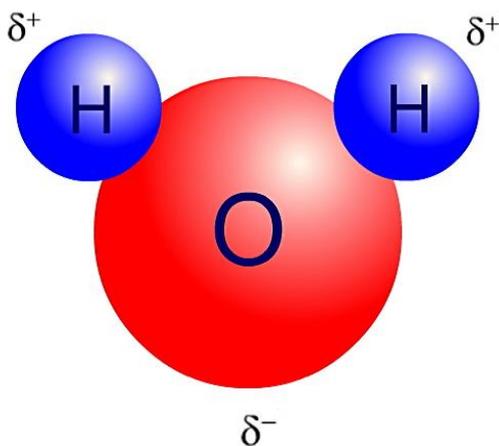


## Bedeutung des Wassers als Lösungsmittel

### Warum ist Wasser ein gutes Lösungsmittel?

Ob Milch oder Kaffee, ob Spülen oder Waschen, ob Papierherstellung oder Speisesalzgewinnung, ob Blut oder Pflanzensaft: Wasser ist in der Natur und in der Technik das meist verwendete Lösungsmittel überhaupt. Aus praktischer Erfahrung weiß eigentlich jeder, dass Wasser ein gutes Lösungsmittel ist. Aber warum ist das so?

### Wasser ist ein Dipolmolekül



Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H) bilden in der Verbindung Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) gemeinsame Elektronenpaare. Der elektronegravere Sauerstoff zieht dabei die Elektronen zu sich hin. Durch diese partielle Ladungsverschiebung wird das Wassermolekül polar, es besitzt ein negatives und ein positives Ende.

Dieser Dipolcharakter ist entscheidend für die Eigenschaften des Wassers als Lösungsmittel. Doch welche Stoffe werden überhaupt von welchen Lösungsmitteln gut gelöst?

Abb. 1: Wasser als Dipolmolekül.

### Gleiches löst Gleiches

Für die Löslichkeit von Feststoffen und Flüssigkeiten in Flüssigkeiten gilt:

Polare Stoffe lösen sich am besten in polaren Lösungsmitteln, unpolare Stoffe lösen sich am besten in unpolaren Lösungsmitteln.

Zum Beispiel lösen sich langkettige, unpolare Kohlenwasserstoffe wie Mineralöle nur in sehr geringen Mengen in Wasser (polares Lösungsmittel). Aber sie lösen sich sehr gut in Benzin, das selbst ein flüssiges, unpolares Kohlenwasserstoffgemisch ist. Dagegen löst sich z. B. Zucker (sog. Kohlenhydrate) gut in Wasser, denn mit ihren vielen OH-Gruppen sind die Kohlenhydrate relativ polar.

Für die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten gilt:

Polare Gase lösen sich am besten in polaren Lösungsmitteln, unpolare Gase lösen sich am besten in unpolaren Lösungsmitteln. Soweit scheint es keinen Unterschied zu den Lösungen von Feststoffen und Flüssigkeiten zu geben. Doch anders als bei den Lösungen von Feststoffen und Flüssigkeiten ist die Löslichkeit druckabhängig und eine Erhöhung der Temperatur führt zur Abnahme der Löslichkeit. Dieses Verhalten rührt daher, dass die kleinsten Teilchen der Gase, ihre Atome bzw. Moleküle, sich praktisch unabhängig voneinander mit hoher Geschwindigkeit bewegen. An der Grenze zwischen Gas und Flüssigkeit kommt es deshalb ständig zum Eintritt von Gasteilchen in die Flüssigkeit. Andererseits kommt es auch ständig zum Austritt von Gasteilchen aus der Flüssigkeit. Anders gesagt, ständig diffundieren Gasteilchen durch die Grenzfläche in die Flüssigkeit hinein und heraus.

Die Eintrittsrate von Gasteilchen in das Lösungsmittel ist dabei proportional zum Druck des Gases über dem Lösungsmittel und der Austritt ist proportional zur Konzentration der Gasteilchen im Lösungsmittel. Die Sättigungskonzentration ist erreicht, wenn ein dynamisches Gleichgewicht zwi-

schen beiden Diffusionsrichtungen besteht. Die Sättigungskonzentration ist proportional zum Druck des Gases im Gasraum.

Dies wird durch das Gesetz von Henry beschrieben:

$$\text{Sättigungskonzentration} = \text{Partialdruck} \times \text{Gaslöslichkeit}$$

Unter Partialdruck versteht man bei Gasgemischen, wie z. B. Luft, den Druckanteil des betrachteten Gases am Gesamtdruck des Gasgemischs über der Flüssigkeit bzw. dem Lösungsmittel.

Und noch ein Gesetz ist wichtig:

In der Regel nimmt die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten mit steigender Temperatur ab.

Ebenso wirken sich im Wasser gelöste Feststoffe mindernd auf die Gaslöslichkeit aus. Deshalb ist beispielsweise in Meerwasser weniger Sauerstoff löslich als in Süßwasser.

### Lösung von Gasen in Wasser

Die unterschiedliche Löslichkeit der Gase in Wasser erklärt sich dadurch, dass die polaren Gasteilchen durch Wechselwirkung mit den polaren Wassermolekülen stärker in der Lösung zurückgehalten werden als die unpolaren Gasteilchen. Dies wird noch verstärkt, wenn es mit den gelösten Gasteilchen zu Folgereaktionen mit dem Wasser kommt.

Gas	Löslichkeit	Gas	Löslichkeit
Helium He	0,0015	Ethan C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,064
Wasserstoff H <sub>2</sub>	0,0016	Kohlenstoffdioxid CO <sub>2</sub>	1,688
Stickstoff N <sub>2</sub>	0,019	Schwefeldioxid SO <sub>2</sub>	113
Kohlenstoffmonoxid CO	0,029	Ammoniak NH <sub>3</sub>	518
Sauerstoff O <sub>2</sub>	0,0434	Chlorwasserstoff HCl	721

Tabelle 1: Löslichkeit einiger Gase in Wasser in g/kg Wasser bei 20 °C und Normaldruck.

So lösen sich zum Beispiel die polaren Gase Ammoniak (NH<sub>3</sub>) oder Chlorwasserstoff (HCl) bestens in Wasser. Allerdings gibt es bei diesen Gasen Folgereaktionen mit dem Wasser: Durch Aufspaltung in H<sup>+</sup> und Cl<sup>-</sup> ist die wässrige Lösung von Chlorwasserstoff eine Säure und durch Bildung von NH<sub>4</sub><sup>+</sup> und OH<sup>-</sup> ist die wässrige Lösung von Ammoniak eine Base.

Aber laut Gesetz von Henry müssen sich auch unpolare Gase wie Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und selbst Edelgase wie Helium in Wasser lösen. Zwar in geringerem Umfang, aber doch merklich.

### Lösung von Salzen in Wasser

Salze sind in der Chemie die ionischen Verbindungen, die in festem Zustand vorliegen und sich in Wasser lösen lassen.

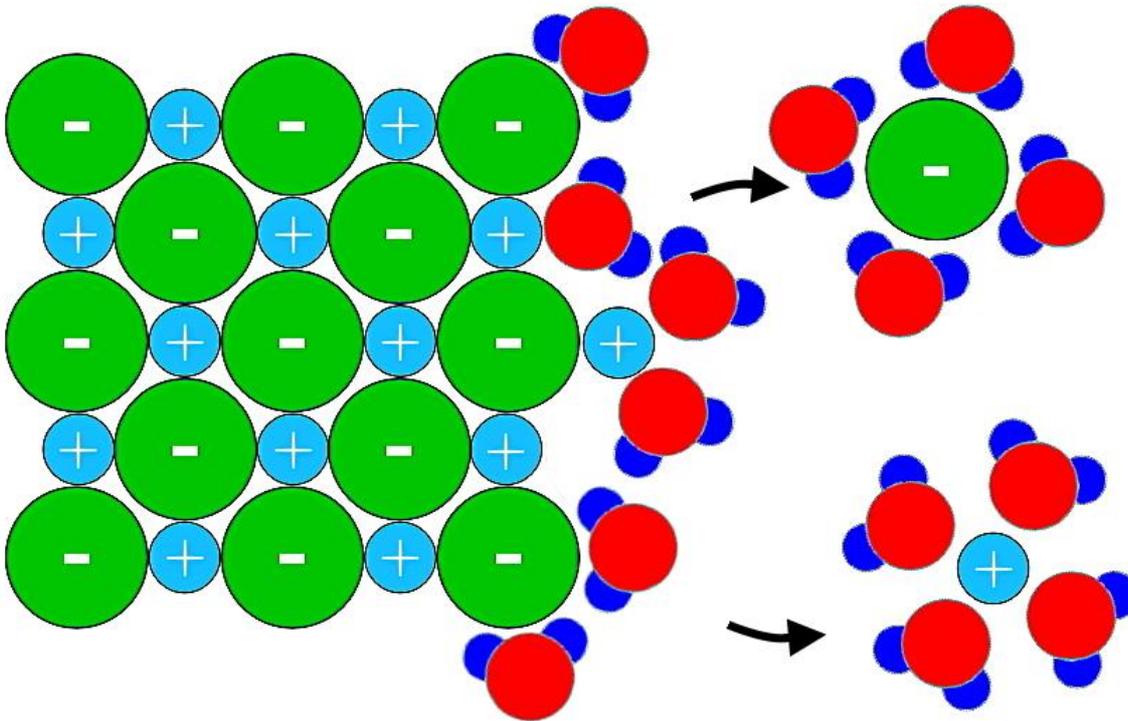


Abb. 2: Auflösungsprozess von Salzen in Wasser.

Im Kristallgitter der Salze werden die Ionen durch elektrostatische Wechselwirkungen fest zusammengehalten. Diese Ionen können aus dem Kristallgitter herausgelöst werden, indem sie mit den entgegengesetzt geladenen Enden der Wasserdipole in Wechselwirkung treten. Die herausgelösten Ionen werden von Wassermolekülen umlagert, wobei Energie frei wird. Diesen Vorgang bezeichnet man als Hydratation und die freigesetzte Energie als Hydratationsenergie. Ist diese Hydratationsenergie größer als die Bindungsenergie der Ionen im Kristallgitter, kommt es zur Lösung (z. B. bei Kochsalz, NaCl). Ist dagegen die Bindungsenergie im ionischen Kristallgitter größer als die Hydratationsenergie, ist der Stoff unlöslich. Deshalb ist z. B. die ionische Verbindung  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wasserunlöslich und kein Salz.

### Ohne das Lösungsmittel Wasser gäbe es kein Leben

Grundlage des menschlichen und fast des gesamten tierischen Lebens auf der Erde ist die Photosynthese der Pflanzen. Bei ihr entsteht als Grundbaustein der Biomasse Glukose aus Licht, Wasser und Kohlenstoffdioxid. Doch Wasser ist nicht nur Ausgangsstoff der Photosynthese, es ist darüber hinaus unverzichtbares Lösungsmittel für den Transport von Mineralien und anderen Stoffen. Wasser als Lösungsmittel ist also Grundlage für das Wachstum der Pflanzen überhaupt.

Auch bei Mensch und Tier laufen viele biochemische, enzymatisch katalysierte Reaktionen in Wasser als Lösungsmittel ab und erfordern Wasser als Edukt oder setzen Wasser als Produkt frei. Wichtig sind z. B. die Hydrolysereaktionen bei der Verdauung, bei denen die Moleküle der Lebensmittel wie Lipide, Kohlenhydrate und Proteine gespalten werden.

Sowohl der gesamte Stofftransport im Körper (in Blut und Lymphe) als auch der Abtransport und die Ausscheidung von Abbauprodukten über die Niere beruht auf wässrigen Lösungen. Die Niere arbeitet übrigens mit Umkehrosmose, einem Prinzip, das auch in der Technik genutzt wird, z. B. in Meerwasserentsalzungsanlagen.

Nicht zu vergessen, die Funktion von Nerven- und Gehirnzellen beruht auf Reizleitung über Ionen, was ohne einen Mindestgehalt an Wasser, in dem die Ionen gelöst sind, nicht möglich ist. Dass man durch viel Wassertrinken klüger wird, ist allerdings ein typisches Internetgerücht.

### **Wasser als Lösungsmittel im Ökosystem Erde**

#### **Niederschläge reinigen die Atmosphäre**

Alles Süßwasser auf der Erde stammt letztlich aus verdampftem Wasser, das über dem Festland als Schnee oder Regen niederging. Man könnte meinen, verdampftes, also destilliertes Wasser, sei rein. Doch die Niederschläge spülen die Luftmassen richtig durch und reinigen die Atmosphäre von Staubteilchen und Rußpartikeln. Zusätzlich lösen sich Gase wie Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff, aber auch durch den Menschen verursachte Abgase, wie z. B.  $\text{SO}_2$  und  $\text{N}_2\text{O}$  aus Kraftfahrzeugen, Kraftwerken und Industrieanlagen. So schön der Reinigungseffekt der Atmosphäre durch das gute Lösungsmittel Wasser ist, so schädlich kann sich z. B. der dadurch entstehende „saure Regen“ für die Vegetation, aber auch für die Trinkwassergewinnung auswirken.

#### **Reines Wasser gibt es in der Natur nicht**

Wasser kommt somit in der Natur schon als Regen nicht in reiner Form vor. Auf der Erdoberfläche gehen durch Auswaschen aus dem Boden erhebliche Mengen von Mineralsalzen (z. B. Alkali- und Erdalkalisalze) in Lösung. Aus dem Stoffwechsel und Abbauprodukten von Pflanzen kommen organische Verbindungen dazu, überdies Mikroben und ihre Stoffwechselprodukte. Zusätzlich lösen sich im Wasser eine Unzahl von Stoffen aus Landwirtschaft und Industrie. Vor allem aus der Landwirtschaft führen gelöster Dünger (z. B. Nitrat aus Kunstdünger und Gülle) sowie Pestizide, Fungizide und Herbizide zur Belastung des Wassers. Was vor allem dann zum Problem wird, wenn aus dem belasteten Grundwasser und Flusswasser wieder reines Trinkwasser gewonnen werden soll. Stark Nitrat-belastetes Wasser ist derzeit nur nach höchst kostspieligem Reinigungsaufwand wieder als Trinkwasser verwendbar. Wie aus dem Bericht über die Umsetzung der Nitratrichtlinie der Europäische Kommission vom Oktober 2013 hervorgeht, weisen Deutschland und Malta die höchsten Nitratkonzentrationen im Grundwasser unter den Mitgliedsländern auf. (Die Belastung aus dem Abwasser der Industrie hält sich heute in einigen Ländern der Erde dank verschärfter gesetzlicher Vorschriften in Grenzen, ist aber in vielen Gebieten weltweit noch ein zunehmendes Problem.)

## In Wasser gelöste Gase und ihre Bedeutung für das Ökosystem

### Sauerstoff

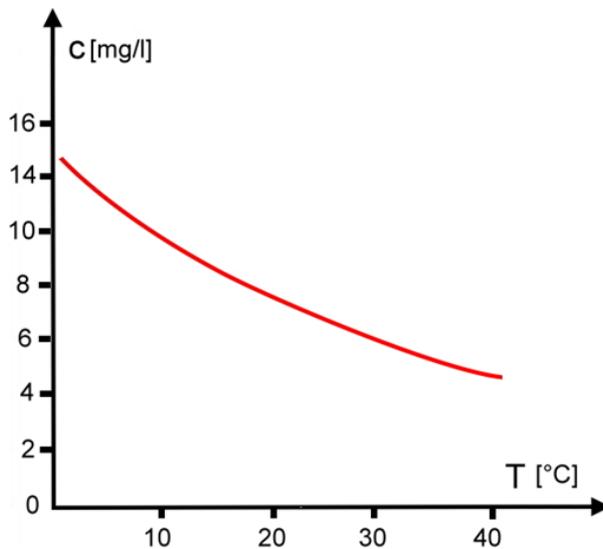


Abb. 3: Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser bei Normaldruck.

Dass sich Sauerstoff in Wasser relativ gut löst, sieht man an den aeroben, also Sauerstoff atmenden Wassertieren, wie Fischen und einer Vielzahl von Kleinlebewesen, die einen erheblichen Sauerstoffbedarf haben. Allerdings nimmt mit zunehmender Wassertemperatur der Sauerstoffgehalt im Wasser ab.

Fische mit hohem Sauerstoffbedarf leben deshalb in kühleren Gewässern. Dazu gehören z. B. Forellen, Äschen und Moränen, die über 5 Milligramm Sauerstoff pro Liter (mg/l) benötigen. Karpfen und andere Weißfische (Brachsen, Schleien, Welse) sind dagegen anspruchslos und können auch in Gewässern mit Sauerstoffgehalt von nur bis zu 3 mg/l überleben. Unter 1 mg/l können jedoch auch sie nicht existieren.

### Stickstoffoxide und Ammoniak

Stickstoffoxide aus Verbrennungsgasen, Kunstdünger und Ammoniak aus der Viehhaltung können auch weit von den Emissionsquellen entfernt durch den Regen in den Boden eingebracht werden. Diese unerwünschte Stickstoff-„Düngung“ wirkt schädigend auf viele Baumarten. Das führt vor allem bei Laubbäumen, insbesondere den Eichen, zu Schäden. Neben Blattschädigungen wie Gelb- und Braunfärbung kommt es zur Störung des Winter-Sommer-Safthaushalts und zu vermehrten Frostschäden. In Deutschland waren im Jahre 2016 88 % der Eichen und 76 % der Buchen geschädigt.

### Kohlenstoffdioxid

#### Wirkung auf das Trinkwasser

Wesentlich besser als Sauerstoff ist Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) in Wasser löslich. Die dabei entstehende Kohlensäure zerfällt in Wasserstoffionen (Protonen,  $\text{H}^+$ ) und Hydrogencarbonat-Ionen ( $\text{HCO}_3^-$ ). Dies ist eine saure Reaktion, somit sinkt der pH-Wert des Wassers bei Lösung von Kohlenstoffdioxid. Damit wird im Ökosystem eine Kohlenstoffdioxidreserve bereitgestellt. Dieses saure, Kohlensäure-haltige Wasser löst Kalkstein (Calciumcarbonat,  $\text{CaCO}_3$ ) als Calcium-Hydrogencarbonat ( $\text{Ca}^{2+}(\text{HCO}_3^-)_2$ ) auf. Überall, wo Regen auf kalkhaltigen Untergrund fällt, gibt es also auch kalkhaltiges Grund- und Quellwasser. Im Haushalt kann das kalkhaltige Trinkwasser lästig sein, da bei höheren Temperaturen das Calciumhydrogencarbonat wieder zerfällt und der Kalk als Niederschlag ausfällt (Verkalken von Wasserkochern, Kalkflecken auf Edelstahl-spülen usw.).

#### Versauerung der Meere

In der Natur macht die zunehmende Versauerung des Meerwassers durch Eintrag des Treibhausgases  $\text{CO}_2$  dagegen echte Probleme. Durch menschengemachte Zunahme des Kohlenstoffdioxids in der Atmosphäre ist der pH-Wert des Meerwassers in den letzten 150 Jahren von ca. 8,16 auf

8,05 gesunken. Dadurch beginnen schon vielerorts die aus Kalk aufgebauten Korallen abzusterben. Ganz allgemein sind alle Meereslebewesen betroffen, die einen Kalkpanzer haben, also z. B. auch Muscheln. Und es kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch andere Meeresorganismen empfindlich auf die Versauerung reagieren.

### **Wirkung auf den Treibhauseffekt**

Kohlenstoffdioxid löst sich gut in Wasser, das gilt auch für den größten Wasserspeicher der Erde, die Meere.

Als im Lauf der letzten 150 Jahre durch die Industrialisierung und die Zunahme der Erdbevölkerung die CO<sub>2</sub>-Emissionen enorm zunahmten, blieb zunächst relativ wenig davon in der Atmosphäre. Sehr viel CO<sub>2</sub> wurde gemäß Henrys Gesetz mit dem steigenden Partialdruck in der Atmosphäre im Meer gelöst. Das Meer wirkte sozusagen als Puffer für die Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre. Doch nun kommt es durch die zunehmende Erderwärmung und die damit verbundene Erwärmung der Meere zu einem gegenläufigen Effekt: Das warme Meerwasser kann nicht mehr so viel CO<sub>2</sub> aufnehmen wie früher. Mehr Kohlenstoffdioxid verbleibt in der Atmosphäre bzw. gelangt aus dem Meer dorthin und verstärkt den Treibhauseffekt. Und das wiederum beschleunigt den Klimawandel. Während in den 1.000 Jahren vor Beginn der Industrialisierung die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Meeren bei ca. 280 ppm lag, erreichte sie im Jahre 2017 mit über 410 ppm einen historischen Höchststand. Da allerdings auch viele andere Faktoren auf den Klimawandel wirken, sind sich die Wissenschaftler nicht sicher, wie stark und wie schnell der „Meereseffekt“ auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre wirken wird.