

# Wolkenschnüffler



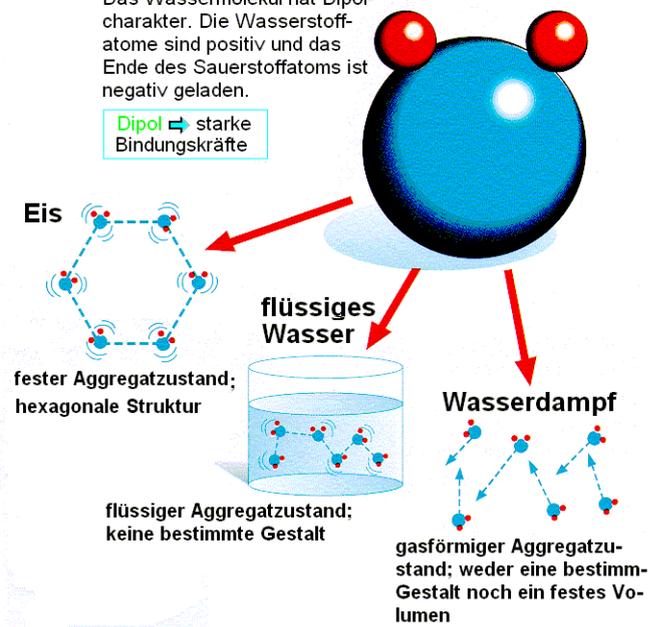
## Allgemeine Meteorologie - Wolken- und Niederschlagskunde -

### Erscheinungsformen des Wassers

Das Wassermolekül hat Dipolcharakter. Die Wasserstoffatome sind positiv und das Ende des Sauerstoffatoms ist negativ geladen.

Dipol → starke Bindungskräfte

Wassermolekül  
Sauerstoffatom  
Wasserstoffatom



## Das Wasser

Michael F. H. Krutina

# Inhaltsverzeichnis

	Seitenzahl
1. Bedeutung des Wassers	1
2. Wassermengen und -kreislauf	3
2.1 Offener Wasserkreislauf von Deutschland	4
2.1 Wasserbilanz der Erde	6
3. Das Wassermolekül	9
3.1 Das Modell des Atoms	9
3.1.1 Atomare Bestandteile	9
3.1.2 Energie und Bahnen von Elektronen	10
3.1.3 Wasserstoffbrücken	13
3.1.4 Bedeutung der molekularen Bindungskräfte von Stoffen	15
3.2 Besonderheiten des Wassers	17
3.2.1 Hohe Siede- und Schmelztemperatur	17
3.2.2 Große spezifische Wärmekapazität	18
3.2.3 Starke Oberflächenspannung	18
3.2.4 Hohe latente Wärmeenergie	19
3.2.5 Starke Adhäsion	21
3.2.6 Gute Lösungsfähigkeit	22
3.2.7 Größte Dichte bei 4 °C	22
3.3 Phasenänderungen des Wassers bei Wärmezufuhr	23
3.3.1 Erwärmen von Eis bis zum Schmelzpunkt	23
3.3.2 Schmelzen von Eis ohne Temperaturänderung	24
3.3.3 Erwärmen von Wasser bis zum Siedepunkt	24
3.3.4 Verdampfen von Wasser ohne Temperaturänderung	25
3.3.5 Erwärmen von Wasserdampf	26
4 Unterkühltes Wasser	27
Register	29
Literaturverzeichnis	33

## Verwendete Abkürzungen für Abbildungen, Formeln und Tabellen

- Abb. : Abbildung
- Form. : Formel
- Tab. : Tabelle

# 1. Bedeutung des Wassers

Eine der wichtigsten Substanzen der Fauna und Flora unserer Erde ist das Wasser, weil diese Flüssigkeit nahezu in allen Lebensbereichen eine entscheidende Rolle spielt.

Wasser ist zum Beispiel

- Bestandteil der Organismen (über 60% aller lebenden Masse besteht aus Wasser);
- Lösungsmittel für viele Substanzen;
- Grundnahrungsmittel (der menschliche Körper verliert täglich durch Transpiration etwa 1 - 2 kg Wasser, ein großer Birke verdunstet über 100 kg Wasser pro Tag),
- wichtigster Energieregler für den Wärmehaushalt der Atmosphäre,
- Transportmittel (Schifffahrt, Abwasser),
- Energieträger (Wasserkraft, Dampfturbine, Wärmespeichungsvermögen).

In den humiden, den feuchten Gebieten der Erde, ist Wasser im Überschuss vorhanden, so dass dessen Wert lange Zeit weit unterschätzt wurde. In den arideren, den trockenen Regionen unserer Welt, die lange jährliche Dürreperioden aufweisen, betrachten die Bewohner das Wasser von jeher als kostbares Gut.

Wasser tritt bei den in der Troposphäre - der Wetterschicht und Aufenthaltsregion des Menschen - herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen in den drei Aggregatzuständen (thermodynamische Phasen) Wasserdampf, flüssiges Wasser und Eis auf.

## Aggregatzustände von Wasser in der Troposphäre (Tab. 1)

Aggregatzustand	Bezeichnung	Troposphäre	
fest	Eis	Mittlere Luftdruck und -temperaturwerte	
flüssig	Wasser		
gasförmig	Wasserdampf	1013 hPa in NN	15 °C
		226 hPa in 11 km Höhe	-57 °C

Der Wasserdampf stellt den gasförmigen Aggregatzustand des Wassers dar und ist ein unsichtbares und geruchloses Gas, das durch Verdampfung oder Verdunstung (Verdampfung in offener Umgebung) von flüssigem Wasser entsteht und durch Kondensation wieder in den flüssigen Zustand übergeht.

Der direkte Phasenübergang von Eis in Wasserdampf wird als Eisverdunstung oder Sublimation und der umgekehrte Vorgang als Deposition oder Sublimation bezeichnet.

Der Teil- oder Partialdruck des Wasserdampfes innerhalb des Gasgemisches Luft, der `Wasserdampfdruck`, meist `Dampfdruck e` genannt, kann bei einer gegebenen Temperatur einen Maximalwert, den `Sättigungsdampfdruck E', nicht überschreiten. Dieser Wert steigt und sinkt mit der Temperatur, so dass der dabei überschüssige Wasserdampf zu Wolken und Tau kondensieren, oder auch zu Reif sublimieren kann. Der Wasserdampf hat daher wie die Lufttemperatur einen ausgesprochenen Tages- und Jahresgang. Er nimmt mit der Temperatur sowohl vom Äquator zu den Polen hin als auch vom Erdboden mit der Höhe ab und seine Verteilung ist aufgrund der temperaturabhängigen Phasenübergänge starken zeitlichen und räumlichen Schwankungen unterworfen.

Der für den Energiehaushalt der Erde und das Leben auf diesem Planeten so wichtige Kreislauf (s. 2.) des Wassers beginnt mit der Verdunstung des flüssigen Wassers an der Erdoberfläche und von den Vegetation (Pflanzentranspiration) und schließt sich mit dem aus den Wolken ausfallenden Niederschlag.

Wasserdampf absorbiert einen großen Anteil der langwelligen Infrarotstrahlung der Erdoberfläche im Wellenlängenbereich von 5 - 7  $\mu\text{m}$  und vermindert so den Strahlungsverlust der Erde. Die durch Kondensation oder Sublimation aus dem Wasserdampf entstandenen Wolken haben zwar dieselbe Wirkung, reduzieren allerdings durch ihr stärkeres Reflexionsvermögen im sichtbaren Wellenlängenbereich auch den Gewinn an solarer Strahlung.

Bei den Aggregatzustandswechseln des Wassers werden große Energiebeiträge, latente Wärmeenergie genannt, umgesetzt, d.h. benötigt oder freigegeben. Weil alle diese Phasenumwandlungen überwiegend am Erdboden oder in der Troposphäre auftreten und der Wasserdampf weiterhin für die Absorption und Emission von Wärmestrahlung von großer Bedeutung ist, spielt er beim Energieaustausch und -transport eine entscheidende Rolle und ist damit für die Meteorologie das wichtigste Gas der Atmosphäre.

## 2. Wassermengen und -kreislauf

Über die Wassermengen, die der Planet Erde in flüssiger, fester und gasförmiger Form bereitstellt, gibt die folgende Tabelle von W. Meinardus (1928) und Hoinkes (1968) eine Übersicht:

**Wassermengen der Erde in flüssiger, fester und gasförmiger Form (Tab. 2)**

Region	Wassermenge	
	Volumen	Prozentualer Anteil
Weltmeere	$1348000 \cdot 10^3 \text{ km}^3$	97,39 %
Polareis, Meereis, Gletscher	$27820 \cdot 10^3 \text{ km}^3$	2,01 %
Grundwasser, Bodenfeuchte	$8062 \cdot 10^3 \text{ km}^3$	0,58 %
Seen und Flüsse	$225 \cdot 10^3 \text{ km}^3$	0,02 %
Atmosphäre	$13 \cdot 10^3 \text{ km}^3$	0,001 %
<i>Summe</i>	$1384120 \cdot 10^3 \text{ km}^3$	100,00 %
<i>Anteil des Süßwassers</i>	$36020 \cdot 10^3 \text{ km}^3$	2,6 %

Quelle: [1]

**Süßwassermengen der Erde (Tab. 3)**

Region	Wassermenge in Prozent
Polareis, Meereis, Gletscher	77,23 %
Grundwasser bis 800 m Tiefe	9,86 %
Grundwasser von 800 m bis 4000 m Tiefe	12,35 %
Bodenfeuchte	0,17 %
Seen	0,35 %
Flüsse	0,003 %
hydrierte Erdminerale	0,001 %
Pflanzen, Tiere, Menschen	0,003 %
Atmosphäre	0,04 %
<i>Summe</i>	100,00 %

Quelle: [1]

Nur 2.6%, nämlich  $36020000 \text{ km}^3$  (36 Millionen  $\text{km}^3$ ) der Gesamtwassermenge der Erde von  $1384120000 \text{ km}^3$  (1,4 Milliarden  $\text{km}^3$ ) besteht aus Süßwasser, das vor allen Dingen im Eis der Polargebiete und in den Gletschern der Hochgebirge gespeichert ist.

Ein Teil dieser Wasservorräte der Erde befindet sich in einem stetigen Kreislauf und Phasenwechsel. Von den Meeres- und Landflächen verdunstet oder verdampft Wasser. Der dadurch entstehende Wasserdampf kondensiert in der Troposphäre durch vertikale Abkühlung zu Wolken.

Der Kreislauf schließt sich dann wieder, wenn das als Niederschlag aus den Wolken ausfallende Wasser den Erdboden in fester oder flüssiger Form erreicht. Dort wird es von der Vegetation aufgefangen bzw. zurückgehalten (Interzeption), an der Erdoberfläche in Pfützen, Seen und Sümpfen gespeichert, wo es wieder verdunstet, und durch den Oberflächenabfluss über Bäche und Flüsse zum Meer hin transportiert. Wasser dringt auch in den Erdboden ein, wird zum Teil als Grundwasser zurückgehalten und gelangt dann wieder direkt oder über Flüsse zum Meer. Ein Teil wird von der Vegetation aufgenommen und verdunstet von dieser, ein Teil verdunstet durch die Poren des Erdbodens oder direkt von der feuchten Erdoberfläche.

Die Verdunstung von Wasseroberflächen und vom unbewachsenen Erdboden wird Evaporation, die durch Lebewesen, insbesondere der Vegetation, Transpiration genannt. Da beide Begriffe nur schwer zu trennen sind, wurden sie zu der Bezeichnung Evapotranspiration zusammengefasst.

## 2.1 Offener Wasserkreislauf von Deutschland

Der Wasserkreislauf von Deutschland, dessen Grundlage die deutschen 30-jährigen Mittelwerte (Referenzperiode) der Niederschlagsmengen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) von 1961 bis 1990 darstellen, wird als offener Wasserkreislauf bezeichnet, weil der Wasser- und Wasserdampftransport über die Landesgrenzen hinweg berücksichtigt wurde.

Über Luftströmungen gelangen  $298 \text{ l m}^{-2}$  Wasser ( $779 \text{ l m}^{-2}$  fallender Niederschlag minus  $481 \text{ l m}^{-2}$  Verdunstung) nach Deutschland - in der Abb. 1 nur indirekt enthalten - und über Flüsse verbucht die Bundesrepublik einen Wassergewinn von  $199 \text{ l m}^{-2}$ .

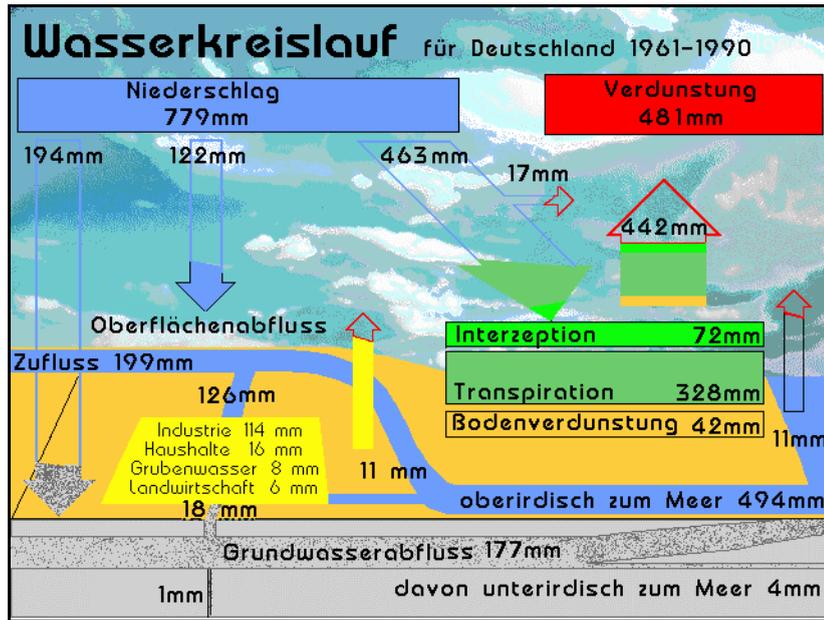
### Verteilung des mittleren jährlichen Niederschlags im Wasserkreislauf (Tab. 4)

Niederschlagsmenge in Deutschland: $779 \text{ l m}^{-2}$ (100 %); davon	
ins Grundwasser 24,9 %	$194 \text{ l m}^{-2}$
Oberflächenabfluss 15,7 %	$122 \text{ l m}^{-2}$
	$463 \text{ l m}^{-2}$
Verdunstung und Interzeption 59,4 %	Verdunstung $392 \text{ l m}^{-2}$
	Interzeption $72 \text{ l m}^{-2}$

Quelle: [4]

1 Millimeter (mm) Niederschlagshöhe entspricht einer Wassermenge von 1 Liter pro Quadratmeter ( $1 \text{ l m}^{-2}$ ).

### Wasserkreislauf für Deutschland 1961 bis 1990 (Abb. 1)



Quelle: [4]

Bei der Summenbildung können Rundungsfehler von 1 mm auftreten.

1 Millimeter (mm) Niederschlagshöhe entspricht einer Wassermenge von 1 Liter pro Quadratmeter (l m<sup>-2</sup>).

### Oberflächenabfluss zum Meer im Wasserkreislauf von Deutschland (Tab. 5)

<b>Wassermenge Oberflächenabfluss zum Meer: 494 l m<sup>-2</sup> (100 %), davon</b>	
Zufluss durch Grenzflüsse 40,3 %	199 l m <sup>-2</sup>
Wasserzufuhr durch Niederschlag 24,7 %	122 l m <sup>-2</sup>
Wasserzufuhr über Grundwasser 35,0 % (z.B. über Bäche und Flüsse)	173 l m <sup>-2</sup>

Quelle: [4]

1 Millimeter (mm) Niederschlagshöhe entspricht einer Wassermenge von 1 Liter pro Quadratmeter (l m<sup>-2</sup>).

### Grundwasserzufuhr durch Niederschlag im Wasserkreislauf (Tab. 6)

<b>Durch Niederschlag zugeführte Grundwassermenge: 194 l m<sup>-2</sup> (100 %), davon</b>	
	177 l m <sup>-2</sup>
Grundwasserabfluss ins Meer 91,2 %	z.B. über Bäche und Flüsse 173 l m <sup>-2</sup>
	unterirdisch ins Meer 4 l m <sup>-2</sup>
anthropogene Grundwasserentnahme 9,3 %	18 l m <sup>-2</sup>

Quelle: [4]

### Anthropogener Kreislauf im primären Wasserkreislauf von Deutschland (Tab. 7)

<b>Aus dem primären Kreislauf verwendete anthropogene Wassermenge: 144 l m<sup>-2</sup> (100 %)</b>		
Anthropogene Wasserentnahme aus primären Kreislauf 100 %	Oberflächenwasser 87,5 %	126 l m <sup>-2</sup>
	Grundwasser 12,5 %	18 l m <sup>-2</sup>
Anthropogener Oberflächenabfluss in primären Kreislauf 100 %	Industrie 79,2 %	114 l m <sup>-2</sup>
	Haushalte 11,1 %	16 l m <sup>-2</sup>
	Grubenwasser 5,5 %	8 l m <sup>-2</sup>
	Landwirtschaft 4,2 %	6 l m <sup>-2</sup>

Quelle: [4]

### Arten der Verdunstung im Wasserkreislauf von Deutschland (Tab. 8)

Verdunstungsmenge in Deutschland: 481 l m <sup>-2</sup> (100 %), davon	
	339 l m <sup>-2</sup>
Transpiration 70,5 %	Verdunstung Pflanzen 328 l m <sup>-2</sup>
	Verdunstung anthropogen 11 l m <sup>-2</sup>
	142 l m <sup>-2</sup>
Evaporation 29,5 %	Meer 11 l m <sup>-2</sup>
	Erdboden 42 l m <sup>-2</sup>
Verdunstung Interzeptions-Wasser	72 l m <sup>-2</sup>
Verdunstung fallender Niederschlag	17 l m <sup>-2</sup>

Quelle: [4]

1 Millimeter (mm) Niederschlagshöhe entspricht einer Wassermenge von 1 Liter pro Quadratmeter (l m<sup>-2</sup>).

Die Differenz zwischen der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge von 779 l m<sup>-2</sup> und der jährlichen Verdunstungsmenge von 481 l m<sup>-2</sup> entspricht dem Wasserdampftransport von 298 l m<sup>-2</sup> aus dem Ausland über die Luftströmungen.

Im Bezugszeitraum 1961 bis 1990 (30 Jahre) erhielt das Bundesgebiet West - die ehemalige Bundesrepublik Deutschland - eine Niederschlagsmenge 856 l m<sup>-2</sup> und das Bundesgebiet Ost, die frühere DDR, 606 l m<sup>-2</sup>.

## 2.2 Wasserbilanz der Erde

Der überwiegende Anteil der planetaren Wasservorräte befindet sich in den Ozeanen. Von der Gesamtoberfläche der Erde von  $510,0 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  umfasst das Weltmeer 71 % ( $361,1 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ) und das Festland 29 % ( $148,9 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ).

Die Landflächen der Erde stehen damit in einem Verhältnis von 1 : 2,4 zu den Wasserflächen.

Die Flächen der Nord- und Südhemisphäre können als gleich betrachtet werden, jedoch differiert die Größe der Land- und Meeresoberflächen.

Die Nordhalbkugel zeigt  $100,3 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  Land- und  $154,6 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  Meeres-, die Südhalbkugel weist dagegen  $48,6 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  Land- und  $206,5 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  Meeresflächen auf.

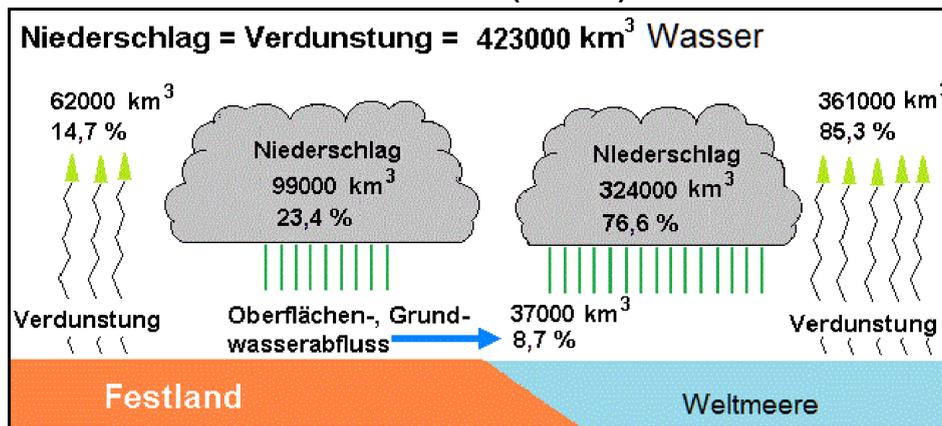
### Land- und Meeresflächen der Erde (Tab. 9)

Erde			Nordhalbkugel		Südhalbkugel	
<b>Gesamtfläche</b>	510.0 · 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	100 %	255.0 · 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	50 %	255.0 · 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	50 %
<b>Landflächen</b>	148.9 · 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	29 %	100.3 · 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	39 %	48.6 · 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	19 %
<b>Meeresflächen</b>	361.1 · 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	71 %	154.6 · 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	61 %	206.5 · 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	81 %

Quelle: [1]

Die großen Wasserdampfproduzenten oder -quellen sind die tropischen und subtropischen Meere, da 1 m<sup>3</sup> tropischer Luft mit einer Temperatur von 30 °C maximal 30,4 Gramm, 1 m<sup>3</sup> kalter kontinentaler Winterluft von -15 °C dagegen nur 1,6 Gramm Wasserdampf aufnehmen kann. Durch die allgemeine Zirkulation wird dann der Wasserdampf in höhere Breiten verfrachtet.

### Jährliche Wasserbilanz der Erde (Abb. 2)



Quelle: [12]

Jedes Jahr verdunsten weltweit 423 · 10<sup>3</sup> km<sup>3</sup> Wasser, davon ca. 361000 km<sup>3</sup> von den Meeren und rund 62000 km<sup>3</sup> von den Kontinenten.

Die zur Verdunstung von 423000 km<sup>3</sup> Wasser notwendige Energie beträgt bei 18 °C etwa 104 · 10<sup>19</sup> kJ. Um diese Wassermenge durch künstliches Heizen zu verdampfen, werden ca. 3,5 · 10<sup>13</sup> Tonnen Koks oder 2,5 · 10<sup>16</sup> Liter Heizöl benötigt

Die Wasserbilanz der Weltmeere ist negativ, weil ihr Niederschlag um rund 9 % geringer ist als ihre Verdunstungsrate. Dieses durch Verdunstung entstandene Defizit wird jedoch durch den Oberflächen- und Grundwasserabfluss (z.B. durch ober- und unterirdische Flüsse, Bäche) von den Kontinenten zu den Meeren hin ausgeglichen (s. Abb. 2).

Betrachtet man die Wasserbilanz der beiden Erdhälften, so erhält die Nord- nur 0,2 % weniger Niederschlag als die Südhalbkugel (s. Tab. 10).

Ein erheblicher Unterschied ergibt sich jedoch bei der Verdunstung. Bezogen auf die Gesamtverdunstung liefert die Nordhalbkugel 46,1 %, die Südhalbkugel hingegen 53,9 %. Diese hohen Verdunstungswerte der Südhalbkugel sind eine Folge ihrer großen Meeresfläche und sie lassen sich überwiegend auf den Südpazifik zurückführen.

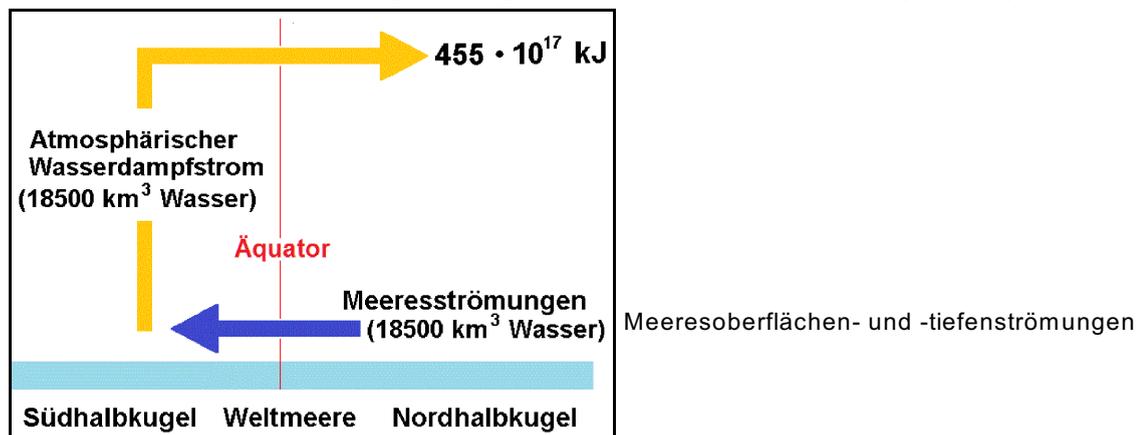
**Globale Wasserbilanz (Tab. 10)**

	Wasserbilanz der Erde		
	global	Nordhalbkugel	Südhalbkugel
Niederschlag N	100 %	49,9 %	50,1 %
Verdunstung V	100 %	46,1 %	53,9 %
Differenz N - V	0	+ 4 %	- 4 %

Quelle: [1]

Während die Nordhalbkugel ein positives Wassersaldo (N - V) von etwa 4 % aufweist, verbucht die Südhemisphäre einen ständigen Wasserverlust in der gleichen Höhe. Dieser Wassergewinn der Nordhalbkugel wird durch Meeresoberflächen- und -tiefenströmungen über den Äquator hinweg zur Südhemisphäre abgeführt. Diese liefert dafür einen gleichgroßen Betrag in Form von Wasserdampf, der durch Luftströmungen zur Nordhalbkugel befördert wird.

**Wasser- und Wasserdampftransport über den Erdäquator (Abb. 3)**



Mit dem Transport von Wasserdampf ( $18500 \text{ km}^3 \text{ Wasser}$ ) über den Äquator von Süd nach Nord wird der Südhalbkugel eine Energiemenge von ca.  $455 \cdot 10^{17} \text{ kJ}$  entzogen und der Nordhemisphäre zugeführt.

## 3. Das Wassermolekül

### 3.1 Modell des Atoms

#### 3.1.1 Atomarer Bausteine

Das Atom - von griechisch *átomos*, unteilbar - dessen Aufbau bereits die griechischen Philosophen Leukipp von Milet (etwa 450 v. Chr.) und sein Schüler Demokrit von Abdera (460 - 370 v. Chr.) verstandesmäßig zu erfassen suchten, besteht aus einem Atomkern und Elektronen, die sich um den Kern bewegen. Der ganze übrige Raum ist leer und nur von elektrostatischen Kraftfeldern erfüllt.

Der Atomkern setzt sich aus positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen fast gleicher Masse zusammen. Der Kernbereich von ca.  $10^{-14}$  m enthält die gesamte positive Ladung und nahezu die ganze Masse des Atoms von etwa  $10^{-26}$  kg.

Weil Atome sich in ihrer Grundform nach außen hin elektrisch neutral verhalten, muss die positive Kernladung durch die negativ geladenen Elektronen ausgeglichen werden, so dass die Anzahl der Protonen genau der Menge der Elektronen entspricht. Diese werden durch Coulomb-Kräfte vom Kern angezogen und müssen um ihn herumwirbeln, um nicht in ihn hineinzustürzen. Ihre Bewegungsenergie oder kinetische Energie ist um so größer, je weiter sie vom Atomkern entfernt sind.

Die Durchmesser der Atome liegen in der Größenordnung von einigen  $10^{-10}$  m, so dass die Atomkerne ca. um den Faktor  $10^4$  kleiner sind.

Überträgt man diese Zahlenwerte in für Menschen vorstellbare Bereiche, so würde bei einer Atomkerngröße von 1 mm (Stecknadelkopf) der Durchmesser des Atoms etwa 30 m betragen. Ein fester Körper hätte also - immens vergrößert - in Abständen von 30 m jeweils kleine Materieanhäufungen von der Größe eines Stecknadelkopfes, zwischen denen sich hin und wieder elektrische Ladungen von faktisch masselosen Elektronen bewegen. Der Rest des Raumes wäre, wie bereits angesprochen, leer.

Atome gleicher Protonen- aber verschiedener Neutronenzahlen, die sich zwar in der Masse, nicht aber im chemischen Verhalten unterscheiden, werden Isotope genannt. Vom chemischen Element Wasserstoff sind z.B. drei natürliche Isotope bekannt.

### Isotope des Wasserstoffs (Tab. 11)

Bezeichnung	Bausteine des Atomkerns
Wasserstoff (H)	1 Proton
Schwerer Wasserstoff oder Deuterium	1 Proton und 1 Neutron
Überschwerer Wasserstoff oder Tritium	1 Proton und 2 Neutronen

### Periodensystem der Elemente (Tab. 12)

Element	Ordnungszahl	Element	Ordnungszahl	Element	Ordnungszahl
Wasserstoff (H)	1	Beryllium (Be)	4	Stickstoff (N)	7
Helium (He)	2	Bor (B)	5	Sauerstoff (O)	8
Lithium (Li)	3	Kohlenstoff (C)	6	Fluor (F)	9

Die Summe der Protonen- und Neutronenzahl, die Nukleonenzahl, ist stets ganzzahlig und gibt das Atomgewicht an. Die Anzahl der Protonen, die im elektrisch neutralen Atom mit der Zahl der Elektronen übereinstimmt, stellt die Ordnungszahl der Elemente dar und legt ihre Reihenfolge im Periodensystem fest.

## 3.1.2 Energie und Bahnen von Elektronen

Wie in 3.1.1 angesprochen wurde, setzt sich der Atomkern aus Protonen oder aus Protonen und Neutronen zusammen und die Elektronen bewegen sich auf Kreis- oder elliptischen Bahnen um den Atomkern (Bohr-Sommerfeld-Modell). Diese Bahnen stellen aber nur sehr stark vereinfachte, anschauliche Bilder dar, weil sich nach den Gesetzen der klassischen Mechanik Ort und Geschwindigkeit der Elektronen nicht bestimmen lassen. Ein bessere Beschreibung der Elektronenverteilung in der Atomhülle bietet das Orbitalmodell, das die einzelnen, unterschiedlich aussehenden räumlichen Aufenthaltsbereiche, Orbitale genannt, der Elektronen angibt.

Ein Orbital kann man sich als die Oberfläche des kleinsten Volumens vorstellen, in dem sich das Elektron mit hoher Wahrscheinlichkeit (z.B. 90 %) aufhält.

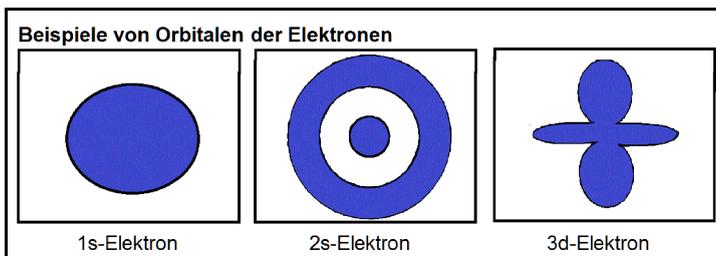
Jedes Orbital hat eine unterschiedliche geometrische Form und ist durch einen ganz bestimmten Energie- und Quantenzustand gekennzeichnet. Die Reihenfolge dieser Energieniveaus wird durch die Hauptquantenzahl  $n$  festgelegt.

Es ist üblich, alle Elektronenbahnen mit der gleichen Hauptquantenzahl  $n$  zu einem gemeinsamen Hauptenergiebereich zusammenzufassen, der als Schale bezeichnet wird (s. Abb. 5). Mit anwachsendem  $n$  nimmt die Bindungsenergie des Elektrons ab, so dass die Wahrscheinlichkeit wächst, dass das Elektron sich weiter entfernt vom Atomkern befindet.

### Schalen und Hauptquantenzahlen (Tab. 13)

Schale	Hauptquantenzahl $n$	Schale	Hauptquantenzahl $n$
K	1	O	5
L	2	P	6
M	3	Q	7
N	4		

### Form der Orbitale des Wasserstoffatoms mit verschiedenen Quantenzahlen (Abb. 4)



Quelle: [6]

Die Abbildung 4 zeigt 3 Beispiele von Orbitalformen des Wasserstoffatoms mit den Hauptquantenzahlen  $n$  von 1, 2 und 3.

Im Jahre 1925 wurde festgestellt, dass sich das Elektron nicht nur um den Atomkern bewegt, sondern auch noch um die eigene Achse rotiert. Diese Eigenbewegung, der Elektronenspin  $m_s$ , kann, vereinfacht ausgedrückt, nur links und rechts herum erfolgen, so dass auch der Spin gequantelt ist. Die Spinquantenzahl  $m_s$  des Elektrons stellt damit eine zweite Größe dar, die den Energiezustand des Elektrons in der Atomhülle bestimmt. Wird im Atomaufbau dieser Spin mit berücksichtigt, ergibt sich eine feinere energetische Verteilung der Elektronen in den Orbitalen, die mit der so genannten Nebenquantenzahl oder Bahndrehimpulsquantenzahl  $l$  beschrieben wird. Hier sind die Elektronen aus historischen Gründen mit den Buchstaben  $s$ ,  $p$ ,  $d$  und  $f$  bezeichnet.

### Neben- oder Bahndrehimpulsquantenzahl $l$ (Tab. 14)

Bezeichnung	Nebenquantenzahl $l$
s-Elektron oder s-Orbital	0
p-Elektron oder p-Orbital	1
d-Elektron oder d-Orbital	2
f-Elektron oder f-Orbital	3

Jede Hauptenergiestufe oder Schale weist ein durch ein "s" gekennzeichnetes kugelförmiges s-Orbital auf und z.B. ein d-Orbital ähnelt einer Hantel mit einem mittigen Ring.

Die Anzahl der Energiestufen der einzelnen Schalen (s. Tab. 10) eines Atoms lässt sich mit der Hauptquantenzahl n berechnen.

**Gesamtzahl der Energiestufen pro Schale (Form. 1)**

$$N_w = 2 n^2$$

$N_w$  : Anzahl der Energiestufen  
 $n$  : Hauptquantenzahl

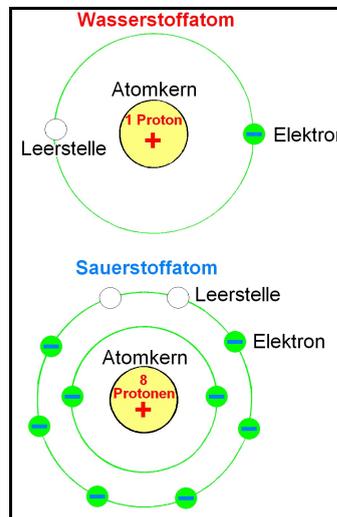
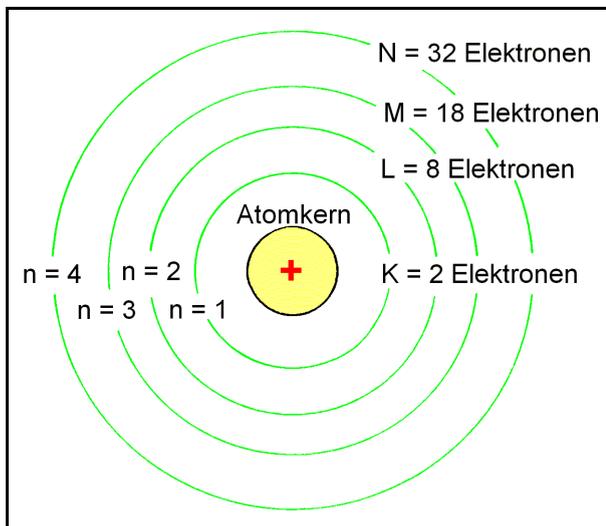
Da jede Energiestufe nur von einem einzigen Elektron besetzt werden kann, entspricht ihre Anzahl der Elektronenmenge pro Schale.

**Schalen und Energiestufen (Tab. 15)**

Schale	Energiestufen (Elektronen)
K	2
L	8
M	18
N	32

Schale	Energiestufen (Elektronen)
O	50
P	72
Q	98

**Schalen eines Atoms und Aufbau des Wasserstoffatoms (Abb. 5)**



Das einfachste Element, der Wasserstoff (chemisches Zeichen H, Ordnungszahl 1), besitzt ein Elektron, das nächste, Helium (He, 2), zwei Elektronen in der K-Schale. Danach folgen Lithium (Li, 3), Beryllium (Be, 4), Bor (B, 5), Kohlenstoff (C, 6), Stickstoff (N, 7) und Sauerstoff (O, 8) mit je zwei Elektronen in der K-Schale und bis zu sechs in der L-Schale.

### Reihenfolge der chemischen Elemente (Tab. 16)

Element			
Ordnungszahl	Name	Abk.	Relative Atommasse
1	Wasserstoff	H	1,008
2	Helium	He	4,0026
3	Lithium	Li	6,941
4	Beryllium	Be	9,0122

Element			
Ordnungszahl	Name	Abk.	Relative Atommasse
5	Bor	B	10,81
6	Kohlenstoff	C	12,011
7	Stickstoff	N	14,007
8	Sauerstoff	O	15,999

Die chemischen Eigenschaften eines Elementes hängen fast ausschließlich von der Elektronenanordnung der äußersten Schale ab.

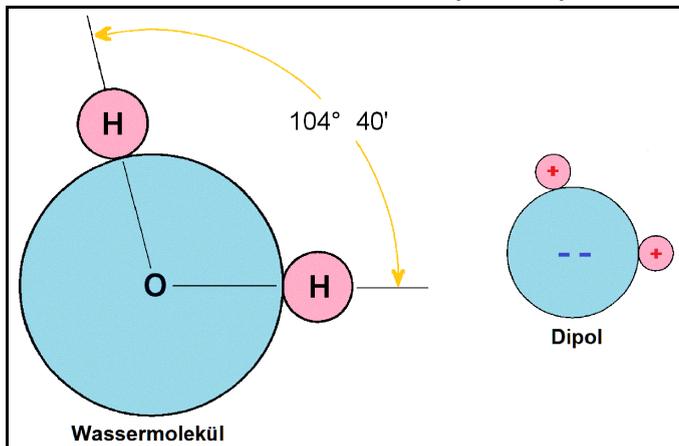
Bei den Edelgasen z.B. sind die äußeren Schalen mit Elektronen voll besetzt, so dass weder Elektronen aufgenommen noch abgegeben werden können. Damit sind Edelgase inaktive Elemente, die mit anderen Stoffen keine Verbindung eingehen.

### 3.1.3 Wasserstoffbrücken

Bei der Bildung des Wassermoleküls werden zwei unpaarige Elektronen des Sauerstoffatoms durch je ein Elektron von zwei Wasserstoffatomen zu einem beiden Elementen angehörenden Elektronenpaar ergänzt und ergeben so eine kovalente Bindung (Atombindung). Die Orbitale der Wasserstoffatome und des Sauerstoffatoms überlappen sich dabei.

Durch optische Untersuchungen des Wassermoleküls wurde nachgewiesen, dass die Elektronenhüllen der beiden Wasserstoffatome sich gegeneinander abstoßen und dadurch einen Winkel von  $104^{\circ}40'$  bilden.

### Aufbau des Wassermoleküls (Abb. 6)



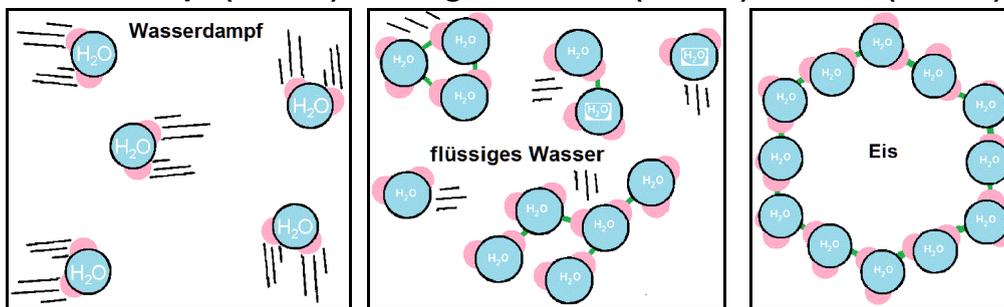
Die Elektronenhüllen der beiden Wasserstoffatome stoßen sich gegeneinander ab und bilden dadurch einen Winkel von  $104^{\circ}40'$ . Weil außerdem das Sauerstoffatom aufgrund seiner 8 positiven Ladungen die Wasserstoffelektronen stärker in seine Elektronensphäre hineinzieht als es die Wasserstoffatome ihrerseits vermögen, ergibt sich eine Ladungverschiebung, die aufgrund des Winkels von  $104^{\circ}40'$  des Wassermoleküls zur Bildung eines Dipols führt.

Weil das Sauerstoffatom die Wasserstoffelektronen stärker in seine Elektronensphäre hineinzieht als es die Wasserstoffatome ihrerseits vermögen, ergibt sich eine Ladungsverschiebung, die aufgrund des Winkels von  $104^{\circ}40'$  zur Bildung eines Dipols führt.

Die negativ geladenen Enden der Wasserdipole, die Sauerstoffatome, ziehen die positiv geladenen Enden anderer Dipolmoleküle an und die beiden positiv geladenen Wasserstoffenden die negativ geladenen. So können sich viele Wassermoleküle zu größeren Molekülkomplexen vereinigen. Die Verbindung von Sauerstoff- zu Sauerstoffatom wird dabei über ein Wasserstoffatom gebildet. Aus diesem Grunde spricht man von Wasserstoffbrückenbindung oder Wasserstoffbrücken.

### Wasserdampf (Abb. 7), flüssiges Wasser (Abb. 8) und Eis (Abb. 9)

Quelle: [7]



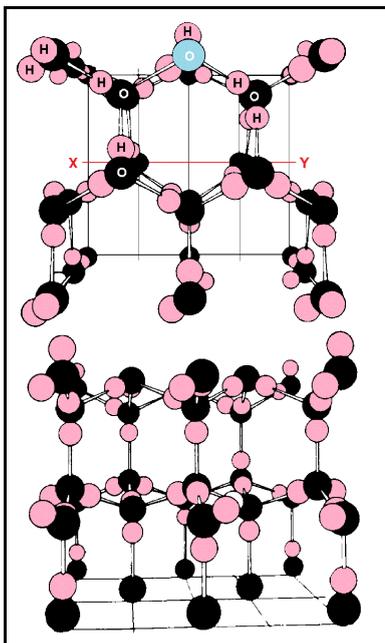
Wasserstoffbrücken:  
kleine grüne Striche

**Wasserdampf** : Alle Wasserstoffbrücken sind zerstört; die Wassermoleküle sind soweit voneinander entfernt, dass sie praktisch keine Kräfte mehr aufeinander ausüben und deshalb frei beweglich sind. Ihre mittlere Bewegungsenergie ist der absoluten Temperatur proportional.

**Flüssiges Wasser** : In Abhängigkeit von der Temperatur sind mehr oder weniger viele Wassermoleküle durch Wasserstoffbrücken miteinander verbunden. Dieser Zustand ist dynamisch, d.h. Brücken bilden sich durch die temperaturabhängige Molekularbewegung ständig neu und lösen sich wieder auf.

**Eis** : Alle Wassermoleküle sind durch Wasserstoffbrücken an Gleichgewichtslagen gebunden, um die sie in Abhängigkeit von der absoluten Temperatur zwar Schwingungen ausführen, aber diese nur bei ausreichender Energiezufuhr verlassen können.

### Aufsicht und Seitenansicht des Raumgitters des Eises (Abb. 10)



obere Abbildung : Aufsicht

untere Abbildung : Seitenansicht im Schnitt x y

Sauerstoffatome : hellblau oder schwarz

Wasserstoffatome : rosa

Im festen Zustand haben sich die Wassermoleküle an den Kreuzungspunkten eines räumlichen Gitters angelagert, das eine hexagonale Struktur aufweist.

Im festen Zustand des Wassers sind alle Wassermoleküle durch Wasserstoffbrücken miteinander verbunden, im flüssigen Aggregatzustand werden sie ständig neu gebildet und wieder zerstört, und im gasförmigen Zustand (Wasserdampf) sind alle Wasserstoffbrücken gelöst.

### 3.1.4 Bedeutung der molekularen Bindungskräfte von Stoffen

Allgemein gilt, dass die Struktur fester Körper durch die zwischen den benachbarten Atomen oder Molekülen wirkenden elektrostatischen Kräfte bestimmt wird, welche die Teilchen an bestimmte Gleichgewichtslagen binden. Je nach Wirkungsart wird zwischen vier verschiedenen Bindungstypen unterschieden.

#### Bindungsarten fester Körper (Tab. 17)

Bindungsart	Kraftwirkung	Eigenschaften	Beispiele
Van-der-Waalsche Bindung	zwischen zwei isolierten Atomen mit permanentem oder induziertem Dipolmoment	Isolator, leicht komprimierbar, niedriger Schmelzpunkt	Edelgaskristalle, H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Molekülkristalle
Kovalente Bindung oder Atombindung	Elektronenpaarbindung	Isolator oder Halbleiter, sehr schwer verformbar, hoher Schmelzpunkt	viele organische Stoffe, C, Si
Ionenbindung	zwischen zwei unterschiedlich geladenen Ionen	Isolator bei niedrigen Temperaturen Ionenleitung und bei hohen plastisch verformbar	Salze, (NaCl, KCl)
Metallische Bindung	zwischen festen Atomrümpfen und frei beweglichen Elektronen	elektrischer Leiter, guter Wärmeleiter, plastisch verformbar	Metalle, Legierungen

Um diese Gleichgewichtslagen führen die Atome oder Moleküle zwar Schwingungen aus, sie können sie aber im allgemeinen nicht völlig verlassen. Deshalb lassen sich Gestalt und Volumen fester Körper nur mit Hilfe hoher Energien bzw. großer Kräfte verändern. Weiterhin gilt, dass die mittlere Bewegungsenergie der Teilchen der absoluten Temperatur T [K] proportional ist.

Bei Flüssigkeiten wirken zwischen den Atomen oder Molekülen eines Stoffes ebenfalls Kräfte, die aber wesentlich kleiner sind, so dass die Teilchen nicht mehr an bestimmte Gleichgewichtslagen gebunden, sondern ihre Lage innerhalb der Flüssigkeit verändern. Flüssigkeiten besitzen deshalb keine bestimmte Gestalt, sondern sie passen sich stets der Form ihres Gefäßes an.

Gase sind dadurch gekennzeichnet, dass ihre Atome oder Moleküle im Mittel so weit voneinander entfernt sind, so dass sie praktisch keine Kräfte mehr aufeinander ausüben und deshalb frei beweglich sind. Dadurch weisen sie weder eine bestimmte Gestalt noch ein bestimmtes Volumen auf, sondern füllen den verfügbaren Raum vollständig aus.

Nach der kinetischen Gastheorie sind die Atome oder Moleküle eines Gases in ständiger Bewegung. Ihre mittlere kinetische Energie ist der absoluten Temperatur proportional, d.h. je höher die Gastemperatur, desto größer ist auch die geradlinige und gleichförmige Bewegung der Teilchen.

Durch die Stöße der Gasteilchen gegen die Gefäßwände entsteht der Druck, den jedes Gas auf seinen Behälter ausübt.

## 3.2 Besonderheiten des Wassers

Die Wasserstoffbrücken, deren Bindungskraft auch Wasserstoffbindung genannt wird, bewirken, dass flüssiges im Vergleich zu vielen anderen Flüssigkeiten eine hohe Siede- und Schmelztemperatur, eine große spezifische Wärmekapazität, eine starke Oberflächenspannung, eine hohe latente Wärmeenergie, eine starke Adhäsion, eine gute Lösungsfähigkeit und die größte Dichte bei 4 °C aufweist.

### 3.2.1 Hohe Siede- und Schmelztemperatur

Um Wasserstoffbrücken von Wassermolekülgruppen zu zerstören, sind große kinetische Energien bzw. hohe Temperaturen erforderlich. Daraus folgt, dass auch die Temperaturen, bei denen die Brücken hauptsächlich zerstört werden, relativ hoch sein müssen. Wasser besitzt deshalb eine verhältnismäßige große Siede- und Schmelztemperatur.

Die Abhängigkeit der Siedetemperatur des Wassers vom Luftdruck zeigt Tabelle 18 und die Siede- und Schmelztemperatur von Wasser und anderer Flüssigkeiten mit ähnlicher Molekülgröße Tabelle 19.

#### Siedetemperatur von Wasser in Abhängigkeit vom Luftdruck (Tab. 18)

Siedetemperatur	Luftdruck	Siedetemperatur	Luftdruck
100,9 °C	1046,4 hPa	69,2 °C	300,6 hPa (Mount Everest)
100,0 °C	1013,25 hPa	46,0 °C	100,9 hPa (Concorde)
90,0 °C	700,4 hPa (Zugspitze)	0,0 °C	6,1 hPa

#### Siede- und Schmelztemperatur einiger Flüssigkeiten bei 1013.25 hPa (Tab. 19)

Flüssigkeit	Siedetemperatur [°C]	Schmelztemperatur [°C]
Chemisch reines Wasser	100,0	0,0
Meerwasser	104	-2,5
Äthyläther	34,6	-123,3
Äthylalkohol	78,3	-114
Benzol	80,1	5,5
Quecksilber	356,6	-38,9

### 3.2.2 Große spezifische Wärmekapazität

Um die Wasserstoffbrücken mit ihren relativ starken Bindungskräften von Wassermolekülen aufzubrechen, wird verhältnismäßig viel Energie - Lösungsarbeit = Wasserstoffbindungskraft  $\times$  Verschiebungsweg - benötigt.

Beim Erwärmen von Wasser wird durch die zugeführte Wärmeenergie die mittlere kinetische Energie der Moleküle erhöht und gleichzeitig Arbeit gegen die Wasserstoffbindungskraft geleistet.

Die Wärmemenge, die erforderlich ist, um ein Kilogramm Wasser um ein Grad Celsius zu erwärmen, ist deshalb groß und beträgt  $4,1868 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Wasser besitzt deshalb im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten eine große spezifische Wärmekapazität.

#### Spezifische Wärmekapazitäten verschiedener Flüssigkeiten (Tab. 20)

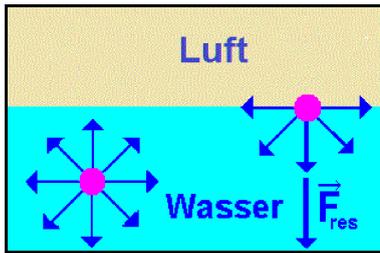
Flüssigkeit	Spezifische Wärmekapazität bei 18 °C [ $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ]
Quecksilber	138
Benzol	1717
Äthyläther	2345
Äthylalkohol	2554
Wasser	4187

### 3.2.3 Starke Oberflächenspannung

Im Inneren der Flüssigkeit wird jedes Wassermolekül von allen Molekülen in der unmittelbaren Nachbarschaft angezogen, während an der Oberfläche der Flüssigkeit nur seitwärts und nach innen gerichtete Kräfte wirksam werden. Dadurch entsteht an der Oberfläche eine "Haut" von Wassermolekülen, die durch die Wasserstoffbrücken so fest verknüpft sind, dass eine Oberflächenspannung entsteht.

Wassertropfen nehmen aufgrund dieser Oberflächenspannung Kugelform an und Gefäße lassen sich durch die Meniskusbildung an der Peripherie der Oberfläche über den Rand hinaus mit Wasser füllen. Diese Kräfte, die zwischen gleichartigen Molekülen eines Stoffes wirken, heißen Kohäsionskräfte.

### Kohäsionskräfte von Wasser (Abb. 11)



$F_{res}$  : resultierende Kraft

### Oberflächenspannung von Wasser (Tab. 21)

Flüssigkeit	Oberflächenspannung [ $10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ ] bei 20 °C
Alkohol	22
Seifenlösung	~30
Wasser	72.5
Quecksilber	484

Die Oberflächenspannung von Wasser ist so groß, dass sich einige Insektenarten - der z.B. Wasserläufer, eine Wanzenart - auf dem Wasser rennen können, ohne unterzugehen.

### 3.2.4 Hohe latente Wärmeenergie

Die Energie, die bei konstanter Temperatur und konstantem Druck für einen Aggregatzustandswechsel des Wassers benötigt bzw. dabei freigesetzt wird, heißt latente Wärmeenergie. Diese zum Lösen der Wasserstoffbrücken bei den Phasenwechseln durch Verdunstung, Schmelzen und Eisverdunstung benötigte Wärmeenergie wird dann beim Kondensieren, Gefrieren und Sublimieren wieder freigesetzt.

### Latente Wärmeenergie verschiedener Stoffe bei $p = 1013.25 \text{ hPa}$ (Tab. 22)

Flüssigkeit	Spezifische Verdampfungsenergie	Spezifische Schmelzwärmeenergie
Äthyläther	377 $\text{kJ kg}^{-1}$	96 $\text{kJ kg}^{-1}$
Äthylalkohol	858 $\text{kJ kg}^{-1}$	105 $\text{kJ kg}^{-1}$
Benzol	394 $\text{kJ kg}^{-1}$	126 $\text{kJ kg}^{-1}$
Quecksilber	285 $\text{kJ kg}^{-1}$	12 $\text{kJ kg}^{-1}$
Wasser	2257 $\text{kJ kg}^{-1}$	334 $\text{kJ kg}^{-1}$

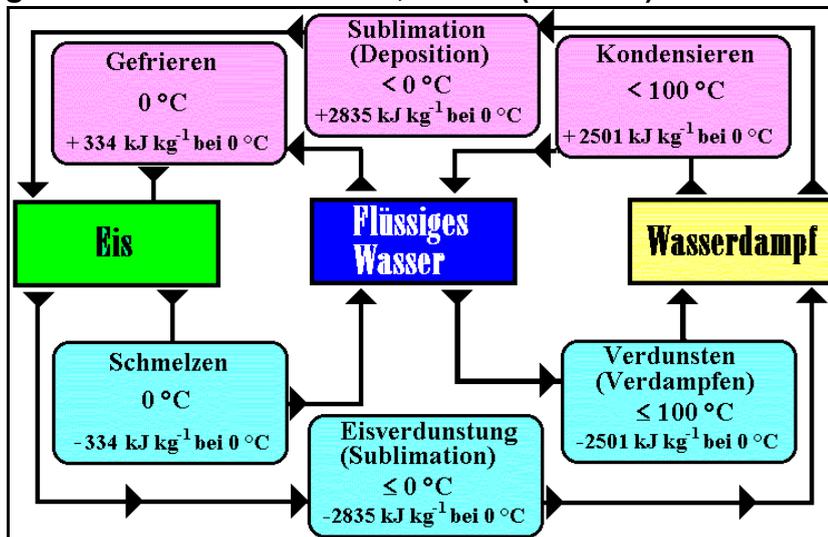
**Phasenübergänge und latente Wärmeenergie von Wasser bei 1013,25 hPa (Tab. 23)**

Phasenübergänge des Wassers	latente Wärmeenergie
Verdunstung (Wasser in Wasserdampf)	-2501 kJ kg <sup>-1</sup> bei 0 °C
Kondensation (Wasserdampf in Wasser)	+2501 kJ kg <sup>-1</sup> bei 0 °C
Eisverdunstung (Eis in Wasserdampf)	-2835 kJ kg <sup>-1</sup> bei 0 °C
Sublimation (Wasserdampf in Eis)	+2835 kJ kg <sup>-1</sup> bei 0 °C
Schmelzen (Eis in Wasser)	-334 kJ kg <sup>-1</sup> bei 0 °C
Gefrieren (Wasser in Eis)	+334 kJ kg <sup>-1</sup> bei 0 °C

+: freigesetzt

-: benötigt

**Aggregatzustandsänderungen, Umwandlungstemperaturen und latente Wärmeenergien von Wasser bei 1013,25 hPa (Abb. 12)**



Um 1 Gramm flüssiges Wasser bei 0 °C zu verdunsten, benötigt man 2501 Joule. Diese Wärmemenge wird dann bei Kondensation des Wasserdampfes wieder freigesetzt. Eine einfache Rechnung zeigt, dass sich mit dieser relativ großen Energiemenge ein Körper mit der Masse von 25,5 kg senkrecht in eine Höhe von 10 m emporheben lässt.

**Größenordnung der latenten Wärmeenergie (Form. 2)**

$$W = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h$$

$$m = \frac{W}{g \cdot h} = \frac{2501}{9,81 \cdot 10} \left[ \frac{\text{J} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^2} \right]$$

$$m = 25,5 \left[ \frac{\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^2} \right] = 25,5 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^2} \right]$$

$$m = 25,5 \text{ kg}$$

- W : Hubarbeit [J]
- F<sub>G</sub> : Gewichtskraft [N]
- h : Höhe [m]
- m : Masse [kg]
- g : Erdbeschleunigung [m s<sup>-2</sup>]

**In Formel eingesetzte Werte**

- W = 2501 J
- g = 9,81 m s<sup>-2</sup>
- h = 10 m

### 3.2.5 Starke Adhäsion

Wasser vermag auch zu anderen Stoffen - z.B. zu Glas - Wasserstoffbrücken zu bilden. Diese Bindung, die sehr stark sein kann, wird zwischen den Atomen oder Molekülen zweier unterschiedlicher Stoffe wirksam und wird Adhäsion genannt.

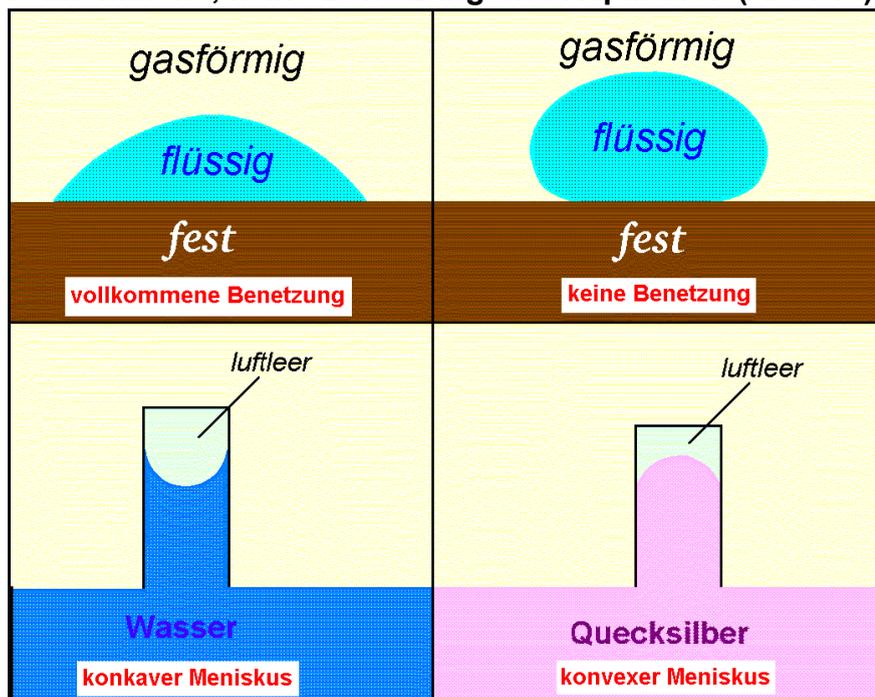
Wenn ein Flüssigkeitstropfen mit einer festen Unterlage in Kontakt gerät, lassen sich zwei Extremfälle der Adhäsion unterscheiden, die vollkommene und die keine Benetzung.

**Vollkommene Benetzung** : Die Adhäsionskräfte sind erheblich größer als die Kohäsionskräfte, so dass sich die Flüssigkeit auf der waagerechten Oberfläche des Stoffes ausbreitet. Wasser und Glas zeigen dieses Verhalten.

**Keine Benetzung** : Die Adhäsionskräfte sind wesentlich kleiner als die Kohäsionskräfte, so dass sich die Flüssigkeit auf der waagerechten Oberfläche des Gegenstandes tropfenförmig zusammenzieht. Bei Quecksilber und Glas ist das zu beobachten.

Benetzungsvorgänge sind z.B. von Bedeutung für die Wirksamkeit von Waschmitteln und sind relevant für Flüssigkeiten in engen Röhren, den Kapillaren, wie bei Thermometern und dem Quecksilberbarometer.

#### Vollkommene, keine Benetzung und Kapillarität (Abb. 13)



*linkes oberes Bild*  
vollkommene Benetzung

*rechtes oberes Bild*  
keine Benetzung

*linkes unteres Bild*  
konkaver Meniskus bei vollkommener Benetzung

*rechtes unteres Bild*  
konvexer Meniskus bei keiner Benetzung (Quecksilberthermometer und -barometer)

### 3.2.6 Gute Lösungsfähigkeit

Wasser ist ein ausgezeichnetes Lösungsmittel und vermag viele Substanzen auf zweierlei Art zu lösen. Wasser kann einerseits zu anderen Stoffen Wasserstoffbrücken bilden. Auf diese Weise werden zum Beispiel Zuckermoleküle in Lösung gehalten.

Andererseits können infolge des Dipolcharakters der Wassermoleküle Ionen angezogen werden, so dass zum Beispiel die positiven Natriumionen einer Kochsalzlösung durch die negativen Enden der Wasserdipole und die negativen Chlorionen durch die positiven Dipolladungen gebunden werden. Hierbei sind die Anziehungskräfte zwischen Ionen und Wasserdipolen größer als die Anziehung zwischen den Natrium- und Chlorionen der Kochsalzkristalle. Dadurch werden Ionen aus dem Salzverband entfernt, so dass eine Kochsalzlösung entsteht.

### 3.2.7 Größte Dichte bei 4 °C

Im hexagonalen Gitterverband des Eises sind die Wassermoleküle weiter voneinander entfernt als im flüssigen Aggregatzustand bei 4 °C. Eis ist deshalb leichter als Wasser und schwimmt auf ihm.

Dieser Vorgang ist für die Natur außerordentlich bedeutsam, weil sich bei Abkühlung das kältere und schwerere Wasser von 4 °C am Grunde ansammelt und das wärmere und leichtere von weniger als 4 °C darüber, so dass Seen und Flüsse von oben zufrieren. Weil die Wärmeleitung im Wasser nicht sehr effektiv ist und auch kein Wärmetransport durch Konvektion stattfindet - kältere Wasserschichten mit Temperaturen unter 4 °C sinken nicht bis zum Grund ab -, frieren tiefe Seen im Winter nicht vollständig zu, so dass die Wasserfauna und -flora gute Überlebenschancen hat.

**Temperatur und Dichte von flüssigem Wasser (Tab. 24)**

Temperatur [°C]	Dichte [kg m <sup>-3</sup> ]	Temperatur [°C]	Dichte [kg m <sup>-3</sup> ]
0	916,8 (Eis) 999,868 (fl. Wasser)	4	1000,000
1	999,927	5	999,992
2	999,968	10	999,730
3	999,992	50	988,070
		100	958,380

### 3.3 Phasenänderungen des H<sub>2</sub>O bei Wärmezufuhr

Durch eine ausreichende Energiezufuhr lässt sich die starre Form eines Körpers in den flüssigen oder gasförmigen Zustand überführen. Die Temperatur, bei der eine Phase in die andere überwechselt, wird dabei Umwandlungstemperatur genannt.

Weil Wasser in allen drei Aggregatzuständen in der Troposphäre vorkommt, wird der Prozess des Phasenwechsels am Beispiel des Stoffes Wassers demonstriert.

Wird Eis bei konstantem Luftdruck ausreichend Wärmeenergie zugeführt, so lassen sich fünf bedeutende Abschnitte unterscheiden :

- Erwärmen von Eis mit Temperaturanstieg bis zum Schmelzpunkt;
- Schmelzen von Eis ohne Temperaturänderung;
- Erwärmung von Wasser bis zum Siedepunkt;
- Verdampfen von Wasser ohne Temperaturänderung;
- Erwärmung von Wasserdampf.

Entzieht man dem Wasser Wärmeenergie, so verlaufen alle diese Vorgänge in umgekehrter Richtung ab.

#### 3.3.1 Erwärmen von Eis bis zum Schmelzpunkt

Im festen Zustand ist jedes Wassermolekül durch Wasserstoffbrücken mit vier weiteren Molekülen verbunden, so dass eine Gitterstruktur existiert, das Raumgitter des Eises.

Wird dem Eis Wärmeenergie bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt zugeführt, resultiert daraus eine Erhöhung der Bewegungsenergie der um ihre Gleichgewichtslage schwingenden Wassermoleküle, so dass die Temperatur des Eises steigt.

Wenn dabei bereits einige Wassermoleküle die zum Zerstören von Wasserstoffbrücken notwendige Energie erhalten haben, so können sich diese Moleküle aus dem Gitterverband lösen. Dieser Vorgang, der einen direkten Übergang der festen in die gasförmige Phase darstellt, wird Eisverdunstung oder Sublimation genannt.

#### Spezifische Wärmekapazität und latente Wärme von Eis (Tab. 25)

spezifische Wärmekapazität von Eis	2,1 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
spezifische Sublimationswärme bei 0 °C und 1013,25 hPa	2835 kJ kg <sup>-1</sup>

### 3.3.2 Schmelzen von Eis ohne Temperaturänderung

Beim Schmelzen von Eis wird die zugeführte Wärmeenergie vollständig zum Lösen von Wasserstoffbrücken benötigt, so dass sich trotz der Wärmezufuhr bei dem Phasenwechsel die Temperatur nicht erhöht.

Natürlich müssen nur relativ wenig Wasserstoffbrücken aufgebrochen werden, um die Struktur des Eises zu zerstören, da auch im flüssigen Aggregatzustand Wasserstoffbrücken zwischen den Molekülen vorhanden sind, die sich ständig neu bilden und wieder zerfallen. Deshalb wird verhältnismäßig wenig Energie zum Schmelzen von Eis benötigt.

Wird auf Eis ein hoher Druck ausgeübt, so werden dabei Wasserstoffbrücken zerstört, so dass Eis auch bei Temperaturen unterhalb von 0 °C schmilzt.

Selbstverständlich bleibt Eis auch oberhalb von 0 °C beständig, wenn der auf ihm lastende Luftdruck durch ein Vakuum gemindert wird.

Andererseits lässt sich durch Zugabe von Salzen der Gefrierpunkt erniedrigen. Elektrisch geladene Teilchen, wie z.B. Ionen, umgeben sich sofort mit Wassermolekülen (s. 3.2.6), so dass Moleküle aus dem Kristallgitterverband herausgerissen und damit Wasserstoffbrücken zerstört werden. Da auch bei diesem Prozess Wärmeenergie zum Zerschneiden der Wasserstoffbrücken benötigt wird, die der Umgebung entzogen wird, kommt es zu einer Abkühlung der Wasser-, Eis- und Salzmischung, die damit auch weit unter 0 °C flüssig bleibt.

#### Latente Wärme beim Schmelzen von Eis (Tab. 26)

spezifische Schmelzwärme von Eis bei 0 °C und 1013,25 hPa	334 kJ kg <sup>-1</sup>
---	-------------------------

### 3.3.3 Erwärmen von Wasser bis zum Siedepunkt

Beim Erwärmen des Wassers bis zum Siedepunkt wird die zugeführte Wärmeenergie teils zur Erhöhung der kinetischen Energie der Wassermoleküle und teils zur Zerstörung von Wasserstoffbrücken benötigt. Die Zunahme der kinetischen Energie der Wassermoleküle äußert sich in einem Anstieg der Wassertemperatur und dieser Vorgang hält so lange an, bis die Siedetemperatur erreicht ist.

Wie bereits angesprochen, müssen nur relativ wenige Wasserstoffbrücken gelöst werden, um die Gitterstruktur des Eises zu zerstören und es damit zu schmelzen. Erhitzt man Wasser mit einer Temperatur von 0 °C, so wird ein Teil der zugeführten Wärmeenergie zum Aufbrechen weiterer Wasserstoffbrücken der vielen noch vorhandenen Bruchstücke des Eisgitters verwendet. Weil der Abstand der Moleküle in den Eisgitterfragmenten größer ist als der der freien Teilchen, nimmt die Dichte des Wassers bis 4 °C noch zu. Die verbleibende Wärmeenergie erhöht die kinetische Energie der Wassermoleküle. Oberhalb von 4 °C benötigen die sich immer schneller bewegendenden Wassermoleküle trotz weiterer Brückenzerstörung fortwährend mehr Raum. Die Dichte nimmt ab (s. Tab. 24). Ein Teil der freien Wassermoleküle - ihre Anzahl steigt mit wachsender Wassertemperatur - vermag aufgrund ihrer relativ hohen kinetischen Energie, die Flüssigkeit auch bei Temperaturen unter dem Siedepunkt zu verlassen. Die Rate dieses Verdunstungsvorgangs wächst mit steigender Wassertemperatur und der Verlust an den schnellsten Teilchen führt zu einer Abnahme der mittleren Molekulargeschwindigkeit der Wassermoleküle, so dass die Wassertemperatur bei Verdunstung sinkt.

### Spezifische Wärmekapazität und latente Wärme von flüssigem Wasser (Tab. 27)

spezifische Wärmekapazität von Wasser	4,1868 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
spezifische Verdunstungswärme bei 0 °C und 1013,25 hPa	2501 kJ kg <sup>-1</sup>

### 3.3.4 Verdampfen von Wasser ohne Temperaturänderung

Nach Erreichen des Siedepunktes wird die zugeführte Wärmeenergie ausschließlich zur Zerstörung aller noch vorhandenen Wasserstoffbrücken benötigt, so dass sich die Temperatur des siedenden Wassers nicht ändert.

Weil durch die andauernde Wärmezufuhr die Bewegungsenergie der Moleküle rasch zunimmt, lösen sich im Inneren der Flüssigkeit, beginnend an der Heizfläche, die Wasserstoffbrücken der restlichen Molekülkomplexe. Dampfblasen steigen auf, das Wasser siedet. Die Bildung von Dampfblasen ist aber nur möglich, wenn der Dampfdruck in ihnen mindestens genau so groß wie der von außen wirkende Luftdruck ist.

### Latente Wärme beim Verdampfen von Wasser (Tab. 28)

spezifische Verdampfungswärme von Wasser bei 100 °C und 1013,25 hPa	2257 kJ kg <sup>-1</sup>
---	--------------------------

### 3.3.5 Erwärmen von Wasserdampf

Oberhalb des Siedepunktes wird bei Wärmezufuhr keine Arbeit mehr zur Zerstörung der Wasserstoffbrücken aufgewandt. Die zugeführte Wärmeenergie dient dann nahezu vollständig der Erhöhung der kinetischen Energie der Gasmoleküle, so dass die Temperatur des Wasserdampfes steigt.

Der Druck, den der Wasserdampf in der Erdatmosphäre ausübt ist, nach dem Gesetz von Dalton ein Teil- oder Partialdruck des Luftdruckes und wird als Dampfdruck bezeichnet.

#### Gesetz von Dalton und Teildrücke des Luftdruckes (Form. 3)

$$p_{ges} = \sum_{i=1}^n p_i$$

$$p_L = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar} + \dots + e(t_d)$$

- $p_{ges}$  : Gesamtdruck eines Gasgemisches
- $p_i$  : Teildrücke
- $p_L$  : Luftdruck
- $p_{N_2}$  : Teildruck des Gases Stickstoff
- $p_{O_2}$  : Teildruck des Gases Sauerstoff
- $p_{Ar}$  : Teildruck des Gases Argon
- $e(t_d)$  : Dampfdruck, Teildruck des Wasserdampfes

Der Dampfdruck  $e(t_d)$ , der einen temperaturabhängigen Maximalwert, den Sättigungsdampfdruck, nicht überschreiten kann, lässt sich aus der empirischen Magnus-Formel berechnen.

#### Magnus-Formel des Dampfdruckes (Form. 4)

$$e(t_d) = 6.1078 \cdot e^{\frac{C_2 \cdot t_d}{C_3 + t_d}} \quad [hPa]$$

- $e(t_d)$  : Dampfdruck [hPa]
- $t_d$  : Taupunkt [°C]
- $e$  : Basis des natürlichen Logarithmus,  $e = 2.71828 \dots$
- $C_2, C_3$  : Konstanten der Magnusformel

Konstanten (für flüssiges Wasser)	Taupunktsbereich		Konstanten der Magnus-Formel Die Konstanten C sind - je nach Taupunkt - durch die Werte links zu ersetzen.
	$t < 0 \text{ °C}$	$t \geq 0 \text{ °C}$	
$C_2$ (keine Dimension)	17,84362	17,08085	
$C_3$ [°C]	245,425	234,175	

Wird Wasserdampf bei konstantem Druck  $p$  die Wärmemenge  $Q$  zugeführt, so dehnt er sich aus und leistet dabei Ausdehnungsarbeit. Die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck  $c_p$  ist damit immer größer als die bei konstantem Volumen  $c_v$ .

#### Spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf (Tab. 29)

Spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf bei	konstantem Druck	$c_p = 1,85 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
	konstantem Volumen	$c_v = 1,39 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

## 4. Unterkühltes Wasser

Wasser tritt in der Troposphäre in allen drei Aggregatzuständen auf, in gasförmiger, flüssiger und fester Form. Bei Normaldruck und Unterschreitung des Gefrierpunktes von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  erfolgt der Übergang von flüssigem Wasser in die Eisphase, wenn Spurenstoffe vorhanden sind, die den Gefrierprozess einleiten, oder wenn das flüssige Wasser in Kontakt mit einer Eisoberfläche gerät.

Die meisten Spurenstoffe (s. auch Skript "Aerosolpartikel und Wolkenelemente") werden in der erdbodennahen Luftschicht und am Erdboden produziert.

Die Spurenstoffe, die den Kristallisationsvorgang initiieren, heißen Gefrierkerne. Je eisähnlicher der molekulare Aufbau eines Gefrierkerns und je größer der Gefrierkern ist, desto früher setzt dieser Prozess ein. Außerdem zeigen Gefrierkerne - je nach Durchmesser und Beschaffenheit - in Abhängigkeit von der Temperatur eine unterschiedliche Aktivität.

Größere Wassermengen - z.B. Wasserpfützen am Erdboden - enthalten eine Vielzahl von hervorragenden Gefrierkernen, so dass der Kristallisationsvorgang bereits bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  beginnt. Kleine Wassermengen, wie z.B. Wolkentröpfchen, weisen dagegen weniger und oft weniger wirksame Gefrierkerne auf, so dass der Gefrierprozess erst bei Temperaturen von unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  einsetzt. Im Labor wurden chemisch reine Wassertröpfchen bereits auf  $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgekühlt, bevor sie gefroren.

In der Troposphäre werden unterkühlte Wolkentröpfchen besonders häufig im Temperaturbereich von unter  $0$  bis etwa  $-12/-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  angetroffen, aber sie sind auch schon vereinzelt bei  $-40$  bis  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  nachgewiesen worden. Allerdings wird dieser Gleichgewichtszustand mit sinkender Temperatur immer instabiler, so dass oft eine geringe Störung zu einem plötzlichen Gefrieren führt.

Betrachtet man den molekularen Zustand des flüssigen Stoffes Wasser (s. 3.1.4), so können sich aufgrund der thermischen Bewegung der Wassermoleküle diese zufällig zu geordneten Molekülkomplexen (Cluster) vereinigen, den Eiskristall-Embryonen. Diese Eisgitterstruktur ist jedoch instabil, d.h. sie löst sich genau so schnell wieder auf, wie sie sich gebildet hat, wenn die Mindestgröße, der kritische Kernradius, nicht erreicht wurde. Bei  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  müssen sich ca. 50000 und bei  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  mehrere 100 Wassermoleküle an den Gitterpunkten des Eises anlagern, um ein stabiles Eiskristall-Embryo zu bilden, das dann weiter zu einem kleinsten festen Teilchen, den Eiskeim, wachsen kann. Diese zufälligen Anhäufungen sind allerdings sehr unwahrscheinlich.

Der extrem kleine Krümmungsradius eines Eiskeims ermöglicht es den Wassermolekülen bei nicht allzu tiefen Temperaturen - die Eisverdunstung ist dem Krümmungsradius der Eiskeimoberfläche umgekehrt proportional -, jedoch viel schneller wieder in die flüssige Umgebung zu entweichen, als es von einer ebenen Eisoberfläche der Fall ist. Deshalb ist die Lebensdauer von Eiskeimen im oberen negativen Temperaturbereich gering.

Erst ab ca.  $-40\text{ °C}$  können Wassertröpfchen spontan gefrieren, weil nun Cluster von 70 Molekülen genügen, um weiteres Wachstum zu ermöglichen. Hinzu kommt, dass bei diesen tiefen Temperaturen die thermische Bewegung der Wassermoleküle zu gering ist, um die Eiskeimbildung wirksam zu unterdrücken.

### Größenordnung von Wolken- und Niederschlagstropfen (Tab. 30)

Wassertropfen		
Art	Durchmesser [mm]	
Wolkentröpfchen	normal	0,002 - 0,01
	groß	0,02 - 0,1
Sprühregen		0,1 - 0,5
Regentropfen		0,5 - 6,0

Quelle: [10, 11]

Die Wahrscheinlichkeit, dass Wolkentröpfchen gute Gefrierkerne enthalten, sie einfangen oder mit Eisteilchen zusammenstoßen, nimmt mit ihrem Umfang zu.

Für große Tröpfchen beginnt deshalb das Gefrieren bereits bei Temperaturen zwischen  $0$  und  $-4\text{ °C}$  und ist bei  $-15\text{ °C}$  praktisch beendet. Für kleine Tröpfchen - dem Hauptanteil der Wolkentropfen - fängt die Kristallisation dagegen bei etwa  $-10\text{ °C}$  an, erreicht zwischen  $-12$  und  $-15\text{ °C}$  ein Maximum und ist bei ca.  $-20\text{ °C}$  weitgehend abgeschlossen

Unterkühlte Wolkentröpfchen spielen bei der Bildung der fallenden Niederschläge in den mittleren Breiten eine entscheidende Rolle und bedeuten außerdem eine große Gefahr für die Luftfahrt.

Für die Entstehung der in mittleren Breiten fallenden großräumigen Dauerniederschläge aus Schichtwolken ist neben der gasförmigen und festen Phase des Wassers die Existenz von unterkühltem Wolkenwasser die notwendige Voraussetzung.

Wenn sich beim Durchfliegen von Wolken im Temperaturbereich von unter  $0\text{ °C}$  unterkühlte Wolkentröpfchen an der Flugzeugoberfläche anlagern und festfrieren, kann dieser Eisansatz die aerodynamischen Flugeigenschaften bis zum totalen Auftriebsverlust beeinträchtigen.

# Register

- Absorption** : Aufnahme von Strahlungsenergie
- Absolute Temperatur T** : Thermodynamische Temperatur; die Einheit der Temperaturskala ist das Kelvin (K) und ihr Nullpunkt der absolute Nullpunkt von 0 K oder -273,15 °C.
- Allgemeine Zirkulation** : Großräumige Windbewegungen der Erde
- Anthropogen** : Vom Menschen verursacht
- Atomgewicht** : Zahl der Nukleonen
- Atomkern** : Aufbau aus Protonen und Neutronen
- Atomnummer** : Ordnungszahl der Elemente (Anzahl der Protonen)
- Coulombsche Gesetz** : Die Kraft F, mit der sich zwei ungleichnamige oder gleichnamige punktförmige Ladungen  $Q_1$  und  $Q_2$  anziehen oder abstoßen, ist dem Quadrat des Abstandes r umgekehrt proportional.
- $$F = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$
- F : Coulomb-Kraft  
 $Q_1, Q_2$  : Punkt- oder kugelförmige Ladungen  
r : Abstand der beiden Ladungen  
 $\epsilon_0$  : elektrische Feldkonstante
- Dampfdruck** : Teildruck des Wasserdampfes im Gasgemisch Luft
- Deposition** : Übergang vom gasförmigen in den festen Aggregatzustand des Wassers
- Detergenzien** : Stoffe, welche die Oberflächenspannung des Wassers herabsetzen.
- Dipol** : Zwei starr miteinander verbundene, gleich große elektrische Ladungen entgegengesetzter Polarität.
- Eisverdunstung** : Übergang vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand des Wassers
- Elektronen** : Negativ geladene Teilchen mit der Ruhmasse von  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg
- Emission** : Abgabe von Energie in Form von Strahlung
- Evaporation** : Verdunstung von Wasseroberflächen und vom unbewachsenen Erdboden
- Evapotranspiration** : Evaporation + Transpiration
- Hypsometer** : Gerät zur Messung des Luftdruckes durch Bestimmung der Siedetemperatur des Wassers, weil der Siedepunkt vom Luftdruck abhängt
- Impuls** : Produkt der Masse eines Körpers und seiner Geschwindigkeit:  $p = m \cdot v$   
p : Impuls oder Bewegungsgröße  
m : Masse [kg]  
v : Geschwindigkeit [ $m \cdot s^{-1}$ ]
- Interzeption** : Abfangen bzw. Zurückhalten des Niederschlages durch die Vegetation
- Ion** : Elektrisch geladenes Teilchen, das aus einem Atom oder Molekül durch Anlagerung oder Abgabe von Elektronen entsteht

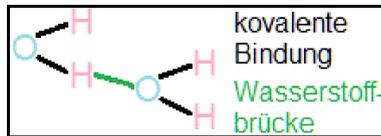
- Ionenbindung** : Auch heteropolare Bindung oder elektrovalente Bindung genannt, die als chemische Bindung auf der elektrostatischen Anziehung positiv und negativ geladener Ionen beruht
- Isotope** : Atome gleicher Protonen aber verschiedener Neutronenzahl
- Joule (J)** : Einheit der Arbeit, Energie oder Wärmemenge;  $1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$   
(N : Newton, m : Meter, s : Sekunde);  
Arbeit, die benötigt wird, um einen Körper mit der Kraft von 1 Newton um die Wegstrecke 1 m zu verschieben.
- Kelvin (K)** : Einheit der absoluten Temperatur T; die Basiseinheit 1 Kelvin ist der 273,16te Teil der absoluten Temperatur des Tripelpunktes von chemisch reinem Wasser.  
 $0 \text{ K} \triangleq -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $0 \text{ }^\circ\text{C} \triangleq 273,15 \text{ K}$
- Kinetische Energie** : Bewegungsenergie; Arbeitsfähigkeit, die ein Körper aufgrund seiner Masse und Geschwindigkeit besitzt;  $W_k = 0,5 m v^2$   
 $W_k$  : kinetische Energie [J]  
m : Masse [kg]  
v : Geschwindigkeit [ $\text{m s}^{-1}$ ]
- Kondensation** : Übergang von der gasförmigen in die flüssige Phase des Wassers; die freiwerdende Kondensationswärme beträgt bei  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  :  $2501 \text{ kJ kg}^{-1}$ .
- Kovalente Bindung** : Atombindung, auch homöopolare oder unpolare Bindung genannt, die meist auf der Bildung von Elektronenpaaren beruht, zu denen jedes Atom ein Elektron beisteuert.
- Latente Wärme** : Wärmeenergie, die bei konstanter Temperatur und konstantem Druck für einen Aggregatzustandswechsel benötigt bzw. dabei freigesetzt wird.
- Lösung** : Einheitlich erscheinendes flüssiges Gemenge, deren zwei oder mehrere Bestandteile bis auf Molekül- oder Ionengröße ineinander verteilt oder gemischt sind
- Luftdruck** : Der Druck, der an einem bestimmten Ort von ruhender Luft allein durch die temperaturabhängige Molekularbewegung der Luftteilchen und ihre Aufpralle auf die Begrenzungsflächen (z.B. Erdboden) herrscht. Die meteorologische Druckeinheit ist das Hektopascal und der mittlere Luftdruck im Meeresniveau beträgt  $1013,25 \text{ hPa}$ .
- Meniskus** : Gekrümmte Oberfläche einer Flüssigkeit in einer Röhre
- Metallische Bindung** : Chemische Bindung von Metallen und Legierungen, die durch das Vorkommen von frei beweglichen Elektronen im Metallgitter gekennzeichnet ist und durch elektrostatische Anziehungskräfte zwischen Metallionen und freien Elektronen verursacht wird.
- Newton (N)** : Kraft, die der Masse von 1 kg die Beschleunigung von  $1 \text{ m s}^{-2}$  verleiht.
- Neutronen** : Elektrisch neutrale Teilchen mit der Ruhmasse von  $1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- Niederschlagshöhe** : Angabe in Litern pro Quadratmeter; 1 Liter pro Quadratmeter ergibt eine Wasserhöhe von einem Millimeter auf dieser Fläche, wenn Abfluss, Versickerung und Verdunstung nicht berücksichtigt werden:  
$$\frac{1 \text{ l}}{\text{m}^2} = \frac{1 \text{ dm}^3}{\text{m}^2} = \frac{10^3 \text{ cm}^3}{10^4 \text{ cm}^2} = 10^{-1} \text{ cm} = 1 \text{ mm}$$

<b>Nukleonenzahl</b>	: Summe der Protonen- und Neutronenzahl (Nukleus, lateinisch Kern)
<b>Normaldruck</b>	: 1013,25 hPa
<b>Orbital</b>	: Möglicher, durch eine mathematische Schwingungsfunktion erfaßbarer Aufenthaltsbereich eines Elektrons der Atomhülle, der durch einen bestimmten Energieinhalt gekennzeichnet ist.
<b>Pascal</b>	: Druckeinheit; $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N m}^{-2}$
<b>Protonen</b>	: Positiv geladene Wasserstoffkerne mit der Ruhmasse von $1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
<b>Quant</b>	: Unteilbares Energieteilchen
<b>Quantenzahl</b>	: <b>Hauptquantenzahl n</b> Maß für die Energie des Elektrons im elektrischen Kernfeld; den einzelnen Energiestufen werden die Zahlen 1 bis 7 zugeordnet und die niedrigste Energiestufe des Elektrons ist durch die Hauptquantenzahl 1 gekennzeichnet.  : <b>Nebenquantenzahl l</b> Maß für den Drehimpuls des Elektrons; Elektronen mit $l = 1, 2, 3, 4$ heißen aus historischen Gründen s-, p-, d-, f-Elektronen.
<b>Relative Atommasse</b>	: Der zwölfte Teil der Masse eines Atoms des Kohlenstoff-Isotops $^{12}\text{C}$ .
<b>Ruhmasse</b>	: Masse des ruhenden Teilchens, weil nach Einstein die Masse eines sich bewegendes Körpers von seiner Geschwindigkeit abhängig ist: $W = m c^2$ $W$ : Energie [J] $m$ : Masse [kg] $c$ : Lichtgeschwindigkeit [ $\text{m s}^{-1}$ ]
<b>Sättigungsdampfdruck</b>	: Maximaler Dampfdruck bei gegebener Temperatur bzw. Druck des Wasserdampfes beim dynamischen Gleichgewichtszustand zwischen der gasförmigen und der flüssigen oder festen Phase des Wassers.
<b>Schale</b>	: Bestimmter Energiebereich, der dem Elektron offensteht und der durch eine verbotene Zone vom nächsten Bereich getrennt ist.
<b>Siedetemperatur</b>	: Temperatur einer in die gasförmige Phase übergehenden Flüssigkeit, bei der ihr Dampfdruck gleich dem äußeren Luftdruck ist; bei einem Luftdruck von 1013,25 hPa siedet chemisch reines Wasser bei $100,0 \text{ }^\circ\text{C}$ .
<b>Schmelztemperatur</b>	: Temperatur, bei der ein Stoff vom festen in den flüssigen Aggregatzustand übergeht; die Schmelztemperatur ist vom Stoff und nur geringfügig vom Druck abhängig; sauberes Eis schmilzt im Allgemeinen bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , seine Schmelztemperatur kann aber z.B. durch Kochsalzstreuung bis auf fast $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ gesenkt werden.
<b>Spezifische Wärmekapazität c</b>	: Wärmemenge, die benötigt wird, um die Temperatur eines Körpers mit der Masse von 1 kg um 1 K zu erhöhen; c hängt davon ab, ob die Erwärmung bei konstantem Druck oder konstantem Volumen erfolgte. Bei flüssigem Wasser ist dieser Unterschied nur gering, so dass er vernachlässigt werden kann. Für Wasserdampf jedoch ergeben sich zwei unterschiedliche spezifische Wärmekapazitäten. $c_{iv}$ : spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf bei konstantem Volumen; $c_v = 1,39 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $c_{ip}$ : spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf bei konstantem Druck: $c_p = 1,85 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ Wird Wasserdampf bei konstantem Druck p die Wärmemenge Q zugeführt, so dehnt er sich aus und leistet dabei Ausdehnungsarbeit. Die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck $c_{ip}$ ist damit immer größer als die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen $c_{iv}$ .

<b>Spin</b>	: Eigendrehung des Elektrons
<b>Sublimation</b>	: Übergang vom gasförmigen in den festen Aggregatzustand des Wassers; die freiwerdende Sublimationswärme beträgt $2835 \text{ kJ kg}^{-1}$ bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$
<b>t</b>	: Temperatur [ $^\circ\text{C}$ ]
<b>T</b>	: Absolute Temperatur [K]
<b>Taupunkt <math>t_d</math></b>	: a) Sättigungstemperatur des aktuellen Dampfdruckes $e$ in bezug auf eine ebene, chemisch reine Wasseroberfläche. b) Temperatur, auf die ein Volumen feuchter Luft isobar abgekühlt werden muss, damit Wasserdampfsättigung in bezug auf eine ebene, chemisch reine Wasseroberfläche eintritt.
<b>Translationsbewegung</b>	: Geradlinige, fortschreitende Bewegung
<b>Transpiration</b>	: Verdunstung von Lebewesen, besonders von der Vegetation
<b>Tripelpunkt</b>	: Die Koordinaten des Tripelpunktes eines Stoffes geben den Druck und die Temperatur an, bei der die feste, flüssige und gasförmige Phase gleichberechtigt nebeneinander existieren; Tripelpunkt von $\text{H}_2\text{O}$ : $T_{tr} = 273,16 \text{ K}$ ( $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ; $p_{tr} = 6.12 \text{ hPa}$
<b>Umwandlungs- temperatur</b>	: Temperatur, bei der eine Phase des Wassers in die andere übergeht
<b>Umwandlungswärme</b>	: Wärmeenergie, die zur Phasenumwandlung benötigt oder die bei der Aggregatzustandsänderung freigesetzt wird.
<b>Unterkühltes Wasser</b>	: Flüssiges Wasser mit Temperaturen von unter $0 \text{ }^\circ\text{C}$
<b>Van-Der-Waals-Kräfte</b>	: Schwache Bindungskraft, die nach dem niederländischen Physiker Van Der Waals (1837 - 1923) genannt wurde; für das Zustandekommen der Bindungskraft können verschiedene Ursachen verantwortlich sein: a) Bilden benachbarte Moleküle elektrische Dipole mit antiparalleler Orientierung, so kann die Van-Der-Waals-Bindung auf die Anziehung dieser Dipole zurückzuführen sein; b) Kräfte, die durch die gegenseitige Beeinflussung der Elektronenbewegung benachbarter Atomhüllen entstehen und die bei allen Atomen und Molekülen wirksam sind. Obwohl die Van-Der-Waals-Kräfte um viele Zehnerpotenzen größer sind als die Gravitationskräfte, erscheinen sie im Verhältnis zu den Atombindungskräften (kovalente Bindung) ziemlich klein.
<b>Verdampfen</b>	: Übergang der flüssigen in die gasförmige Phase des Wassers
<b>Verdunstung</b>	: Übergang der flüssigen in die gasförmige Phase des Wassers in offener Umgebung
<b>Wärme</b>	: Wärme, eine besondere Form der Energie, weist - wie die Arbeit - die Einheit Joule (J) auf. Wird einem Festkörper oder einer Flüssigkeit Wärme zugeführt, so steigt seine Temperatur.
<b>Wasserdampfsättigung</b>	: Über jeder Flüssigkeit entsteht durch Verdunstung ein Dampf, dessen Druck bis zum Sättigungsdampfdruck, dem temperaturabhängigen Höchstwert, ansteigen kann, Flüssigkeit und Dampf befinden sich nun im dynamischen Gleichgewichtszustand. Wird aber der Dampf von der Flüssigkeit durch irgendeinen Prozess getrennt und vergrößert man gleichzeitig sein Volumen oder erhöht seine Temperatur, so bleibt der Dampf ungesättigt. Dieser Fall tritt auch ein, wenn nicht genügend Flüssigkeit bei gegebener Temperatur zum Erreichen des maximalen Dampfdruckes zur Verfügung steht.

Der Dampf über einer Flüssigkeit, der sich im Gleichgewichtszustand mit ihr befindet, ist gesättigt. Dampf- und Sättigungsdampfdruck sind dann gleich groß.

**Wasserstoffbrücke** : Wasserstoffbrückenbindung, die bei Wasserstoffatomen auftreten kann, die mit anderen Atomen eine kovalente Bindung eingegangen sind; diese zwischenmolekulare Anziehung, die hauptsächlich von OH-Gruppen ausgeht und zu einem zweiten Sauerstoffatom des Wassermoleküls gebildet wird. Ein Wassermolekül ist so in der Lage, zu zwei benachbarten Sauerstoffatomen Wasserstoffbrücken herzustellen.



Wasserstoffbrücke (Abb. 14)

## Literaturverzeichnis

- [1] Baumgartner, A./Reichel, E. : Die Weltwasserbilanz;  
R. Oldenbourg Verlag, 1975
- [2] Bohr, P.,  
Deutscher Wetterdienst : Lernunterlagen für den Physikunterricht an der WDS ;  
Neustadt/W 1976/1977
- [3] DWD : Deutscher Wetterdienst:  
Leitfaden 'Allgemeine Meteorologie'
- [4] DWD : Deutscher Wetterdienst (DWD):  
promet Jahrgang ?, Heft ?
- [5] Hering, E./Martin, R./Stohrer, M : Physik für Ingenieure, 3. Auflage;  
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1989
- [6] Höfling, O. : Physik, 12. Auflage;  
Ferd. Dummlers Verlag, Bonn 1979
- [7] Knorr, H. : Lernunterlagen; WDS Langen:  
Deutscher Wetterdienst
- [8] Internet : Wikipedia, Atomorbital (30.04.2014)
- [9] Internet : Wikipedia, Unterkühlung (Thermodynamik) (06.05.2014)
- [10] Liljequist, G.H., Cihak, C : Allgemeine Meteorologie;  
3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn, 1984
- [11] Meteorological Office : Meteorological Glossary;  
Fünfte Auflage, Her Majesty's Stationary Office, London 1972
- [12] Internet : Peixoto und Kettani (1973)
- [13] Internet : Wikipedia, Ionische Bindung (17.05.2014)
- [14] Internet : Wikipedia, Metallische Bindung (17.05.2014)
- [15] Internet : Wikipedia, Wasserstoffbrückenbindung (17.05.2014)