet wird. Projiziert man das Wassermolekül so in einen **Tetraeder**, dass das Sauerstoffatom im Schwerpunkt liegt, zeigen die beiden O–H-Bindungen in zwei Ecken des Tetraeders, und die beiden freien Elektronenpaare weisen in Richtung der beiden verbleibenden Ecken. In einem regelmäßigen Tetraeder beträgt der von je zwei Verbindungslinien eingeschlossene Winkel $109^\circ 28'$. Im Wassermolekül in der Gasphase ist der Winkel HOH auf $104^\circ 28'$ verkleinert ([→ Abb. 2-1](#)).

2.2 | Wasser als polares Molekül – Wasserstoffbrückenbindungen

Im Wassermolekül sind die bindenden Elektronen nicht gleichmäßig zwischen dem O-Atom und den H-Atomen verteilt. Die Fähigkeit von Atomen, in kovalenten Bindungen die Bindungselektronen zu sich zu ziehen, wird als **Elektronegativität** (EN) bezeichnet. Sauerstoff besitzt eine im Vergleich zu Wasserstoff erheblich größere Elektronegativität. Am Sauerstoffatom befindet sich eine negative **Partialladung** ($2 \delta^-$) und an jedem Wasserstoffatom eine jeweils halb so große positive Partialladung (δ^+). Wegen des gewinkelten Baus des Wassermoleküls fallen die Ladungsschwerpunkte nicht zusammen. Das Molekül ist folglich ein elektrischer Dipol ([→ Abb. 2-2](#)).

Wegen des stark polaren Charakters der O–H-Bindungen kann aus dem Wassermolekül relativ leicht ein Proton (H^+) abgespalten werden, das sich an ein anderes Wassermolekül anlagert, wodurch ein Hydroxid-Anion (OH^-) zurückbleibt. Dies ist von grundlegender

Bedeutung für **Säure-Base-Reaktionen** in wässriger Lösung. Diese Eigendissoziation des Wassers ist daher wie folgt zu beschreiben:

Wasser ist ein elektrischer Dipol. Dies beeinflusst maßgeblich seine Eigenschaften.



Die Gleichgewichtskonstante ist hierbei sehr klein: $K_w = 10^{-14} \text{ mol}^2/\text{l}^2$. Bei 25 °C liegt das Gleichgewicht weit auf der linken Seite. Im reinen Wasser findet man daher nur sehr geringe Konzentrationen der beiden Produkt-Ionen von 10^{-7} mol/l .

Polare Atombindungen sind unter Ionenbildung spaltbar, woraus die **Oxidationszahl** abgeleitet werden kann. Sie ist wichtig für Oxidations- und Reduktionsvorgänge, an denen Wasser beteiligt ist. Um die Oxidationszahl der Elemente bzw. Atome zu ermitteln, die zu einer Verbindung zusammengefügt sind, wird die Verbindung formell in Ionen aufgeteilt. Für das H_2O -Molekül ergibt das Verfahren 2 H^+ -Ionen (Protonen) und ein O^{2-} -Ion, das auch als Oxid-Ion bezeichnet wird. Die Oxidationszahl der Wasserstoffatome im H_2O -Molekül ist folglich +1, die des Sauerstoffatoms -2.

Die im gewinkelt gebauten Wassermolekül auftretenden Partiaalladungen, das **permanente Dipolmoment**, induzieren, dass mehrere nebeneinander vorliegende Wassermoleküle nach den Grundsätzen der Elektrostatik aufeinander einwirken. Dies führt dazu, dass Wassermoleküle je nach Aggregatzustand unterschiedlich stark miteinander in Wechselwirkung treten und sich auf diese Weise dreidimensional geordnete Strukturen ergeben. In jedem Falle richten sich die stark positiv polarisierten H-Atome eines Wassermoleküls auf die freien Elektronenpaare der stark negativ polarisierten O-Atome benachbarter Wassermoleküle aus. Diese Art der elektrostatischen Wechselwirkung wird **Wasserstoffbrückenbindung** oder **H-Brücke** genannt. Sie ist für Wasser in [Abb. 2-3](#) illustriert.

Die besonderen physikalischen Eigenschaften des Wassers, wie z.B. sein hoher Siedepunkt, haben im Wesentlichen folgende Ursachen:

Abb. 2-2 | Exakte (Oben) und schematische Darstellung (unten) der Dipoleigenschaft des Wassermoleküls (nach Grohmann et al. 2011).

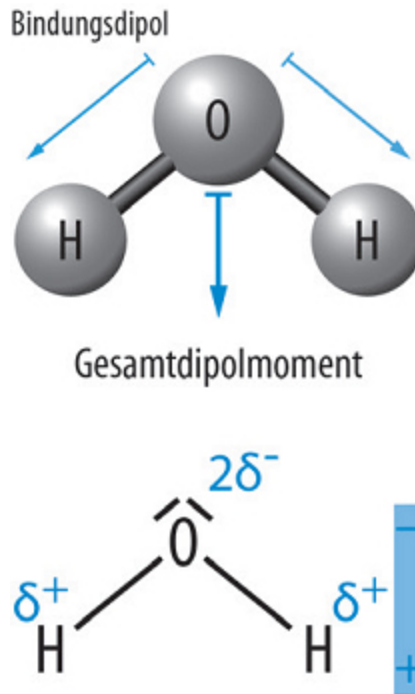
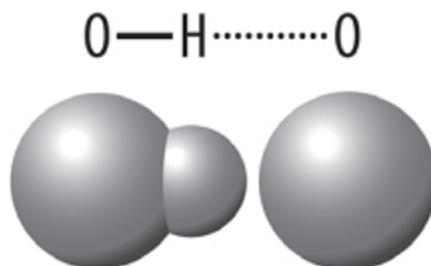


Abb. 2-3 | Als punktierte Linie dargestellte Wasserstoffbrückenbindung (H-Brücke) zwischen zwei benachbarten Wassermolekülen (nach Grohmann et al. 2011).



- ▶ Seine H-Brücken sind als Konsequenz der hohen Elektronegativitätsdifferenz zwischen O und H besonders stark.
- ▶ Das Wassermolekül ist von seiner Struktur her optimal für die Anordnung in einem durch H-Brücken geknüpften Netzwerk geeignet: Es besitzt zwei stark positiv polarisierte H-Atome und

zwei freie Elektronenpaare, kann also gleich viele H-Brücken ausbilden, wie es von anderen Wassermolekülen empfängt (2 + 2).

- ▶ Die Bindungsenergie einer H-Brücke in Wasser beträgt etwa 23 kJ/mol.

Unter Zimmertemperatur und Atmosphärendruck lösen sich Substanzen umso schlechter in Wasser, je unpolarer sie sind. Unpolare Substanzen sind wasserabweisend bzw. **hydrophob**, wie z.B. polyaromatische Kohlenwasserstoffe und Mineralöle. Umgekehrt lösen sich Stoffe umso besser in Wasser, je polarer sie sind. Derartige Stoffe sind wasseranziehend, also **hydrophil**. Beispiele hierfür sind Kochsalz, Zucker, Pflanzennährstoffe oder Essigsäure. Viele Salze sind gut wasserlöslich, wodurch die Wasservorkommen eingeteilt werden: Süßwasser hat unter 1000 mg/l an gelösten Salzen, Brackwasser weist ca. 1000–10000 mg/l auf, während Meerwasser ca. 35 000 mg/l enthält, gemessen als Abdampfrückstand einer Wasserprobe.

Schließlich soll eine wichtige Konsequenz, die sich für das Wasser aus dem Vorliegen starker H-Brücken ergibt, betrachtet werden. Flüssiges Wasser lässt sich über einen großen Temperaturbereich erhitzen, wobei es erst am Siedepunkt bei fortgesetzter Zufuhr von Energie in den gasförmigen Zustand übergeht. Wasser kann daher insbesondere im flüssigen Zustand als Wärmespeicher fungieren. Die Wärmespeicher-Funktion des Wassers ist essenziell für Wetter, Klima und den Wasserkreislauf der Erde (→ [Kap. 3](#) und [7](#)). Diese Beobachtungen führen zum Begriff der **spezifischen Wärmekapazität**. Die spezifische Wärme eines Stoffes ist die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 Gramm des Stoffes um 1 °C zu erwärmen. Im Falle von Wasser beträgt die Wärmekapazität bei 17 °C unter Atmosphärendruck 4,184 J/(g · K).

Isotope des Wassers

Bisher wurde Wasser (H₂O) als die Verbindung des gängigsten Isotops des Wasserstoffs (¹H, Protium) und Sauerstoff diskutiert, also als das, was man auch «leichtes» Wasser nennt. **Isotope** sind Atome desselben Elements, die sich in ihrer Neutronenzahl unterscheiden. Wasser aus