

Physik aquatischer Systeme

Werner Aeschbach-Hertig

SS 2010

1 Physikalische Eigenschaften des Wassers

1.1 Der globale hydrologische Kreislauf

Der hydrologische Kreislauf oder globale Wasserkreislauf bildet den Rahmen, innerhalb dessen die einzelnen aquatischen Systeme existieren, deren Physik wir untersuchen wollen. Die *Hydrologie* befasst sich mit quantitativen Aspekten des Wasserkreislaufes, insbesondere mit der Verteilung und Dynamik des Wassers auf und unter der Erdoberfläche (z. B. Niederschlag, Speicherung, Nutzung und Abfluss in Einzugsgebieten). Im Gegensatz dazu befasst sich die aquatische Physik mit internen physikalischen Prozessen in einzelnen Subsystemen (z. B. Schichtung, Mischung und Transport in Seen und Aquiferen). Zur *Hydrosphäre* zählt man sämtliche Formen von Wasser auf und unter der Oberfläche der Erde. Dies schließt den gesamten Ozean und den globalen Wasserkreislauf ein, nachdem der Niederschlag die Erde erreicht hat. Wasser ist aber auch in den anderen Sphären präsent und wichtig: Wasserdampf in der Atmosphäre, flüssiges Wasser in der Biosphäre, Eis in der Kryosphäre. Auch die feste Erde enthält Wasser, gebunden als Kristall- und Formationswasser sowie das (zur Hydrosphäre zählende) durch den Porenraum zirkulierende Grundwasser.

70 % der Erdoberfläche sind von Ozeanen bedeckt, welche 97 % des Wassers der Hydrosphäre (inkl. Kryosphäre) enthalten. Das größte Süßwasser-Reservoir stellen die polaren Eisschilde dar, gefolgt von Grundwasser. Die wichtigsten Kompartimente des globalen Wasserkreislaufes sind in Tab. 1.1 aufgeführt und in Abb. 1.1 dargestellt, zusammen mit den Flüssen zwischen ihnen. Die Zahlen stimmen nicht exakt überein, da sie aus unterschiedlichen Quellen stammen. Aus den Ozeanen verdunsten jährlich über 400 000 km³ Wasser, wovon das meiste als direkter Niederschlag ins Meer zurückkehrt. Ein Zehntel davon, ca. 40 000 km³ Wasser, wird auf die Kontinente „exportiert“, und kehrt als Abfluss wieder zurück. Der Niederschlag von gut 110 000 km³ Wasser pro Jahr auf die Landmassen ist also zu fast $\frac{2}{3}$ „hausgemacht“ (Verdunstung von Kontinenten), nur $\frac{1}{3}$ ist vom Ozean importiert. Die mittlere Aufenthaltszeit (= Volumen/Durchfluss) des Ozeans beträgt über 3000 Jahre, diejenige des atmosphärischen Wasserdampfes nur gut 10 Tage. Auf den Kontinenten verweilt das Wasser im Mittel gut 300 Jahre, mit enormen Unterschieden zwischen verschiedenen Teilreservoirs (kurz in Flüssen und Seen, lange in Grundwasser und Eis).

Für die hydrologische Wasserbilanz entscheidende Prozesse sind Niederschlag, Verdunstung, Evapotranspiration, Oberflächenabfluss und Infiltration. Seen und Grundwasserleiter wirken als temporäre Speicher. Während für die Wasserbilanz nur die mittlere

Tab. 1.1: Kompartimente der Hydrosphäre [1]

Kompartiment	Volumen [10 ³ km ³]	% des tot. Wassers	% des Süß- wassers	Fluss [10 ³ km ³ /a]	Austausch- zeit [a]
Ozeane	1 350 000	97.3		425	3000
Süßwasser	36 000	2.7	100		
Eis	27 700		77	2.4	12 000
Grundwasser ^a	8 000		22	15	500
Seen ^b	225		0.6		
Bodenfeuchte	70		0.2	90	0.8
Atmosphäre	15		0.04	496	0.03
Flüsse	2		0.005	40	0.05
Biosphäre	2		0.005		
Total	1 390 000	100		100	

Aufenthaltszeit in diesen Speichern von Bedeutung ist, werden wir uns mit ihrer internen Struktur und den internen Transportprozessen befassen.

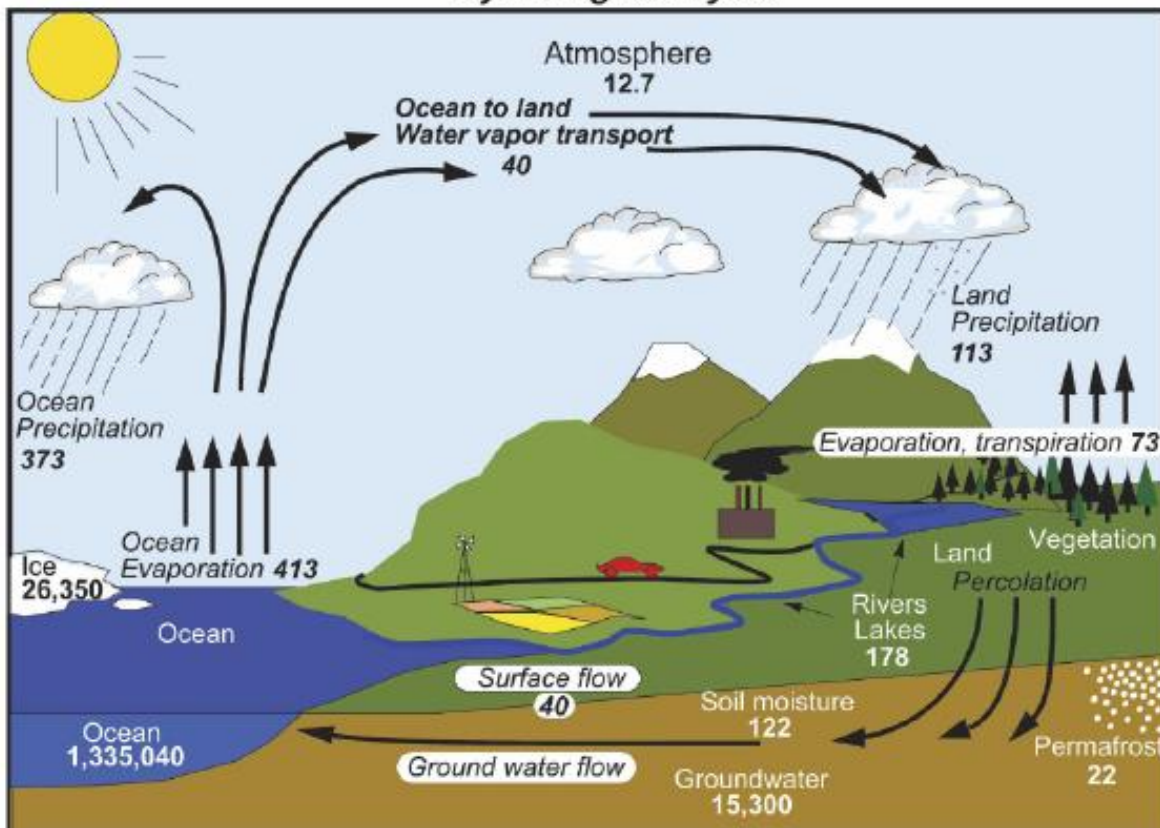
Die Verteilung des Wassers über die Erde ist sehr ungleichmäßig, wie Abb. 1.2 zeigt. Viel Niederschlag erhalten die Tropen und küstennahe Gebirge. Trocken sind die Subtropen und das Innere der großen Kontinente der Nordhalbkugel. Wasserknappheit herrscht überall dort, wo trockenes Klima mit großer (und immer noch wachsender) Bevölkerungsdichte zusammentrifft (z.B. Nordafrika, naher Osten, Nordchina, usw.). Den weitaus größten Anteil am Wasserbedarf hat die Landwirtschaft, vor allem in trockenen Gebieten, wo Bewässerung zur Nahrungsmittelproduktion unentbehrlich ist. Grob geschätzt werden zur Produktion von 1 kg Getreide 1000 kg Wasser benötigt. Weltweit wird ca. 40 % der Nahrungsmittel auf künstlich bewässertem Land erzeugt. Dadurch ist Wasserknappheit immer sehr eng mit der Sicherheit der Nahrungsmittelversorgung verknüpft. Ein Weg, um die unterschiedliche Verfügbarkeit von Wasser auszugleichen ist der weltweite Handel mit Getreide und anderen landwirtschaftlichen Erzeugnissen. Bevölkerungsreiche aber wasserarme Länder sind auf Dauer auf den Import von „virtuellem Wasser“ in Form von Getreide angewiesen.

Eine wichtige Erkenntnis ist, dass der Einfluss des Menschen auf den Wasserkreislauf heute keineswegs mehr vernachlässigbar ist. Allein zur Bewässerung werden weltweit jährlich gegen 3000 km³ Wasser aus Seen, Flüssen, und Grundwasserspeichern entnommen. Hinzu kommen über 1000 km³ für den Bedarf von Industrie und Haushalten. Der Gesamtbedarf von rund 4000 km³/a entspricht 10 % des Gesamtabflusses der Kontinente von 40 000km³/a (s. Abb. 1.1). Davon steht aber nur ein Bruchteil realistischweise für die Nutzung zur Verfügung, der auf 12.500 km³/a geschätzt wird. Somit nutzt die Menschheit heute bereits gut 30 % der nachhaltig verfügbaren Wasserressourcen.

^abis zu einer Tiefe von 5000m

^bca. zur Hälfte salziges Wasser (z.B. Kaspisches Meer: 78 000km³, S = 12 ‰)

Hydrological Cycle



Units: Thousand cubic km for storage, and *thousand cubic km/yr* for exchanges

Abb. 1.1: Wasserreservoirs und -flüsse im globalen hydrologischen Kreislauf. [2] Zahlen bezeichnen Volumina in 10^3 km^3 (s. Tab. 1.1) bzw. Flüsse (kursiv) in $10^3 \text{ km}^3/\text{a}$. Der totale globale Verdunstungs- bzw. Niederschlagsfluss beträgt rund $500 \cdot 10^3 \text{ km}^3/\text{a}$, oder knapp 1000 mm/a bezogen auf die Oberfläche der Erde.

Abb. 1.3 zeigt, wo wie viele Menschen von Wasserknappheit betroffen sind. Als Grenzwert für „Wasserstress“ wird dabei ein Verhältnis von Gesamtbedarf (DIA = Domestic + Industrial + Agricultural Water Demand) zu verfügbarem Abfluss (Q) von 0.4 definiert. Dunkelrote Gebiete (z.B. in China und Indien) bedeuten, dass sehr viele Menschen mit knappen Wasserreserven leben müssen. In dunkelblauen Gebieten ist trotz hoher Bevölkerungsdichte noch ausreichend Wasser verfügbar.

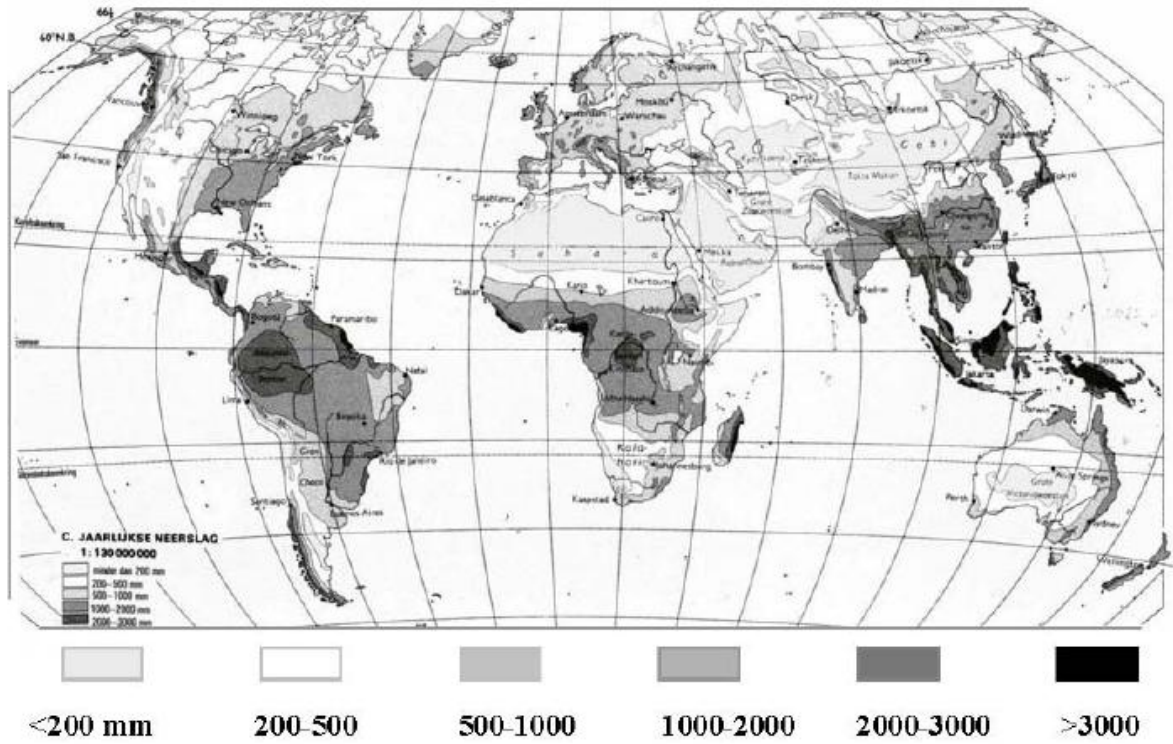


Abb. 1.2: Globale Verteilung des jährlichen Niederschlags. [1]

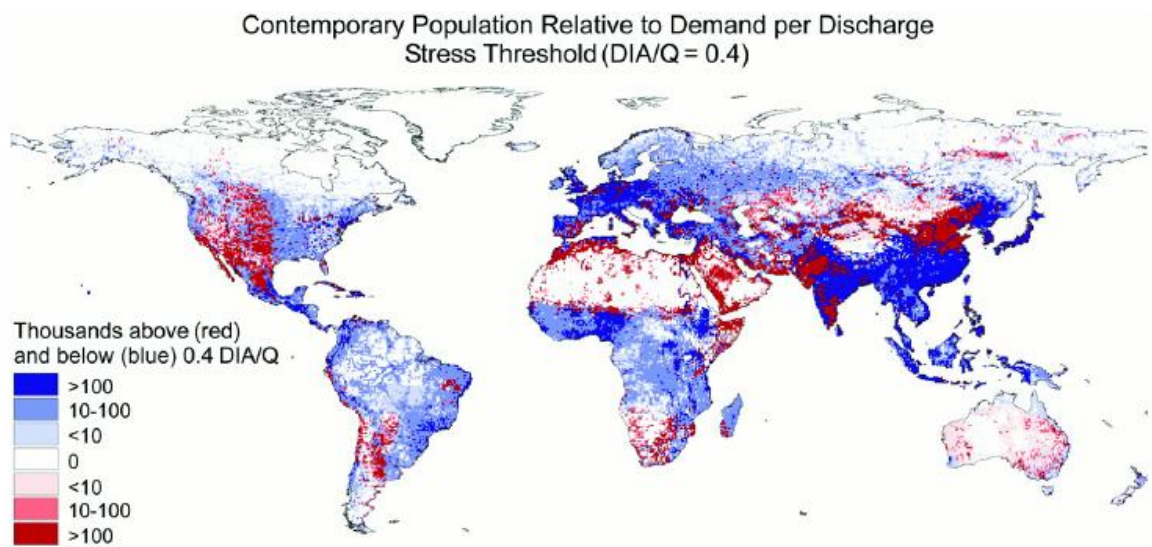


Abb. 1.3: Globale Verteilung der Bevölkerung und ihre Exposition bezüglich „Wasserstress“. [3]

1.2 Bedeutung des Wassers in der Umwelt

Der hydrologische Kreislauf durchdringt und verbindet Lithosphäre, Atmosphäre und Biosphäre. Angetrieben durch die Sonnenstrahlung transportiert der Wasserkreislauf neben dem Wasser selber Energie sowie Mineral- und Nährstoffe zwischen allen Teilen der Umwelt. Wasser ist ein zentraler Teil der globalen „Klimamaschine“. Der Ozean speichert große Wärmemengen und transportiert sie über weite Strecken. Bei Verdunstung und Kondensation werden bedeutende Energiemengen umgesetzt. Wasserdampf absorbiert Infrarotstrahlung und liefert den größten Beitrag zum natürlichen Treibhauseffekt, andererseits reflektieren Wolken die einfallende Sonnenstrahlung. Von Bedeutung ist auch der Austausch von Spurengasen zwischen Ozean und Atmosphäre, insbesondere für das sehr gut lösliche Treibhausgas CO_2 .

Wasser spielt eine wichtige Rolle bei Verwitterungsprozessen und der Erosion. Flüsse transportieren große Mengen von Feststoffen als suspendiertes Feinmaterial oder als Geschiebe und formen so die Landschaft mit Tälern und Schwemmebenen. Gletscher hinterlassen ebenfalls markante Spuren. Wasser löst und transportiert Mineralstoffe, deren Ablagerung unter gewissen geochemischen Bedingungen zur Bildung von Erzlagerstätten führen kann.

Das für die Biosphäre und die menschliche Zivilisation verfügbare Oberflächenwasser stellt einen vergleichsweise winzigen Bruchteil des gesamten Wasservorkommens dar (vgl. Tab. 1.1). Dennoch ist Wasser das häufigste Molekül der Biosphäre. Es ist einer der anorganischen Rohstoffe, aus denen in der Photosynthese organisches Material synthetisiert wird. Den Lebewesen dient Wasser u.a. für den Transport von Nährstoffen und Ionen und für die Regulierung ihres Wärmehaushalts. Wasser ist das Medium der chemischen Reaktion des Lebens. In fast all seinen physikalischen Eigenschaften ist Wasser entweder einzigartig oder befindet sich zumindest bei einem Extremwert des Eigenschaftsbereichs. Seinen ungewöhnlichen physikalischen Eigenschaften liegt seine polare Molekülstruktur und spezielle Chemie (H-Brücken) zugrunde. Auf diese chemischen und physikalischen Besonderheiten wiederum ist die physikalische, chemische und biologische Bedeutung des Wassers in der Umwelt zurückzuführen. Tabelle 1.2 gibt einen ersten Überblick über die physikalischen Besonderheiten von Wasser. Zahlenwerte für die wichtigsten physikalischen Eigenschaften finden sich in den Tabellen 1.4 bis 1.6. Auf die meisten der in diesen Tabellen aufgeführten Eigenschaften werden wir im Folgenden ausführlich zu sprechen kommen. Im Zentrum steht dabei die sehr spezielle Form der so genannten Zustandsgleichung des Wassers, d.h. der Gleichung, welche die Dichte als Funktion des Druckes, der Temperatur und der Salinität beschreibt. Ebenfalls wichtig für die Rolle von Wasser in der Umwelt sind seine spezifische und latente Wärme, sowie die Transportprozesse für Wärme und gelöste Stoffe im Wasser. Im Folgenden behandeln wir zunächst die mit dem Wärme- und Stofftransport zusammenhängenden Eigenschaften des Wassers, danach (Kap. 2) die verschiedenen Faktoren, welche die Dichte des Wassers beeinflussen.

Tab. 1.2: Einige außerordentliche physikalische Eigenschaften von Wasser [4]

Eigenschaft	Vergleich mit anderen Substanzen	Implikationen für Geo- und Biosphäre
Spezifische Wärme (auf die Masse bezogen)	Größer als diejenige aller anderen relevanten natürlichen Flüssigkeiten und Festkörper	Schützt die Umwelt vor extremen Temperaturschwankungen. Transport von Wärme in der Hydrosphäre, vor allem im Meer, ist groß und klimarelevant.
Latente Schmelzwärme	Größer als diejenige aller anderen Substanzen außer NH_3 .	Stabilisierung der Umgebungstemperatur beim Schmelzpunkt durch Gefrieren und Auftauen.
Latente Verdampfungswärme	Größer als diejenige aller anderen Substanzen	Die Verdampfungswärme ist entscheidend für die Regulierung der Umgebungstemperatur. Unterschiede zwischen Tag und Nacht werden verkleinert.
Thermische Ausdehnung	Wasser hat eine Temperatur max. Dichte oberhalb des Gefrierpunktes (Temperatur-Anomalie). Für Meerwasser verschwindet die Anomalie.	Süßwasserseen sind unterhalb 4°C invers geschichtet und können so gefrieren.
Oberflächen- spannung	Maximal unter allen Flüssigkeiten	Wichtig für die Physiologie der Zelle, bestimmt die Tropfenbildung.
Lösungsvermögen	Groß	Für viele biologische und chemische Prozesse wichtig.
Wärmeleitfähigkeit	Am größten unter allen Flüssigkeiten	Relevant für kleine Skalen (z. B. Zelle). Über große Distanzen dominiert der Wärmetransport durch Advektion.
Molekulare Viskosität	Relativ klein im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten	Fließt bei gegebenem Druckgradient relativ gut.
Transparenz	Relativ groß	Im sichtbaren Bereich ist die Lichtabsorption relativ klein, nicht so im Infrarot und UV. Dies ermöglicht die Photosynthese auch in großer Wassertiefe.

1.3 Spezifische Wärme, Umwandlungswärme, Dampfdruck

Die spezifische Wärme bei konstantem Druck, c_p , beschreibt die Änderung der Temperatur (der „fühlbaren“ Wärme) pro Masse und Energiezufuhr. Die Umwandlungswärme (latente Wärme L) beschreibt den Energiebedarf (bzw. die Energiefreisetzung) bei einer Phasenumwandlung (fest, flüssig, gasförmig) pro Masse bei konstanter Temperatur. Die Werte von c_p , Schmelz- (L_S) und Verdampfungswärme (L_V) für Wasser (bzw. Eis oder Wasserdampf) werden in Tab. 1.3 mit typischen Werten anderer Substanzen verglichen. Man beachte, dass nur leichte Gase wie H_2 und He eine höhere spezifische Wärme als Wasser besitzen, und die Verdampfungswärme von keiner anderen Substanz übertroffen wird.

Tab. 1.3: Spezifische Wärme c_p und Umwandlungswärme von Wasser im Vergleich zu anderen Stoffen (siehe auch Tab. 1.4)

Eigenschaft		Wasser	andere Substanzen
Spez. Wärme c_p bei 25°C	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	$4.18 \cdot 10^3$ ^a	Al: $0.90 \cdot 10^3$ Fe: $0.44 \cdot 10^3$ H ₂ -Gas: $14.3 \cdot 10^3$ He: $5.18 \cdot 10^3$
Eis bei 0°C	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	$2.11 \cdot 10^3$	
Verdampfungswärme L_V bei 25°C	[J kg ⁻¹]	$2.44 \cdot 10^6$	CO ₂ (0°C): $2.32 \cdot 10^5$ NH ₃ (0°C): $1.26 \cdot 10^6$
Schmelzwärme L_S bei 0°C	[J kg ⁻¹]	$3.34 \cdot 10^5$	

Eine kleine Rechnung zeigt die Bedeutung der Verdampfungswärme. Pro Jahr verdunsten $496 \cdot 10^3$ km³ oder ca. $5 \cdot 10^{17}$ kg Wasser (vgl. Abb. 1.1). Dies benötigt eine Energie von $1.2 \cdot 10^{24}$ J/a. Die solare Einstrahlung auf die Erde beträgt $5.4 \cdot 10^{24}$ J/a. Davon wird ca. ein Drittel direkt reflektiert, so dass an der Erdoberfläche nur rund $3.6 \cdot 10^{24}$ J/a einfallen. Ein Drittel der verfügbaren Sonnenenergie wird also im Wasserdampf zwischengespeichert!

Eine weitere wichtige Größe beim Phasenübergang von flüssigem Wasser zu Wasserdampf ist der Sättigungsdampfdruck. Dieser ist stark temperaturabhängig. Er lässt sich aus der Clausius-Clapeyron Gleichung berechnen:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{nL_V}{T(V_{gas} - V_{fl})}$$

Mit $V_{gas} \gg V_{fl}$ und $pV_{gas} = nRT$ ergibt sich

$$\frac{dp}{dT} = \frac{pL_V}{RT^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{dp}{p} = \frac{L_V}{R} \frac{dT}{T^2}$$

^azwischen 0 und 100°C variiert c_p nur ungefähr 1% (s. Tab. 1.4)

Durch Integration erhält man

$$\ln \frac{p(T)}{p(T_0)} = -\frac{L_V}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

bzw. für den Wasserdampfdruck in Sättigung, der meist mit e_S abgekürzt wird:

$$e_S(T) = e_S(T_0) \cdot \exp \left[-\frac{L_V}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (1.1)$$

Der Sättigungsdampfdruck wächst also exponentiell mit der Temperatur an. Mit konstantem Wert für L_V ergibt obige Gleichung jeweils nur für einen eingeschränkten Temperaturbereich eine gute Beschreibung der Dampfdruckkurve, z. B. für niedrige Temperaturen mit den Werten $T_0 = 0^\circ\text{C}$, $e_S(T_0) = 6.11 \text{ mbar}$, $L_V = 2.5 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ und $R = 461.5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (spezielle Gaskonstante = molare Gaskonstante / Molgewicht von Wasser). In der Praxis sind daher andere Näherungsformeln für den Wasserdampfdruck als Funktion der Temperatur weit verbreitet, z.B. die Magnusformel:

$$e_S(T) = 6.17 \text{ hPa} \cdot 10^{\frac{7.5T[^\circ\text{C}]}{238+T[^\circ\text{C}]}} \quad (1.2)$$

Tab. 1.4: Einige physikalische Eigenschaften von Wasser bei Atmosphärendruck

Temp. T [$^\circ\text{C}$]	Dampfdruck e_S [mbar]	Spez. Wärme c_P [$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$]	Verdampfungs- wärme L_V [10^6 J kg^{-1}]	Molek. Diff. für Wärme D_T [$10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$]	Kinemat. Viskosität ν [$10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$]
0	6.1	4217.4	2.501	0.134	1.787
5	8.7		2.489		1.519
10	12.3	4191.9	2.477	0.138	1.307
15	17.0		2.465		1.140
20	23.3	4181.6	2.454	0.142	1.004
25	31.6		2.442		0.893
30	42.3	4178.2	2.430	0.146	0.801
35	56.2		2.415		0.724
40	73.8	4178.3	2.406	0.152	0.658
45	95.8		2.391		0.602
50	123.0	4180.4	2.382		0.553
60	199.0	4184.1	2.357	0.158	0.475
70	311.0	4189.3	2.333		0.413
80	473.0	4196.1	2.308	0.164	0.365
90	701.0	4204.8	2.283		0.326
100	1013.0	4215.7	2.257	0.166	0.294

Tab. 1.4 gibt Zahlenwerte für den Dampfdruck e_S , die spezifische Wärme c_p , die Verdampfungswärme L_V , sowie weitere physikalische Eigenschaften von Wasser (s. Abschnitt 1.4) im Temperaturbereich zwischen $T = 0^\circ\text{C}$ und 100°C .

1.4 Wärmeleitfähigkeit, molekulare Diffusion und Viskosität

In flüssigen und gasförmigen Medien können Wärme und Masse auf zwei Arten transportiert werden: (1) Durch molekulare Prozesse und (2) durch makroskopische Bewegungen in der Trägersubstanz (Flüssigkeit, Gas). Der erste Prozess (er tritt auch in festen Körpern auf) beruht auf der molekularen Temperaturbewegung; entsprechend heißen die Transportkoeffizienten „molekulare Wärmeleitfähigkeit“ bzw. „molekulare Diffusivität“. Diese Koeffizienten sind stoffspezifisch.

Bemerkung: Prozesse der zweiten Art heißen advektiv oder turbulent; sie werden im Kapitel 4 besprochen.

Molekulare Diffusion von Wärme (Wärmeleitfähigkeit)

Definition:

$$j_{th} = -\gamma \frac{\partial T}{\partial x} \quad [\text{W m}^{-2}] = [\text{J s}^{-1} \text{ m}^{-2}] \quad (1.3)$$

j_{th}	Fluss thermischer Energie pro Zeit und Fläche	$[\text{W m}^{-2}]$
$\frac{\partial T}{\partial x}$	Temperaturgradient	$[\text{K m}^{-1}]$
γ	Wärmeleitfähigkeit	$[\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}]$

Oft wird auch der „Temperaturfluss“ zur Beschreibung der Wärmeleitung benützt:

Definition:

$$j_T = -D_T \frac{\partial T}{\partial x} \quad [\text{K m s}^{-1}] \quad (1.4)$$

j_T	„Temperaturfluss“ pro Zeit	$[\text{K m s}^{-1}]$
D_T	molekularer Diffusionskoeffizient für Wärme	$[\text{m}^2 \text{ s}^{-1}]$

Zusammenhang von (1.3) und (1.4):

$$j_{th} = c_p \rho j_T, \quad \gamma = c_p \rho D_T$$

c_p	spezifische Wärme, für Wasser $4.18 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
ρ	Dichte, für Wasser 1000 kg m^{-3}

Typische Werte für γ und D_T sind in Tab. 1.5 zusammengestellt.

Tab. 1.5: Zahlen zur Wärmeleitfähigkeit (vgl. auch Tab. 1.3)

			0°C	10°C	20°C
Wasser	γ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	0.564	0.578	0.598
	D_T	[10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹]	0.134	0.138	0.142
Eis	D_T	[10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹]	1.20	(sinkt mit Lufteinschluss)	zunehmendem
Eisen	γ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	bei 25°C		80.3
Aluminium				237	
Kupfer				398	

Bemerkung: Man kann die Wärmeleitgleichung (1.3) benützen, um die lokale Temperaturänderung als Folge der Wärmediffusion zu berechnen. Dieser Übergang entspricht demjenigen vom ersten zum zweiten Fick'schen Gesetz der molekularen Diffusion (vgl. unten):

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{1}{c_p \rho} \frac{\partial j_{th}}{\partial x} = \frac{\gamma}{c_p \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = D_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1.5)$$

Um die Analogie zwischen Wärmeleitung und Stoffdiffusion (Gl. 1.7) zu verdeutlichen, benutzt man daher oft D_T statt γ .

Molekulare Diffusion in Wasser

1. Fick'sches Gesetz

$$j_C = -D_C \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1.6)$$

j_C	Fluss der (gelösten) Substanz	[mol m ⁻² s ⁻¹]
$\frac{\partial C}{\partial x}$	Konzentrationsgradient der (gelösten) Substanz	[mol m ⁻⁴]
D_C	molekularer Diffusionskoeffizient für die Substanz mit Konzentration C (wässrige Lösung)	[m ² s ⁻¹]

2. Fick'sches Gesetz

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial j_C}{\partial x} = D_C \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1.7)$$

Typische **molekulare Diffusionskoeffizienten** in Wasser bei 20°C; Werte in [10⁻⁸m²s⁻¹]:

Kationen: H⁺: 0.85, Na⁺: 0.119, K⁺: 0.175, NH₄⁺: 0.177, Mg⁺⁺: 0.063, Ca⁺⁺: 0.071
 Anionen: OH⁻: 0.471, NO₃⁻: 0.169, HCO₃⁻: 0.11, CO₃⁻: 0.083, SO₄⁻: 0.094, HS⁻: 0.092
 Gase: Luft: 0.194, O₂: 0.202, N₂: 0.177, CO₂: 0.174, CH₄: 0.157, Rn: 0.121

Viskosität

Flüssigkeiten sind mehr (Öl) oder weniger (Wasser) zäh, d.h. sie besitzen eine innere Reibung, welche dazu führt, dass die Bewegung (der Impuls) eines Flüssigkeitspaketes auf seine Umgebung übertragen wird.

Definition:

$$\tau = (-)\mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad [\text{N m}^{-2}] \quad (1.8)$$

τ	Schubspannung („shear stress“)	$[\text{N m}^{-2}]$
μ	dynamische Viskosität	$[\text{N m}^{-2}\text{s}] = [\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}]$
u	Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung	$[\text{m s}^{-1}]$
$\frac{\partial u}{\partial z}$	Geschwindigkeitsgradient in z-Richtung	$[\text{s}^{-1}]$

Definition: Kinematische Viskosität

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \quad (1.9)$$

Eine Schubspannung wird im Allgemeinen als positive Größe definiert. In Analogie zu den Gleichungen (1.3) und (1.6) müsste man ihr eigentlich auch ein Vorzeichen geben und dann auf der rechten Seite von (1.8) ein Minuszeichen einführen. Dann wäre (für den eindimensionalen Fall) das Analogon des 2. Fick'schen Gesetzes:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial \tau}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1.10)$$

bzw.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} . \quad (1.11)$$

Die kinematische Viskosität ist somit jene Größe, die man mit D_T oder D_C vergleichen kann; sie hat ja auch die *gleiche Dimension*. Werte finden sich in Tab. 1.6.

Tab. 1.6: Zahlen zur Viskosität von Flüssigkeiten: (vgl. auch Tab. 1.4)

			0°C	10°C	20°C	30°C
Wasser	μ	$[10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}]$	1.79	1.31	1.00	0.80
	ν	$[10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}]$	1.79	1.31	1.00	0.80
Aceton	μ	$[10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}]$	0.40			0.30
Glycerin			12 100		1 490	630
Glukose					$9.1 \cdot 10^{15}$ (bei 22°C)	$6.6 \cdot 10^{13}$

Bemerkung: Drückt man alle Eigenschaften in den Stoffgrößen aus, welche die Dimension $[L^2T^{-1}]$ besitzen, so gilt für Wasser folgende Größenrangfolge:

Kinematische Viskosität ν	$\sim 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Wärmeleitung D_T	$\sim 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Molekulare Diffusion von Ionen D_C	$\sim 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$