

Georg Schwedt

# Einführung in die Wasserchemie





## **Einführung in die Wasserchemie**



# **Einführung in die Wasserchemie**

*Georg Schwedt*

**WILEY-VCH**

**Autor****Prof. Dr. Georg Schwedt**

Lärchenstr. 21  
53117 Bonn  
Deutschland

**Titelbild**

Das Titelbild wurde unter Verwendung einer Abbildung von Shutterstock/Hekla gestaltet.

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

**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.

© 2023 WILEY-VCH GmbH, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

**Satz** le-tex publishing services GmbH, Leipzig  
**Druck und Bindung**

**Print ISBN** 978-3-527-34873-2

**ePDF ISBN** 978-3-527-83070-1

**ePub ISBN** 978-3-527-83071-8

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

# Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** *VII*

- 1** **Einleitung** *1*
  
- 2** **Grundlagen der Hydrologie** *3*
  - 2.1 Definition und Entwicklungen *3*
  - 2.2 Der hydrologische Kreislauf *6*
  - 2.3 Das Kastenmodell der Gewässerchemie *8*
  - 2.4 Verteilung des Wassers auf der Erde *9*
  - 2.5 Wasserhaushalt der Erde – global und regional *11*
  - Literaturnachweis *15*
  
- 3** **Stoffkreisläufe mit Beteiligung des Wassers** *17*
  - 3.1 Hydrogeochemie *17*
  - 3.2 Wechselwirkungen zwischen Wasser und Land *22*
  - 3.3 Stoffkreisläufe in Gewässern *25*
  - 3.4 Wasserkreislauf im Wirkungsfeld Wasser-Boden-Vegetation *28*
  - 3.5 pH- und pE-Diagramme *31*
  - 3.6 Kohlenstoffspezies im Kreislauf von Gewässern *34*
  - Literaturnachweis *35*
  
- 4** **Wasserinhaltsstoffe** *37*
  - 4.1 Herkunft natürlicher Inhaltsstoffe in Grund- sowie Mineralwässern *37*
  - 4.2 Spezielle Gleichgewichtssysteme *41*
  - 4.3 Stoffumwandlungen und Stoffkreisläufe von Metallen *50*
  - 4.4 Anthropogene Stoffeinträge in Gewässer *54*
  - Literaturnachweis *60*
  
- 5** **Wasserarten und ihre Herkunft** *61*
  - 5.1 Versuch einer Systematik *61*
  - 5.2 Regenwasser – Niederschlagswasser *63*
  - 5.3 Grundwasser, Quell- und Brunnenwasser *68*
  - 5.4 Meerwasser *79*

5.5	Oberflächenwässer	82
5.6	Trinkwasser	86
5.7	Mineral- und Heilwasser	92
5.8	Spezielle Wasserarten – nach ihrem Gebrauch	104
	Literaturnachweis	108
<b>6</b>	<b>Wasseranalytik – vom Trinkwasser bis zum Abwasser</b>	<b>109</b>
6.1	Geschichte und Entwicklung der Wasseruntersuchung von Paracelsus bis Fresenius	109
6.2	Methodik allgemein und spezielle Verfahren	116
6.2.1	Summenparameter	116
6.3	Analytik von Mineral- und Trinkwasser	128
6.4	Spezielle Parameter in der Wasseruntersuchung	135
6.5	Prozessanalytik im Wasserwerk und in der Abwasserkläranlage	149
6.6	Gesetze, Verordnungen und Richtlinien	154
	Literaturnachweis	167
<b>7</b>	<b>Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung</b>	<b>171</b>
7.1	Allgemeines	171
7.2	Trinkwasseraufbereitung	172
7.3	Abwasserreinigungsverfahren	180
7.3.1	Verfalle und Vorgänge der Denitrifikation	188
	Literaturnachweis	191
<b>8</b>	<b>Zu Besuch in Wassermuseen</b>	<b>193</b>
8.1	Das Aquarius-Wassermuseum in Mülheim-Styrum	193
8.2	Das <i>Selterswassermuseum</i> in Niederselters im Taunus	196
	Literaturnachweis	199
	<b>Literatur</b>	<b>201</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>207</b>

## Vorwort

Das Buch wendet sich an Studenten und Praktiker aus der Geografie, Geologie, der Chemie und Lebensmittelchemie, den Ingenieurwissenschaften (speziell Wasserwirtschaft), der Biologie sowie aus der Medizin an Hygieniker.

Es vermittelt grundlegende Kenntnisse von der Hydrologie bis zur Analytik und Gesetzgebung. Auf sehr spezielle Details wird jedoch verzichtet.

Bereits direkt nach meiner Promotion 1971 war ich als Leiter einer neu eingerichteten Abteilung für Umweltschutz und Wasseruntersuchungen im Chemischen Untersuchungsamt der Stadt Hagen tätig. Als Hochschullehrer begann ich mit Forschungen in der Elementspeziesanalytik in Wässern. Später sollten die Entwicklung und Anwendung u. a. der Ionenchromatographie in der Wasseranalytik sowie der Elementspurenanalytik zu den methodischen Schwerpunkten in der Forschung werden. Für problemorientierte Untersuchungen wurden sowohl Schnelltests als auch automatisierte Verfahren und Kopplungstechniken entwickelt.

Auf die aus diesen Arbeiten entstandenen Veröffentlichungen wird auch in diesem Buch Bezug genommen.

Grundlegende Darstellungen sind aus dem vergriffenen Taschenatlas Umwelt (erstmalig im Thieme Verlag 1999 erschienen) entnommen und durch neue Entwicklungen und Erkenntnisse der letzten Jahrzehnte ergänzt worden.

Bonn im Frühjahr 2022

*Georg Schwedt*



# 1

## Einleitung

Wasser ist die Voraussetzung für die *Entstehung von Leben*. Der Mensch besteht zu 60–65 % aus Wasser. Früchte enthalten bis zu 90 % Wasser.

Wasser ist ein wichtiges *Transportmittel* – für Pflanzen zur Aufnahme von Nährstoffen, für Schiffe zum Transport von Gütern und Menschen.

Wasser war bei den griechischen Naturphilosophen Teil ihrer *Vier-Elemente-Lehre* aus Wasser, Feuer, Luft und Erde. Wasser wurde seit Thales um 600 v. Chr. als *Urstoff* bezeichnet.

Die Formel *panta rhei* (alles fließt), die auf den griechischen Philosophen Heraklit von Ephesos (um 520 bis um 460 v. Chr.) zurückgeführt wird, beinhaltet eine frühe Vorstufe vom Kreislauf des Wassers. Auch in der Bibel spielt Wasser eine große Rolle – so beispielsweise auch extreme Niederschläge wie in der *Sintflut*.

Erste Vorstellungen von einem *meteorogenen Wasserkreislauf* sind u. a. bei *Diogenes von Appollonia* (um 499 bis um 428 v. Chr.; antiker Naturphilosoph und Arzt) sowie auch *Hippokrates von Kos* (um 460 bis um 370 v. Chr., berühmtester Arzt des Altertums) zu finden.

An den physikalischen Eigenschaften des Wassers orientiert sich unsere *Temperaturskala* in Grad Celsius.

Mit der Bestimmung der exakten (quantitativ ermittelten) *Formel  $H_2O$*  – der Zusammensetzung aus zwei Atomen Wasserstoff und einem Atom Sauerstoff – begann die Zeit der *Chemie als Wissenschaft* in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts. Besonderes Charakteristikum des Wassers ist sein Vorkommen auf der Erde in den drei Aggregatzuständen gasförmig, flüssig, fest.

Mit Wasser beschäftigen sich *zahlreiche Wissenschaften*: von der Chemie und Physik, der Meteorologie, den Umweltwissenschaften (Wasserunreinigungen), von den Ingenieurwissenschaften (Technik), der Medizin (Hygiene; Heilwässer) bis zur Ökonomie (Wasserwirtschaft) sowie auch die Rechtswissenschaften (Gesetzgebung).

Unser Trinkwasser ist das *Lebensmittel Nr. 1*, das besonders umfangreichen Überwachungen nach dem Lebensmittelgesetzgebung unterliegt.

Auf der Webseite der *Wasserchemischen Gesellschaft*, einer Fachgruppe innerhalb der Gesellschaft Deutscher Chemiker, sind u. a. die Aufgaben der Wasserchemie in der heutigen Zeit zusammengefasst.

Dazu zählen die Verwendung und Aufbereitung der verschiedenen Rohwässer, mit der Behandlung genutzter Wässer vor der Rückführung in den natürlichen Kreislauf und die Prüfung, Vereinheitlichung und Weiterentwicklung von Analyseverfahren.

In dieser breit angelegten *Einführung in die Wasserchemie* wurden alle diese genannten Bereiche berücksichtigt.

Die Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 „zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik“ enthält folgenden Satz:

- (1) Wasser ist keine übliche Handelsware, sondern ein ererbtes Gut, das geschützt, verteidigt und entsprechend behandelt werden muss.

## 2

# Grundlagen der Hydrologie

## 2.1 Definition und Entwicklungen

Die Hydrologie, auch Gewässerkunde, ist die Wissenschaft vom Wasser und seinen Eigenschaften vor allem in der Geo- und Biosphäre, auf und unter der Erdoberfläche. Sie umfasst als Teilbereiche den Wasserhaushalt (quantitative Hydrologie), die Wasserbeschaffenheit sowie biogene Stoffumsätze im Wasser (qualitative Hydrologie). Wichtige, oft eigenständige Teildisziplinen sind u. a. die Hydrologie der Oberflächenwässer (Fließgewässer, Schnee/Eis), die Hydrogeologie und die Hydrochemie sowie Hydrobiologie und Limnologie (Binnengewässerkunde). Ozeanologie (Meereskunde) und Glaziologie (Gletscherkunde) sind schon früh als selbstständige Wissenschaften entstanden.

Athanasius Kircher (1602–1680; Jesuit und Universalgelehrter des 17. Jahrhunderts) vermittelt in seinem Werk *Mundus subterraneus* (1664 [1]; Abb. 2.1) eine erste Vorstellung von einem Wasserkreislauf. Er vermutete, dass Quellen in den Höhenlagen von Bergen aus unterirdischen Kanälen gespeist würden. Diese Quellen wiederum seien mit sehr großen Strudeln am Grund der Meere verbunden. Er stellte auch die Hypothese auf, dass die Gezeiten von Wassermassen verursacht würden, die sich zwischen den Weltmeeren und einem unterirdischen Ozean bewegten.

Pierre Perrault (um 1608–1680) wurde gemeinsam mit Edme Mariotte (um 1620–1684; Physiker) zu einem der Begründer der Hydrologie als einer experimentellen Wissenschaft, indem sie u. a. das Eindringen von Regenwasser in den Boden quantitativ ermittelten und die Verdunstung als Teil des Wasserkreislaufs (mit Faktoren wie Verdunstung, Transpiration [Pflanzen], Durchfluss und Oberflächenabfluss) in ihre Betrachtungen einbezogen. Perrault veröffentlichte 1674 seine Erkenntnisse unter dem Titel *De l'origine des fontaines* – deutsch *Über den Ursprung der Quellen* [2].

Mit dem Beginn umfangreicherer Messungen zu meteorologischen Größen wie Temperatur und Niederschlag, auch zum Wasserstand von Flüssen als hydrologischer Größe, begann im 19. Jahrhundert eine Entwicklung zum Aufbau von Messnetzen, die Daten für mathematisch-theoretische Grundlagen lieferten.

Pioniere dieser Entwicklungen sind u. a. John Dalton (1766–1844; engl. Naturforscher), der 1801 eine erste empirische Gleichung zur Berechnung der Verdunstung als Funktion von Windgeschwindigkeit und Sättigungsdefizit entwickelte, so-



**Abb. 2.1** Vorstellungen eines Wasserkreislaufes von A. Kircher in *Mundus subterraneus* (Unterirdische Welten) 1664 [1].

wie Henry Darcy (1803–1858; franz. Ingenieur), der den Zusammenhang zwischen Wasserhöhe, Durchlässigkeit und durchflossener Fläche poröser Medien wie Böden beschrieb.

In den Hochkulturen entwickelten sich schon früh Techniken zur Steuerung des Wasserhaushaltes – so in Mesopotamien (heute Irak) zur *Bewässerung* im Pflanzenanbau bei Wassermangel, wo Wasser in unterirdischen Kanälen (Qanat genannt) von Quellen in den Bergen in Wüstenregionen transportiert wurde. Weitere Beispiele sind Bewässerungsanlagen im alten Ägypten, der Deichbau als Schutz in vielen Küstenregionen und auch die von den Römern entwickelte Technik der Wasserversorgung und -entsorgung mit den historischen Wasserleitungen auch in Deutschland (aus der Eifel nach Köln, verbunden mit dem Bau von Aquädukten – s. auch Exkurs in Abschn. 5.6). Als Beispiel für einen Deichbau zur Wasserversorgung sei der Mar'ib Staudamm im heutigen Jemen genannt, der um 1700 v. Chr. zur Zeit der Königin von Saba errichtet für Wasser zur Bewässerung einer Fläche von etwa 100 km<sup>2</sup> sorgte.

Zu den Grundlagen der *allgemeinen Hydrologie* gehören die Gebiete des globalen und regionalen Wasserkreislaufes, des Niederschlags, des Bodenwasserhaushaltes, des Grundwassers, der Verdunstung und des Abflusses im Gewässersystem, die im Folgenden ausführlicher dargestellt werden.

Über spezielle Bereiche der Hydrologie, über hydrologische Methoden und Verfahren, die regionale Hydrologie, Anwendungen der Hydrologie bis zum Wassermanagement informiert u. a. das Buch von N. Führer (Hrsg.) *Hydrologie* (2011) [5]. Im selben Jahr wurde in Koblenz die Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG

e. V.) gegründet – als „Fachvertretung für den Bereich der Hydrologie und Wasserbewirtschaftung für Studierende, Wissenschaftler/innen und Berufspraktiker“ ([www.dhydrog.de](http://www.dhydrog.de)).

#### **Exkurs: Bundesanstalt für Gewässerkunde**

In Koblenz befindet sich seit 1952 auch die Bundesanstalt für Gewässerkunde. Nach Hochwasserkatastrophen in den 1880er- und 1890er-Jahren bildeten die deutschen Staaten Baden, Bayern, Württemberg und Preußen einen gemeinsamen Wasserausschuss, aus dem 1902 die Preußische Landesanstalt für Gewässerkunde in Berlin hervorging. Nach dem Zweiten Weltkrieg entstand in den sowjetisch besetzten Gebieten 1945 die Forschungsanstalt für Schifffahrt, Gewässer- und Bodenkunde, später im Hauptamt für Hydrologie und dann im Institut für Wasserwirtschaft (IfW) fortgeführt. In Westdeutschland wurde 1948 zunächst die Forschungsanstalt für Gewässerkunde in Bielefeld eingerichtet – 1949 in Bundesanstalt für Gewässerkunde unbenannt und 1952 in Gebäude in den Kaiserin-Augusta-Anlagen in Koblenz verlegt. Nach der Wiedervereinigung beider deutscher Staaten arbeiteten ab Oktober 1990–2002 die Einrichtungen in Berlin und Koblenz zusammen (die Außenstelle Berlin wurde 2002 geschlossen).

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz hat als wissenschaftliches Institut die Aufgabe, wasserstraßenbezogene Forschung, Begutachtung und Beratung auf den Gebieten *Gewässerkunde*, *Wasserbewirtschaftung*, *Ökologie* und *Gewässerschutz* durchzuführen. Eine der Kernaufgaben ist das „Messprogramm zur Überwachung der Gewässergüte grenzüberschreitender Flüsse sowie von Küstengewässern“.

Die Aufgabenschwerpunkte spiegeln sich auch in der Organisation der Bundesanstalt mit drei fachspezifischen Abteilungen *Quantitative Gewässerkunde*, *Qualitative Gewässerkunde* und *Ökologie*.

Zur *qualitativen Gewässerkunde* gehören folgende Referate: Hydrometrie und gewässerkundliche Begutachtung – Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen – Gewässermorphologie, Sedimentdynamik und -management – Geodatenzentrum – Geodäsie und Fernerkunden.

Zur *quantitativen Gewässerkunde* zählen: Grundsatzfragen der qualitativen Gewässerkunde – Gewässerchemie – Biochemie, Ökotoxikologie – Radiologie und Gewässermonitoring.

Auf der Webseite der Bundesanstalt ([www.bafg.de](http://www.bafg.de)) lassen sich viermal täglich erfasste Daten aus Messungen abfragen – so unter dem Link *Service* zu *Gewässergüte* am 2. Mai 2020:

*Koblenz Rhein* 11.00 Uhr (Wasserstand 165 cm – Wassertemperatur 16,1 °C – Sauerstoffgehalt in mg/l 8,2 – pH-Wert 8,1 – Leitfähigkeit  $\mu\text{S}/\text{cm}$  489 – Trübung in TE 4,2).

*Koblenz Mosel* 11.00 Uhr (Wasserstand 242 cm – Wassertemperatur 15,7 °C – Sauerstoffgehalt mg/l 10,0 – pH-Wert 8,3 – Leitfähigkeit  $\mu\text{S}/\text{cm}$  951 – Trübung TE 3,2).



## 2.2 Der hydrologische Kreislauf

Transport und Speicherung von Wasser, global und regional, werden mit dem Begriff *Wasserkreislauf* beschrieben. Innerhalb dieses Kreislaufs wechselt das Wasser mehrmals seinen Aggregatzustand.

Ozeane, Seen, Flüsse, Grundwasser, Polareis und Gletscher bilden die *Hydrosphäre* in festem, flüssigem und wenn man die Atmosphäre berücksichtigt auch gasförmigem Zustand. 97,3% des Gesamtwasservorrats auf der Erde, der nur etwa 0,3% der Erdmasse ausmacht, aber 71% der Erdoberfläche bedeckt, befinden sich in den Ozeanen.

Der *globale Wasserkreislauf* kann als eine riesige, von Sonnenenergie gespeiste Destillationsanlage aufgefasst werden – mit einer Kapazität von etwa 420 000 km<sup>3</sup> im Jahr, die zu 85% aus den Ozeanen stammen. Die *Verdunstung* ist dann am höchsten, wenn die Wasseroberfläche warm, die Luft trocken ist und eine hohe Verteilung des Wasserdampfes durch eine vertikale Verteilung bei hoher Windgeschwindigkeit erfolgen kann. Die Verdunstung von pflanzenbewachsenen Flächen wird als *Evapotranspiration* bezeichnet – zusammengesetzt aus *Evaporation* (Verdunstung aus unbelebten Oberflächen) und der *Transpiration* der Pflanzen. Eine weitere differenzierende Größe ist die *Interzeption* als Verdunstung von Niederschlagswasser zu nennen, das zunächst als Schnee auf bzw. an Pflanzen zurückgehalten wurde (s. auch Abschn. 3.2 und 3.4).

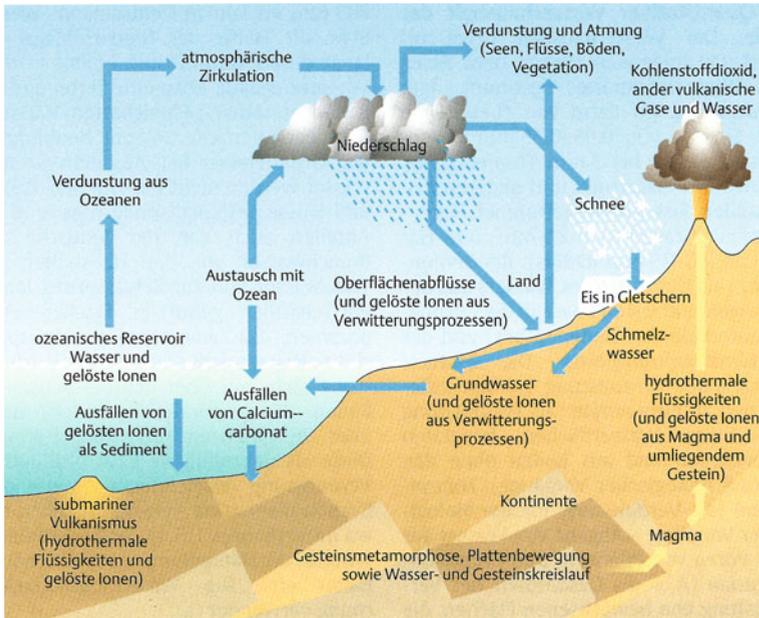
Als bedeutendste Senke für Wasser in der Atmosphäre ist die Kondensation des Wasserdampfes mit anschließendem *Ausregnen* zu nennen. Die Verweilzeiten von Wasser betragen in der Atmosphäre etwa acht bis zehn Tage, in den Ozeanen dagegen 1700–3000 Jahre.

Wasser spielt eine wesentliche Rolle bei *Verwitterungsvorgängen*, bei *Transportvorgängen* im Boden sowie bei *chemischen Umsetzungen* in Flüssen und Meeren.

Betrachtet man den in Abb. 2.2 dargestellten *hydrologischen Kreislauf* genauer, so lassen sich folgende Einzelheiten hervorheben:

Aus den Tiefen der Erdoberfläche gelangt Wasser infolge des submarinen Vulkanismus als hydrothermale Flüssigkeit in die Ozeane. Im Zusammenhang mit der Gesteinsmetamorphose und Plattenbewegungen kann Wasser vulkanischen Ursprungs auch als Mineralwasser an der Erdoberfläche austreten – nicht nur in der Folge von Vulkanausbrüchen, sondern auch über Spalten im Gestein in Form von Mineralwasserquellen.

Im Mittelpunkt des Wasserkreislaufs über der Erdoberfläche steht die *atmosphärische Zirkulation*. Ein Teil des Kreislaufes umfasst die *Verdunstung* aus den Ozeanen und die Rückkehr in die Ozeane über den Regen. Je nach Temperatur kann das aus Ozeanen verdunstete Wasser als Schnee oder Regen auf die Landoberfläche gelangen. Zu weiteren Einzelheiten eines Wasserkreislaufs sind auch die Gletscherschmelze und vor allem auch mit den Eigenschaften des Wassers zusammenhängende Vorgänge von Ausfällungen in den Gewässern als beispielsweise Calciumcarbonat (unter dem Einfluss von Kohlenstoffdioxid) oder von anderen Metallionen in Form von Sedimenten sowie die genannten *Oberflächenabflüsse* (mit darin gelösten Ionen aus Verwitterungsprozessen) zu betrachten.



**Abb. 2.2** Der hydrologische Wasserkreislauf.

Das *Grundwasser* enthält auch Ionen aus den Verwitterungsprozessen. An den Verdunstungsvorgängen sind außer den Ozeanen die Seen, Flüsse, Böden und die Vegetation beteiligt.

Chemische, geologische, biologische sowie meteorologische Vorgänge sind im komplexen *Wasserkreislauf* eng miteinander verbunden.

In vereinfachter Weise lässt sich ein *Hauptkreislauf* des Wassers zunächst von Meer zu Meer beschreiben – infolge der größeren Fläche der Ozeane gegenüber den Landflächen (etwa 70 % gegen 30 %). Etwa 10 % des aus den Meeren verdunsteten Wassers gelangen auf die Landflächen und von dort zum Teil über Flüsse wieder in die Meere zurück.

Als einen *inneren Kreislauf* kann man die Verdunstung des Wassers von der Landoberfläche und Rückkehr ebenfalls in die Meere bezeichnen. Abflüsse in die Meere erfolgen sowohl oberirdisch als auch unterirdisch über das *Grundwasser*.

Die wichtigsten Prozesse des *globalen Wasserkreislaufs* lassen sich aus den differenzierten Betrachtungen mit den Begriffen *Verdunstung*, *atmosphärischer Wassertransport*, *Niederschlag* sowie *ober- und unterirdische Abflüsse* zusammenfassen. Als treibende Kräfte sind die *Sonneneinstrahlung* (für die Verdunstung) sowie die *Gravitation* (für Niederschlag und Abflüsse) zu nennen.

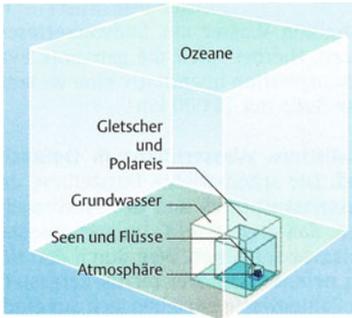
## 2.3 Das Kastenmodell der Gewässerchemie

Die *Gewässerchemie* ist ein Teilgebiet der Wasserchemie. Sie beschäftigt sich einerseits mit der chemischen Zusammensetzung in stehenden und fließenden Gewässern sowie des Niederschlags- und Grundwassers, andererseits auch mit den chemischen Reaktionen, die in diesen Gewässern stattfinden können. Beispielsweise untersucht sie den Sauerstoffhaushalt, Versalzungs-, Grenzflächen- und Eutrophierungsvorgänge, darüber hinaus biologische und bakteriologische Stoffwechselfvorgänge und deren Auswirkungen auf die chemisch-biochemischen Vorgänge insgesamt. Zu den Aufgaben der Gewässerchemie gehören auch die Beschaffenheits- und Gütebewertung eines Gewässers sowie deren Belastung durch chemische Schmutzstoffe. Weitere Aufgabengebiete sind Untersuchungen zur Selbstreinigungskraft eines Gewässers, über die Stofftransporte und zur Nutzbarkeit für die Trink- und/oder Betriebs- (Brauch-) Wasserversorgung der Bevölkerung, der Industrie und der Landwirtschaft.

Die Gewässerchemie liefert auch die Grundlagen für die *Gewässerökologie*. Diese erforscht die Zusammenhänge zwischen Gewässerstruktur (vom Teich bis zu den Fließgewässern) und den biologischen Komponenten (von den Einzellern bis zu den Fischen) als Lebensgemeinschaften. Das Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei in Berlin beschreibt seine Aufgabe als Erforschung aller grundlegenden Prozesse in Gewässern mit deren Lebensgemeinschaften und hat das Ziel, aus diesem Wissen u. a. Maßnahmen für ein nachhaltiges Gewässermanagement zu entwickeln. Die Interdisziplinarität wird an der auf ihrer Webseite ([www.igb-berlin.de](http://www.igb-berlin.de)) genannten Wissenschaften deutlich, die an diesen Forschungen beteiligt sind: Hydrologie, Chemie, Physik, Mikrobiologie, Limnologie, Fischökologie und Fischereibiologie. Die *Limnologie* ist die klassische Wissenschaft von den Binnengewässern als Ökosystemen. Sie beschäftigt sich mit dem Stoff- und Energiehaushalt, mit der biologisch-ökologischen Struktur und Funktion und auch mit der Quantifizierung biotischer und abiotischer Prozesse. Sie kann als Mutter der heutigen Gewässerökologie bezeichnet werden. Als einer der Begründer dieser Wissenschaftsdisziplin wird der Schweizer Francois-Alphonse *Forel* (1841–1912; Arzt und Naturforscher) genannt, der die Hydrobiologie durch seine Untersuchungen des Genfersees (Lac Léman) – biologisch, chemisch und physikalisch – zur Limnologie erweiterte und bereits 1892–1901 ein Handbuch zur Limnologie herausgab, mit dessen Titel *Monographie limnologique* [3] er auch den Namen prägte (in deutscher Sprache noch *Handbuch der Seenkunde*, Stuttgart 1901, genannt). In Deutschland entstand bereits 1891 die erste biologische (limnologische) Station in Plön (heute Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie) – ab 1917 als Hydrobiologische Anstalt der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft unter Leitung von August *Thienemann* (1882–1960; Zoologe), der in Deutschland durch seine Arbeiten über die ökologischen Beziehungen in Binnengewässern als Begründer der Limnologie gilt.

Das multidimensionale Kastenmodell der Gewässerchemie (Abb. 2.3) veranschaulicht als einfaches (und vereinfachendes) Bild viele der Charakteristika, die auch in komplizierten Modellen eine entscheidende Rolle spielen. Es macht zwei Wege deutlich, auf denen chemische Stoffe in den *Kasten* (die *Box*) gelangen kön-





**Abb. 2.4** Volumenmäßige Verteilung des Wassers.

Die Angaben in verschiedenen Lehrbüchern unterscheiden sich trotz der heutigen Möglichkeiten der modernen Verfahren wie der Satellitenfernerkundung. Gründe dafür sind die räumlich und zeitlich unterschiedliche Verteilung (Beispiel: Atmosphäre) sowie unterschiedliche Abgrenzungen der Bereiche (Beispiel: Grund- und Bodenwasser).

Geht man von einem Gesamtvolumen an Wasser in der Hydrosphäre von  $1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$  aus, so lassen sich den verschiedenen Bereichen folgende Anteile in Prozent zuordnen:

Etwa 97 % des auf der Erde insgesamt verfügbaren Wassers befinden sich in den Ozeanen (Weltmeeren), Gletscher und Polareis weisen einen Anteil von etwa 2 % (abnehmend) auf, gefolgt von den grundwasserführenden Schichten – *Aquifere* – genannt – mit etwa 1–2 %. In der Atmosphäre befindet sich nur ein Hunderttausendstel des verfügbaren Wassers der Erde. Beträchtlichen Schwankungen unterliegt die Wassermenge, die als Dampf und in kondensierter Form in der Atmosphäre vorhanden ist. Transport und Verteilung des Wassers auf der Erde sind zwei der wichtigsten Kennzeichen für das *Klima*. Der Wasserkreislauf – auch als *hydrologischer Zyklus* bezeichnet – wird wie bereits erwähnt durch die Sonnenenergie in Gang gehalten.

Zusätzlich zu diesen Angaben sind vor allem die globalen Unterschiede von Niederschlag, Verdunstung und Abfluss zu berücksichtigen. Meist werden Angaben zu diesem Bereich in vier Zonen eingeteilt (in Volumen/Fläche, wobei 1 mm  $1 \text{ l/cm}^2$  entspricht; nach [5]):

- den äquatorialen Bereich mit den höchsten Niederschlägen zwischen 1500 und 6000 mm pro Jahr,
- Trockengebiete in den Subtropen ( $23\text{--}40^\circ\text{C}$ ) unter 100 mm/Jahr,
- mittlere und höheren Breiten (feuchtere Gebiete) mit 300–2000 mm/Jahr,
- Polargebiete, relativ niederschlagsarm.

Von [4] wird folgende Einteilung in sieben Klimazonen beschrieben:

- immerfeuchte regenreiche Gebiete (tropischer Regenwald) mit  $> 10\,000 \text{ mm/Jahr}$ , immergrüner Passatregenwald an der Ostseite der kontinentalen Gebirgsränder und Westwindzonen an Gebirgsküsten mit jeweils 2000 mm/Jahr,
- wechselfeuchte Gebiete ohne lange Trockenzeiten (gemäßigte Zonen, z. B. Deutschland),

- wechselfeuchte Gebiete mit langer Trockenzeit (Mittelmeer, Kalifornien, Monsongebiete),
- regenarme Länder und Trockengebiete (subtropischer Hochdruckgürtel, Steppensavannen, Halbwüsten und Wüsten).

Die globale Verteilung des Abflusses unterliegt großen räumlichen Schwankungen. Tropen und auch Gebirgsregionen weisen die höchsten Abflüsse auf. In Trockengebieten liegt er unter 10 mm/Jahr.

## 2.5 Wasserhaushalt der Erde – global und regional

Der *Wasserhaushalt* insgesamt wird von folgenden Wegen bzw. Arten des Wassertransportes bestimmt: dem Niederschlag, der Verdunstung und des Wasserdampftransportes.

Beim *Niederschlag* unterscheidet man folgendes Formen:

- Nieselregen mit Tropfen von 0,05–0,25 mm Durchmesser,
- Regen mit Tropfen bis zu 3 mm Tropfenradius,
- Schnee aus Eissternen und anderen Eiskristallen, Eiskörnern (gefrorenen Regentropfen),
- Graupel und Hagel mit Radien von 1–2,5 mm bzw. 2,5–25 mm.

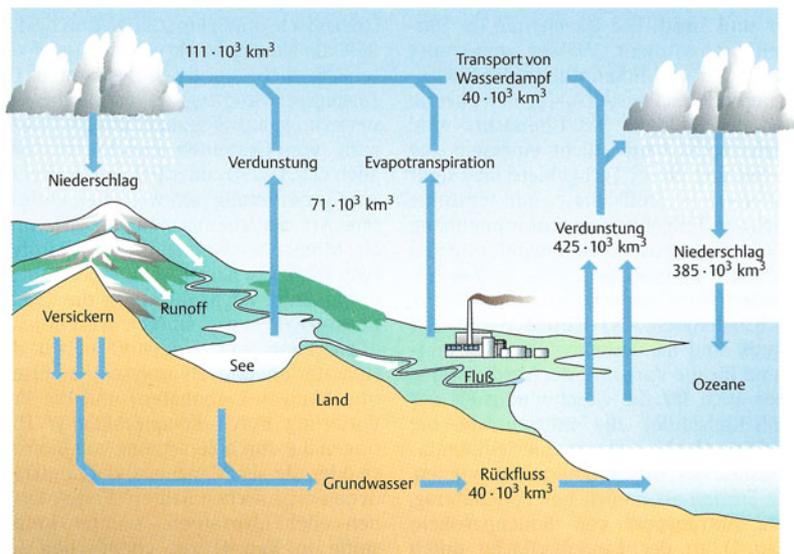
Die Erscheinungen der Verdunstung werden wie folgt differenziert:

- *Evaporation* als Verdunstung von freien Oberflächen, benetzten Oberflächen und aus Böden ohne den Einfluss biologischer Vorgänge,
- *Transpiration* als Verdunstung infolge biologischer Vorgänge; Abgabe von Wasser aus den Poren von Pflanzen,
- *Evapotranspiration* als Gesamtheit der Verdunstung von bewachsenen Flächen, die vor allem im tropischen Regenwald eine lebenswichtige Rolle spielen (s. auch in Abb. 2.2 und in Abschn. 3.2).

Im Jahr werden etwa  $40 \cdot 10^3 \text{ km}^3$  aus den Meeren über die Luft auf die Kontinente transportiert. Die Abb. 2.5 zeigt, dass die Verdunstung aus den Meeren insgesamt mehr als das Zehnfache dieses Volumens beträgt; der größte Teil davon kehrt jedoch als Niederschlag wieder in die Meere zurück.

Von dem auf die Kontinente gelangten Wasser wird ein Teil als Grundwasser zurückgehalten, der Rest fließt ebenfalls durch die Flüsse in die Ozeane zurück. Von den jährlichen etwa  $111 \cdot 10^3 \text{ km}^3$  Niederschlag auf dem Land stammen zwei Drittel aus der Verdunstung von Wasser aus Süßwasserreservoirien. Hierbei spielt die genannte Evapotranspiration mit  $71 \cdot 10^3 \text{ km}^3$  eine wesentliche Rolle.

In der Abb. 2.5 sind (ohne quantitative Angaben) auch die Vorgänge des *Runoffs*, des Abflusses von Wasser aus den mit Schnee und Eis bedeckten Gebirgen und das Versickern von Wasser in größere Tiefen dargestellt, das zum Teil in der Größenordnung von  $40 \cdot 10^3 \text{ km}^3$  auch wieder in die Ozeane zurückfließen kann.



**Abb. 2.5** Zum quantitativen Wasserhaushalt der Erde.

Bezieht man alle in der Abb. 2.5 verzeichneten Daten auf die gesamte Verdunstung von Wasser aus Ozeanen und See sowie durch die Evapotranspiration von  $496 \cdot 10^3 \text{ km}^3$ , so ergeben sich folgende relative Angaben:

77,6% des durch Verdunstung in den Wasserkreislauf gelangten Wassers kehren in die Ozeane über den Niederschlag zurück. Rechnet man noch den Rückfluss aus dem Grundwasser hinzu, so stellt man eine vollständige Rückkehr des Wassers in die Weltmeere fest; der Rückfluss aus dem Grundwasser entspricht dem Volumen, das als Wasserdampf aus den Ozeanen weitertransportiert wird.

Rechnerisch verbleibt das Volumen der Verdunstung aus den Seen und der Evapotranspiration, welches als Summe mit dem Wasserdampf aus den Meeren (insgesamt  $110 \cdot 10^3 \text{ km}^3$ ) in den verschiedenen Formen des Niederschlages auf die Landmasse gelangt.

Die schematische Darstellung des Wassertransportes zeigt auch, dass von dem Niederschlag fast zwei Drittel im Boden verbleiben: von  $111 \cdot 10^3 \text{ km}^3$  Niederschlag fließen  $40 \cdot 10^3 \text{ km}^3$  (= 36%) in die Meere.

### Mittlere Wasserbilanz für Deutschland

Nach der globalen Wasserbilanz als *Kreislauf* soll hier auch die regionale Wasserbilanz, oft auch als *Wassernutzung* bezeichnet, beschrieben werden. Der Begriff *Wasserverbrauch* ist nicht korrekt, da die Prozesse der Bildung oder des Verbrauchs von Wasser auf die Gesamtmenge des Wassers auf der Erde nur marginale Auswirkungen haben.

Als *Wasserbilanz* wird hier die Nutzung des Wassers in einer Kulturlandschaft verstanden – wie sie für ein industrialisiertes Land wie Deutschland charakteristisch ist.