

Wasseraufbereitung

1	Eingrenzung des Themas Wasseraufbereitung	3
1.1	Schnittstellen zu Physik, Chemie, Biologie	3
1.2	Behandlung, Reinigung, Aufbereitung – Begriffsklärungen	3
2	Physikalische Verfahren	3
2.1	Mechanische Trennung nach Teilchengröße	3
2.1.1	Rechen oder Siebe	3
2.1.2	Filtration	3
2.2	Mechanische Trennung nach Dichte	6
2.2.1	Sedimentation	6
2.2.2	Hydro-Zyklone	6
2.2.3	Flotation	7
2.3	Thermische Trennung nach Siedepunkt	7
2.3.1	Destillation – das Prinzip	7
2.3.2	Destillation zur Entsalzung	7
2.3.3	Destillation zur Reinstwassergewinnung	7
3	Physikalisch-chemische Verfahren	7
3.1	Schwerkraft und Chemie	8
3.1.1	Problemfall: Abtrennung von Kolloiden	8
3.1.2	Flockung	8
3.2	Membranfilterung im elektrischen Feld	8
3.2.1	Elektro-Deionisation – das Prinzip	8
3.2.2	Elektro-Deionisation zur Entfernung bestimmter Ionen	8
3.2.3	Elektro-Deionisation zur Vollentsalzung im Sinne von Reinstwasser	9
3.3	Adsorption	9
3.3.1	Oberflächenbindung als Grenzfall chemischer Bindung	9
3.3.2	Adsorption an Aktivkohle, ein Standardverfahren der Chemie	9
3.3.3	Aktivkohlefilter in der Wasseraufbereitung	9
4	Chemische Verfahren	10
4.1	Ionenaustausch	10
4.1.1	Enthärtung	10
4.1.2	Deionisation – Vollentsalzung	10
4.2	pH-Wert-Einstellung	11
4.2.1	pH-Wert – die Kraft des Wasserstoffs	11
4.2.2	Neutralisation	11
4.2.3	Ansäuerung	11
4.3	Chemischer Abbau bzw. Umbau	11
4.3.1	Photolytischer Abbau durch UV-Licht	11
4.3.2	Wasserdesinfektion mit UV-Licht	11
4.3.3	UV-Licht gegen Legionellen in Haushalt, Hotels und Schwimmbädern	12
4.3.4	Oxidation	12
4.3.5	Oxidativer Schadstoffabbau mit Luftsauerstoff	12
4.3.6	Oxidativer Schadstoffabbau und Desinfektion mit Peroxiden und Ozon	12
4.3.7	Kombination oxidativer und photolytischer Prozesse	12
4.3.8	Chlor zur Desinfektion	12

4.4	Trennung nach Löslichkeit.....	13
4.4.1	Lösungsgleichgewicht ermöglicht Ausfällung	13
4.4.2	Enteisenung und Entmanganung von Trinkwasser	13
4.4.3	Ausfällung von Phosphat aus dem Abwasser mit Eisensalzen.....	13
5	Biologische Verfahren.....	13

1 Eingrenzung des Themas Wasseraufbereitung

1.1 Schnittstellen zu Physik, Chemie, Biologie

Die Aufbereitung, Behandlung bzw. Reinigung von Wasser spielt in den verschiedensten Bereichen unseres Lebens eine wichtige Rolle: Aufbereitung von Trinkwasser für die privaten Haushalte, Aufbereitung von Brauch- und Prozesswasser in der Industrie, Behandlung bzw. Reinigung von Wasser in Kreislaufprozessen wie im Schwimmbad oder in vielen Produktionsprozessen der Industrie, Behandlung bzw. Klärung von Abwasser. Die dabei angewandten Verfahren werden in physikalische, physikalisch-mechanische, physikalisch-chemische, chemische und biologische Verfahren unterschieden. Sie sind im Prinzip in allen Anwendungsbereichen dieselben, auch wenn sie in der Praxis in den verschiedenen Bereichen in unterschiedlichem Umfang und unterschiedlicher Verfeinerung angewendet werden.

Dieser Leitfaden stellt deshalb die Verfahren in ihren naturwissenschaftlich-technischen Zusammenhängen dar. Ganz im Sinne von lebensnahem Unterricht wird es so Lehrkräften und Schülerinnen und Schülern am Beispiel des „Lebenselixiers“ Wasser erleichtert, Verbindungen zum Unterricht in den naturwissenschaftlichen Fächern herzustellen.

1.2 Behandlung, Reinigung, Aufbereitung – Begriffsklärungen

In der strengen Fachsprache der jeweiligen Branchen werden die Begriffe unterschiedlich eingesetzt. Streng genommen ist „Behandlung“ der allumfassende Oberbegriff. In der Praxis der verschiedenen Branchen wird er stets dann eingesetzt, wenn allgemein von einer Veränderung der Wasserqualität die Rede ist. Manchmal ist auch eine „neutral“ klingende Sprachregelung nötig, sodass man, wenn ein hoher oder gar gefährlicher Gehalt an Schadstoffen vorliegt, auch oft von Behandlung spricht. So spricht der Fachmann bei der Abwasserentsorgung mal von Behandlung, mal von Klärung oder von Reinigung des Abwassers und meint damit jeweils das Gleiche.

Von „Aufbereitung“ wird dagegen bei der Trink- oder Reinwasseraufbereitung gesprochen, wenn die Qualität des vorgefundenen Wassers für den Verwendungszweck noch ungenügend ist. Also z. B. Aufbereitung von Rohwasser (Brunnenwasser, Quellwasser, Grundwasser etc.) zu Trinkwasser oder Aufbereitung von Trinkwasser zu Reinstwasser in der Pharmazie usw.

2 Physikalische Verfahren

2.1 Mechanische Trennung nach Teilchengröße

2.1.1 Rechen oder Siebe

Bei der Abtrennung von relativ groben Festkörpern spricht man bei Loch- oder Netzmaschengrößen von ca. 0,5 bis 10 mm von Sieben, bei größeren Weiten von 10 cm und mehr spricht man von Rechen. Eingesetzt werden sie z. B. bei der Entnahme von Rohwasser für Industrierwasser- und Trinkwassergewinnung aus Flüssen und Seen, genauso wie in der Eingangsstufe von Kläranlagen.

2.1.2 Filtration

Unter Filtration versteht man die Abtrennung von Feststoffen aus Flüssigkeiten durch die Poren eines Filtermediums, die für Körper, die eine gewisse Größe überschreiten, nicht passierbar sind. Diese Trennbarriere können die Poren von Papieren oder Kunststoffmembranen sein, aber auch die Poren in Mineralkörnern selbst (Kieselgur, Aluminiumoxid) oder die feinen Hohlräume zwischen kompakt zusammengelagerten Sandkörnern („Filterbett“). Neben der Abtrennung aufgrund der Teilchengröße (Siebeffekt) spielt bei der Partikelabtrennung im Rahmen der Trinkwasseraufbe-

reinigung auch die Anhaftung von kleinen Partikeln an der Oberfläche des Filterkorns eine große Rolle. Nach unten kann die Porengröße so klein werden, dass sie Molekülgröße erreicht (Nanofiltration).

Sandfilter

Sandfilter werden häufig eingesetzt, um das Wasser von Schwebstoffen zu befreien. Von Schwebstoffen spricht man, wenn die im Wasser verteilten Feststoffe („Suspension“) besonders fein und relativ leicht sind. D. h. eine Abtrennung durch Absetzenlassen (Sedimentation) würde sehr lange dauern. Der Filter besteht aus einer Schicht, die sich aus Quarzsandkörnern verschiedener Korngröße zusammensetzt. Die ausgefilterten Schwebstoffe werden in den Porenräumen zwischen den Quarzsandkörnern und an deren Oberfläche festgehalten und erhöhen mit zunehmender Filterlaufzeit den Filterwiderstand. Um den Sandfilter vor völliger Verstopfung zu schützen, muss dieser regelmäßig gespült werden. Das geschieht mit Reinwasser und nach Erfordernis mit Luft-Wasser-Gemisch im Gegenstrom. Das dabei entstehende Spülabwasser muss ebenfalls gereinigt werden. Sandfilter sind Standardfilter in der ersten Stufe der Aufbereitung von Rohwasser zu Trinkwasser bzw. zu Prozesswasser in der Industrie sowie in der Abschlussreinigung von kommunalen Kläranlagen.

Papierfilter

Die Flachpapierfilter, wie man sie im Chemielabor verwendet bzw. aus dem Chemieunterricht kennt, aber auch Papierfilterkerzen u. Ä. werden in der Regel nicht zur Wasseraufbereitung verwendet. Denn diese Filter sind Einwegfilter und die Material- und Arbeitskosten (Austausch) wären in der Behandlung großer Wassermengen viel zu groß.

Membranfilter

Hier verwendet man heutzutage in der Regel Kunststoffmembranen, wenn auch prinzipiell Metall- und Keramikmembranen möglich sind. Je nach Größe der abzutrennenden Teilchen spricht man von Mikrofiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration und Umkehrosmose.

Mikrofiltration	Diese Filter bestehen meist aus organischem Material oder Keramik und haben eine Porengröße im Mikrometer-Bereich von 0,05 bis 10 µm. Fein suspendierte Feststoffe, wie u. a. Fasern, evtl. Proteine und größere Mikroorganismen (Amöben), können damit abgetrennt werden. Um den Membranwiderstand zu überwinden, muss als treibende Kraft für den Stofftransport eine hydrostatische Druckdifferenz von ca. 0,1 bis 2 bar vorhanden sein. Einsatzgebiet ist z. B. die Entfernung der feinen Papierfasern aus dem Kreislaufwassers in der Papierherstellung oder die Nachbehandlung von gereinigtem Abwasser.
Ultrafiltration	Ultrafiltration wird mit Porenweiten von etwa 0,005 bis 0,15 µm angewendet. Damit können Makromoleküle, Viren, Kolloide und Bakterien abgetrennt werden. Die Druckdifferenz muss etwa 0,1 bis 5 bar betragen. Eingesetzt wird diese Art der Filtration zum Beispiel als Haupt- bzw. Vorstufe in der Aufbereitung von Rein- bzw. Reinstwasser in der Getränke- und Lebensmittelindustrie bzw. Pharmazie und Halbleiterindustrie. In der Trinkwasseraufbereitung können Ultrafiltrationsmembranen

	nen zur Partikelentfernung eingesetzt werden, um den Erfolg der nachgeschalteten Desinfektion sicherzustellen.
Nanofiltration	<p>Nanofilter, hauptsächlich aus homogenen Polymerschichten gefertigt, werden mit Porenweiten im Nanometer-Bereich von etwa 0,7 bis 10 nm angewendet. Damit können organische Verbindungen, Ionen (zweiwertige), Farbstoffe, Pestizide und auch Herbizide abgetrennt werden. Hier wird eine Druckdifferenz von 3 bis 20 bar benötigt und dennoch beträgt der Reinwasserdurchfluss nur noch 10 bis 15 % des Durchflusses durch einen Mikrofilter. Dies ist eine wichtige Stufe in der Reinstwasseraufbereitung, aber evtl. auch in der Vorbehandlungsstufe bei Abwasser aus entsprechend belastenden Produktionsprozessen.</p> <p>Ultra- und Nanofiltration als physikalisch-chemischer Prozess: Genau genommen funktioniert ein Membranfilter bei kleinster Porengröße nicht mehr nur als mechanischer Filter. Ist die Porengröße ähnlich der Größe der durchzulassenden oder zu sperrenden Stoffmoleküle oder Ionen, spielen auch die Adhäsionskräfte zwischen den Teilchen und dem Porenrand eine Rolle. Die Molekülform der zu filtrierenden Stoffe und die Art der chemischen Bindungskräfte sowohl in der Membran selbst als auch im zu filtrierenden Stoff spielen eine wichtige Rolle. Deshalb werden z. B. Moleküle oder Ionen, die kleiner sind als die Membranporen, in vielen Fällen dennoch zurückgehalten.</p>
Umkehrosmose, Reverse Osmosis (RO)	<p>Das Prinzip: Entsprechend dem Naturgesetz des Verteilungsgleichgewichts verteilen sich alle Stoffe, ganz gleich ob es sich um Gasmoleküle, Metallatome oder Ionen in Lösungsmitteln handelt, solange „von alleine“, bis an allen Stellen dieselbe Konzentration erreicht ist. Bringt man also z. B. zwei Lösungen über eine Grenzfläche (z. B. eine durchlässige Membran) in Kontakt, erfolgt „automatisch“ ein Stofftransport, bis für alle Stoffe eine Gleichverteilung erreicht ist. Bei teildurchlässigen (semi-permeablen) Membranen können jedoch nur bestimmte Stoffe, z. B. Wassermoleküle, durch die Poren der Membran wandern. Es kann also keine einheitliche Konzentration aller Stoffe im Gesamtsystem erreicht werden. Bringt man also z. B. reines Wasser über eine nur für Wasser durchlässige Membran in Kontakt mit konzentrierter Zuckerlösung (Schulversuch!), wandert so lange Wasser in die Zuckerlösung, bis der hydrostatische Druck (Anstieg der Flüssigkeitssäule) auf der Zuckerseite so groß wird, dass die Wanderung zum Stillstand kommt. Das griechische Wort für „Übergang“ heißt „Omosis“. Der Vorgang wird deshalb in der physikalischen Chemie als „Osmose“ und der Grenzdruck als „osmotischer Druck“ bezeichnet. Aufgrund von Osmose wandern z. B. im menschlichen Körper Salze und Zucker aus dem Blut in die einzelnen Zellen oder es „schießt“ im Frühjahr der Saft in die Pflanzen.</p>

	<p>Umgekehrt kann man durch Erhöhung des Drucks auf der Zuckerlösungsseite über den osmotischen Druck hinaus das Wasser auch wieder auf die reine Wasserseite zurückdrücken. Das nennt man dann Umkehrosmose oder Reverse Osmosis.</p> <p>Einsatzgebiete: Mit Umkehrosmose können feinste Teilchen wie Moleküle und Ionen abgetrennt werden. Umkehrosmose wird bei Teilchendurchmesser im Bereich unterhalb von ca. 1 nm angewendet. Alkali- und Erdalkalisalze, aber auch Schwermetallionen und Alkohole sowie Zucker können damit abgetrennt werden. Typische Drücke sind ca. 10 bis 100 bar. Bekanntestes Einsatzgebiet ist wohl die Meerwasserentsalzung zur Trink- und Prozesswasseraufbereitung. Aber auch bei der „Entgiftung“ von Galvanikabwässern oder in der Reinstwassergewinnung ist die Umkehrosmose zumindest als Teilschritt zum Standardverfahren geworden.</p>
--	---

Gegenstromfiltration

Bei jeder Art von Filter setzen sich die Poren irgendwann zu, der Filterwiderstand wird so groß, dass der Filterprozess, also der Trennprozess, zum Stillstand kommt. Wie beim Sandfilter erläutert, kann dann in Gegenrichtung der Filter intervallmäßig und gegebenenfalls automatisiert wieder freigespült werden. Bei feinen Membranfiltern ist das zwar prinzipiell auch möglich, doch erfordert dies relativ hohe Drücke. Darüber hinaus kosten Stillstand und Wartung Geld, deshalb ist man in der Industrie stets bestrebt, kontinuierlich zu arbeiten. Dies wird möglich, wenn der zu filtrierende Flüssigkeitsstrom und der Filtratstrom nicht senkrecht auf die Membran, sondern parallel zur Membran geführt werden. So wird die Filtermembran bei optimierten Prozessen kontinuierlich von selbst wieder freigespült. Im Bereich der Ultrafiltration zur Trinkwasseraufbereitung ist die Gegenstromfiltration (auch Querstrom- oder Cross-Flow-Filtration) die Ausnahme. Hier tritt tatsächlich alles Wasser, das der Membran zugeführt wird, durch diese hindurch. Man spricht dann von der sogenannten Dead-End-Filtration, die im Gegensatz zur Gegenstromfiltration zwar eine geringere Trübstoffbelastung des Wassers voraussetzt, aber dafür wesentlich weniger Energie erfordert.

2.2 Mechanische Trennung nach Dichte

2.2.1 Sedimentation

Von Sedimentation spricht man, wenn sich im Wasser feinverteilte Feststoffe, d. h. suspendierte Stoffe, aufgrund der Schwerkraft von allein absetzen. Dies bedeutet, der sedimentierte Stoff ist schwerer bzw. besitzt eine größere Dichte als die Flüssigkeit. Der Sandfang, der Fettfang und das Vorklärbecken in Kläranlagen sind gute Beispiele aus der Wasseraufbereitung. Die Bedeutung der Sedimentation als natürlicher Prozess sieht man daran, dass viele Bodenschichten, wie z. B. Schiefer und Muschelkalk, das Ergebnis langer erdgeschichtlicher Sedimentationen sind.

2.2.2 Hydro-Zyklone

Im Labor wird die Fliehkraft in Zentrifugen zur beschleunigten Abscheidung suspendierter Stoffe genutzt. Diese Technik kommt natürlich für große Wassermengen nicht in Frage. In der Verfahrenstechnik verwendet man hierfür so genannte Zyklone. So wie in modernenbeutellosen Staubsaugern der Luftstrom in Rotation gebracht wird, kann durch eine entsprechend geformte Wasserführung der Wasserstrom zum Rotieren gebracht werden. Schwere Teilchen reichern sich am äußeren Rand an und können dort kontinuierlich abgestreift werden. Dieses Verfahren wird bei be-

sonders hohem Gehalt an relativ schweren Schwebstoffen sowohl bei der Abwasserbehandlung als auch bei der Rohwasseraufbereitung eingesetzt.

2.2.3 Flotation

Will man dagegen relativ leichte Stoffe möglichst schnell und effizient aus Suspensionen abtrennen, wird die sog. Flotation eingesetzt. In den vertikal zur Schwerkraft (parallel zum Boden) geführten Wasserstrom wird von unten (vom Boden her) Luft eingeblasen. Die Luftbläschen sammeln an der Grenzfläche Luft – Wasser die relativ leichten Schwebstoffe und tragen sie so mit an die Wasseroberfläche, wo sie kontinuierlich abgezogen werden. Dieses Verfahren wird bei besonders hohem Gehalt an relativ leichten Schwebstoffen eingesetzt, sowohl bei der Abwasserbehandlung (Vorklärbecken, Nachklärstufe 2) als auch bei der Rohwasseraufbereitung. Auch in der Kunststoff- und Papierindustrie können mit Flotation Tröpfchen, Kügelchen oder Fasern aus dem Kreislaufwasser entfernt werden.

2.3 Thermische Trennung nach Siedepunkt

2.3.1 Destillation – das Prinzip

Flüssigkeitsgemische lassen sich aufgrund der verschiedenen Siedepunkte trennen, das weiß jeder Schnapsbrenner. Pro Destillationsdurchgang (Verteilungsgleichgewicht) findet jedoch keine 100 %ige Trennung statt. Deshalb wird oft mehrfach oder mehrstufig destilliert. Sind dagegen Salze und Feststoffe gelöst, bleiben diese nach Abdampfen des Lösungsmittels allein zurück. Das Lösungsmittel lässt sich in diesem Fall 100 %ig abtrennen.

2.3.2 Destillation zur Entsalzung

Zur Gewinnung von Rohwasser für die Trink- und Prozesswasseraufbereitung durch Meer- und Brackwasserentsalzung ist die Destillation das klassische Verfahren. Herkömmliche Verfahren verbrauchen jedoch so viel Energie, dass zwischenzeitlich zunehmend die Umkehrosmose eingesetzt wurde. Moderne Verfahren nutzen jedoch das zu destillierende Meerwasser als Kühlwasser, sodass fast 100 % der Kondensationswärme wieder zurückgewonnen werden kann. In bis zu 16-stufigen Gegenstrom-Destillationsanlagen kann der Energieverbrauch so auf ca. 15 % der klassischen Anlagen gesenkt werden. Thermische Meerwasserentsalzung erlebt gerade deshalb in arabischen Ländern eine Renaissance, weil dort ganz im Sinne von Umweltschonung das sonst eventuell nutzlos abgefackelte Erdgas aus der Erdölförderung genutzt werden kann.

2.3.3 Destillation zur Reinstwassergewinnung

Das sogenannte „Aqua Bidestillata“ war noch vor 30 Jahren der Standard für Reinstwasser in Medizin und Pharmazie. Heute wird - nach z. B. Entsalzung, Deionisation und Ultrafiltration – eine Destillation meist nur noch als letzter Schritt der Reinstwasseraufbereitung eingesetzt.

3 Physikalisch-chemische Verfahren

Streng genommen gehören dazu auch die **Nanofiltration** und **Umkehrosmose**, die bereits oben behandelt wurden.

3.1 Schwerkraft und Chemie

3.1.1 Problemfall: Abtrennung von Kolloiden

Wenn Stoffe als feinste Partikel kleiner als ein Mikrometer vorliegen, sedimentieren sie selbst bei großer Dichte extrem langsam. Sie ballen sich oft auch deshalb nicht zu größeren Agglomeraten zusammen, da sie sich aufgrund ihrer in der Regel negativen elektrischen Ladung „auf Abstand“ halten. Solche „Suspensionen“ bezeichnet man als Kolloide. Theoretisch sind sie natürlich nach der Methode der Ultra- und Nanofiltration abtrennbar, bei großen Wassermengen ist das aber viel zu aufwändig. Dann versucht man durch „Flockung“ die feinsten Partikel zu größeren Teilchen zu aggregieren. Diese sedimentieren dann wieder in einer vertretbaren Zeit.

3.1.2 Flockung

Zu dieser Flockung werden zunächst Kationen (mehrwertige positive Ionen, meistens Eisen- oder Aluminiumsalze) zugesetzt. Diese entladen die negativen Kolloidteilchen, die sich zu größeren, positiv geladenen Agglomeraten („Flocken“) zusammenlagern. Wird nun gleichzeitig Kalk oder Natronlauge zugegeben, fallen basische Hydroxide aus, an die sich die Flocken anlagern und mitgefällt werden.

Die Wirkung des Flockungsmittels kann durch moderne Flockungshilfsmittel unterstützt werden. Bei den Flockungshilfsmitteln, die zur Vernetzung der einzelnen Flocken beitragen, handelt es sich um synthetisch hergestellte Polyelektrolyte (mehrfach positiv oder negativ geladene wasserlösliche Polymere, z. B. Acrylate). In der Industrie werden Flockungsmittel meist für Abwässer des Bergbaus oder von Raffinerien eingesetzt, wo sie Absetz- oder Filtrationsvorgänge beschleunigen. Bei problematischen Rohwässern (z. B. Flusswasser) wird des Öfteren auch in den ersten Stufen der Trink-, Brauch- und Prozesswasseraufbereitung Flockung eingesetzt.

In der Abwasserbehandlung verwendet man die Flockung auch in der Vorklärung oder in der Nachklärung. Zusätzlicher Effekt der Flockung ist, dass auch geringe Spuren an Schwermetallionen oder einige schwer abbaubare organische Verbindungen von den Flocken „umhüllt“ und so mitgefällt werden.

3.2 Membranfilterung im elektrischen Feld

3.2.1 Elektro-Deionisation – das Prinzip

Die Elektro-Deionisation funktioniert im Grundprinzip ähnlich wie die Umkehrosmose. Zwei Wasserlösungen, in die die Elektroden eintauchen, stehen über eine teildurchlässige Membran in Kontakt. Durch Anlegen einer positiven oder negativen Spannung wandern nun jeweils die Kationen oder die Anionen durch die Membran. Im Unterschied zur Umkehrosmose wandert nicht das Wasser, sondern die Salzionen und die treibende Kraft anstelle des Drucks ist ein elektrisches Feld. Eine Regeneration ist nicht nötig. Es handelt sich also um ein äußerst umweltschonendes Verfahren.

3.2.2 Elektro-Deionisation zur Entfernung bestimmter Ionen

Durch Variation der Porengröße und der Spannung können ganz gezielt bestimmte Ionensorten entzogen werden. Falls erforderlich, ist das nahezu 100%ig möglich (s. nächster Absatz). Die Elektro-Deionisation wird heute z. B. eingesetzt, um gefährliche Schwermetallionen aus Prozessabwässern zu entfernen.

3.2.3 Elektro-Deionisation zur Vollentsalzung im Sinne von Reinstwasser

Bei der Umkehrosmose begrenzen die mechanische Belastbarkeit der Membranen und der konstruktive Aufwand für die Druckfestigkeit der Anlage den anwendbaren Druck und die einsetzbare Porengröße so, dass in der Praxis maximal zu 99,3 % entsalztes Wasser erreichbar ist. Die Elektro-Deionisation ist dagegen konstruktiv unproblematisch. Durch fortwährende Frischwasserspülung (mit Trinkwasser) auf der Salzabtrennseite der Membran kann das Verteilungsgleichgewicht extrem zu Gunsten der Abtrennung verschoben werden. Es hängt nur noch von der Durchsatzgeschwindigkeit und der Spülwassermenge ab, ob entsalztes Wasser von 99,99 % oder noch mehr erreicht wird. In der Reinstwasseraufbereitung, z. B. für die Halbleiterproduktion (Chips), wird deshalb nach einer „Grobentsalzung“ mittels Umkehrosmose heute die Elektro-Deionisation bevorzugt zur echten Vollentsalzung bzw. Deionisation eingesetzt.

3.3 Adsorption

3.3.1 Oberflächenbindung als Grenzfall chemischer Bindung

Die Adsorption von Gasmolekülen oder gelösten Molekülen an Oberflächen von Feststoffen ist ein Grenzfall von Festkörperphysik und Chemie. Klassisch wird der Effekt der physikalischen Chemie zugeordnet, heute der Surface Science (Oberflächenphysik und -chemie). Streng genommen spricht man von Adsorption, wenn die Bindungskräfte zwischen Molekül und Festkörper größer sind als reine Van-der-Waals-Kräfte. Dass überhaupt eine Bindung zustande kommt, z. B. zwischen einem in Wasser gelösten Herbizidmolekül und der Oberfläche eines Kohlenstoffkristalls, beruht darauf, dass an der absoluten Grenzfläche von Festkörpern aufgebrochene Bindungen vorliegen. Der Chemielehrer würde sagen: Ein Kohlenstoffatom an der Oberfläche wird von drei seiner vier möglichen Bindungen im Volumen gehalten, die vierte Valenz schaut frei heraus. Beim Grafit schaut die von Natur aus relativ schwache vierte Bindung nach außen und erlaubt so einer Vielzahl von Molekülsorten eine energetisch günstige Ankoppelung. Auch bestimmte Mineralstoffe wie Bentonite, Zeolithe und Aluminiumoxid eignen sich als Adsorptionsfilter.

3.3.2 Adsorption an Aktivkohle, ein Standardverfahren der Chemie

Aufgrund dieser speziellen Oberflächeneigenschaften des Kohlenstoffs wird grafitische Kohle mit besonders großer Oberfläche schon seit über 100 Jahren als Adsorptionsmittel verwendet. Die große Oberfläche wird durch eine poröse Struktur erreicht, die sich ergibt, wenn man Holz durch trockene Destillation und Behandlung mit Wasserdampf und Wasser zu „Aktivkohle“ umwandelt. Heute wird auch speziell aufbereitete Steinkohle (Anthrazitfilter) und Braunkohle im großen Maßstab als „Aktivkohle“ verwendet.

3.3.3 Aktivkohlefilter in der Wasseraufbereitung

In der Wasseraufbereitung wird Rohwasser, das mit Herbiziden, Pestiziden, Fungiziden, Ölen, Arzneimittelstoffen, chlorierten Kohlenwasserstoffen, Aromaten und anderen Kohlenwasserstoffen verunreinigt ist, durch Aktivkohlefilterung gereinigt. Je nach Belastung und den gesetzlichen Vorgaben muss das mit den adsorbierten Stoffen beladene, „verbrauchte“ Filtermaterial teuer über Sondermüllverbrennung oder Sondermülldeponie entsorgt oder in Kohlekraftwerken verbrannt werden. Man kann es aber auch in speziellen Anlagen regenerieren. Die Aktivkohlefilterung ist zwar technologisch einfach und effizient, aber letztlich relativ teuer und bei der Entsorgung umweltbelastend.

Eingesetzt wird die Aktivkohlefilterung bei besonderen Schadstoffbelastungen in der **Rohwasseraufbereitung für Trink- und Prozesswasser**. Bei Schadstoffbelastungen, die den mikrobiellen Abbau in der Biostufe der Kläranlage beeinträchtigen, wird Aktivkohle auch zur Vorklärung des **Abwassers** eingesetzt. Bei besonderen Anforderungen an die Qualität des geklärten Wassers, zum Beispiel bei Einleitung in Badegewässer oder Verrieselung ins Grundwasser zur Trinkwassergewinnung, wird Aktivkohle auch in der Abwasserbehandlung und zwar zur Nachklärung eingesetzt.

Zur Vorbehandlung des **Industrieabwassers** aus speziell belasteten Produktionsprozessen ist Aktivkohle nach wie vor Standard, wird aber zunehmend durch „abfallfreie“ Verfahren ersetzt (u. a. Membranfiltration, oxidativer bzw. chemischer Abbau mit Peroxiden, Ozon, UV).

4 Chemische Verfahren

4.1 Ionenaustausch

Ob sich ein Salz löst, hängt von der Bindungsenergie der Salzionen untereinander ab und von der Hydrationsenergie der Salzionen im Wasser. Ist die Hydrationsenergie der Salzionen größer als ihre gegenseitige Bindungsenergie, lösen sich die Ionen im Wasser. Dies gilt auch, wenn die Salzionen nicht untereinander, sondern auf der Oberfläche von Mineralstoffen (bestimmte Zeolithe) oder Kunstharzen gebunden sind. Sitzen auf einer derartigen Oberfläche z. B. Natrium- oder Wasserstoffionen, können sich diese bei Kontakt mit Wasser darin lösen, wenn sich dafür im Austausch andere, im Wasser befindliche Ionen wie z. B. Calciumionen auf die Oberfläche setzen; daher der Name „Ionenaustauscher“. Ist also die Wasserlöslichkeit des vom Ionenaustauscher gebundenen Natriums oder Wasserstoffs größer als die des Calciums, wird so lange ausgetauscht, bis ein Verteilungsgleichgewicht (siehe Nernst'scher Verteilungssatz) erreicht ist.

4.1.1 Enthärtung

Die „normale“ Wasserenthärtung in Hauswasseranlagen, aber auch in der Getränkeindustrie, wird mit Ionenaustauscher-Anlagen realisiert. Dabei werden die Härtebildner Mg^{2+} oder Ca^{2+} gegen Na^+ ausgetauscht. Der Ionenaustauscher wird bei Erschöpfung der Austauschfähigkeit durch Natriumchlorid (NaCl) wieder regeneriert. Das kennt man auch von der Geschirrspülmaschine.

4.1.2 Deionisation – Vollentsalzung

Durch „kompletten“ Austausch gegen H^+ -Ionen können alle im Wasser gelösten Kationen, z. B. auch die von Schwermetallen, entfernt werden. Der Ionenaustauscher wird dann mit Säuren (evtl. Salzsäure) regeneriert. Fälschlicherweise wird dies oft als Vollentsalzung oder Deionisation bezeichnet. Doch bei der Vollentsalzung müssen genau genommen nicht nur die Kationen sondern auch alle Anionen (Chlorid, Sulfat etc.) aus dem Wasser entfernt werden. Mit zusätzlichen Anionenaustauschern ist auch dies möglich. Im Sonderfall wird Ionenaustausch zur Deionisation bei der Vorbehandlung stark belasteter Prozessabwässer in der Industrie verwendet. Für die Prozesswasseraufbereitung mit hohen Anforderungen an die Reinheit werden zunehmend andere voll kontinuierlich arbeitende Verfahren ohne chemische Regeneration eingesetzt (siehe auch Elektro-Deionisation).

4.2 pH-Wert-Einstellung

4.2.1 pH-Wert – die Kraft des Wasserstoffs

Die „Puissance Hydrogène“ ist der negative Logarithmus der Konzentration an Wasserstoffionen. Der pH-Wert gibt an, ob in einer wässrigen Lösung – bezogen auf den Neutralpunkt – ein Über- oder Überschuss an Wasserstoffionen (H^+ = „Protonen“) besteht. Ein pH-Wert von 7 bedeutet, die Lösung ist neutral. Ein pH-Wert unter 7 bedeutet, die Lösung reagiert sauer. Ein pH-Wert über 7 bedeutet, die Lösung reagiert basisch („alkalisch“). Je nach pH-Wert werden bestimmte – teils erwünschte, teils unerwünschte – chemische oder biochemische Reaktionen beschleunigt oder abgebrems.

4.2.2 Neutralisation

Im Trinkwassernetz führt saures Wasser schnell zu Korrosion. Das heißt die Lebensdauer aller durchflossenen Wasserleitungen würde verkürzt und ein vorzeitiger, teurer Austausch würde nötig. Deshalb hat die Neutralisation **entscheidende Bedeutung in der Trinkwasseraufbereitung**.

Bei der **Trinkwasseraufbereitung** wird ein zu niedriger (saurer) pH-Wert durch Austreiben von im Wasser gelöstem Kohlendioxid (Kohlensäure) oder durch Filtration über Kalkstein (Marmor-schotter oder halbgebrannter Dolomit) auf den sog. Gleichgewichts-pH-Wert eingestellt. Der im Wasser gelöste Kalk und die restliche gelöste Kohlensäure befinden sich dann im Gleichgewicht (Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht). Je nach Wasserhärte liegt der Gleichgewichts-pH-Wert zwischen 6,5 und 7,5.

Bei der **Abwasserbehandlung** wird der pH-Wert des Abwassers in der Vorklärung oft mit Kalk auf neutral bis leicht basisch gestellt. Das unterstützt die Phosphatausfällung mit Eisensalzen und senkt die Löslichkeit von Schwermetallen, die dann mit ausgefällt werden. Ein zu niedriger, saurer pH-Wert würde darüber hinaus den aeroben Abbau in der biologischen Stufe abbremsen.

Reinstwasser für Prozesse in Chemie, Pharmazie und Chipproduktion wird mit Natronlauge (vor Entsalzung bzw. Deionisation) möglichst exakt auf pH 7 neutral eingestellt.

4.2.3 Ansäuerung

Bei der Schlammaufbereitung in der **Kläranlage** für die Biogaserzeugung im Faulturm wird dagegen angesäuert. Die biochemischen Reaktionen der Faulung laufen nämlich bevorzugt im sauren Bereich ab.

4.3 Chemischer Abbau bzw. Umbau

4.3.1 Photolytischer Abbau durch UV-Licht

Hochenergetische Strahlung kann die chemischen Bindungen in anderweitig schwer abbaubaren Stoffen so stark anregen, dass sie aufbrechen. Die Moleküle zerbrechen so zu einfacheren, in der Regel leichter abbaubaren Stoffen.

4.3.2 Wasserdesinfektion mit UV-Licht

Dass praktisch alle Mikroben – gleichgültig ob Bakterien, Viren, Pilze usw. – bei Bestrahlung mit hochenergetischem UV-Licht absterben bzw. ihre Fortpflanzung verhindert wird, beruht ebenfalls auf Photolyse. Nur dass hier in der Regel die chemischen Bindungen in der DNS geknackt werden.

Da dieses hochwirksame Verfahren weder eine chemische Regeneration erfordert noch Abfall produziert, wurde es zu einem der Standardverfahren für die **Trink-, Brauch- und Prozess-**

wasseraufbereitung. Selbst bei der Produktion von Reinstwasser für die Pharmazie wird es oft als Zusatzdesinfektionsstufe zu anderen Verfahren wie Ultra- und Nanomembranfiltration eingesetzt. (Abtötung der Mikroben mit UV-Licht, Abtrennung der toten Organismen und Endotoxine mittels Filtration).

4.3.3 UV-Licht gegen Legionellen in Haushalt, Hotels und Schwimmbädern

Wenn Wasser längere Zeit in Tanks und Leitungen bei Temperaturen über ca. 25° C steht, können sich spezielle Erreger von Lungenentzündung, die Legionellen, sehr schnell vermehren. Nur konstante Temperaturen des Wassers deutlich unter 20° C oder über 60° C sind ein sicherer Schutz. Durch in das Wasserleitungssystem integrierte UV-Behandlungssysteme werden diese Legionellen sicher abgetötet.

4.3.4 Oxidation

Als Oxidation werden alle Reaktionen mit Stoffen bezeichnet, die Elektronen aufnehmen können. Dazu gehören Sauerstoff, Ozon, Chlor oder auch Permanganat. Beispiele solcher Reaktionen sind die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen (Benzin, Diesel, Erdgas) zu Kohlendioxid und Wasser oder die Oxidation von Pestiziden im Rohwasser durch Ozon. Bei der Wasseraufbereitung laufen diese Prozesse nicht als schnelle Verbrennung, sondern als langsame Oxidation ab.

4.3.5 Oxidativer Schadstoffabbau mit Luftsauerstoff

Das ist das Verfahren, das standardmäßig mithilfe von aeroben Mikroben in der Biostufe der **Abwasserreinigungsanlage** stattfindet. In der Trinkwasseraufbereitung wird dies als Spezialfall mitunter in Festbett-Bioreaktoren eingesetzt. Aber auch wenn oxidative biologische Prozesse nicht gezielt eingesetzt werden, finden sie doch in fast allen Filtern statt, die zur Partikelabtrennung eingesetzt werden.

4.3.6 Oxidativer Schadstoffabbau und Desinfektion mit Peroxiden und Ozon

Zerfallen Ozon (O₃) oder Peroxide, wird atomarer Sauerstoff als Sauerstoffradikale freigesetzt. Während molekularer Sauerstoff höhere Temperaturen erfordert (Aktivierungsenergie), oxidieren Sauerstoffradikale schon bei niedriger Temperatur viele Schadstoffe. Perborate, Percarbonate und spezielle Persulfate wirken besonders schnell und ermöglichen kurze Behandlungszeiten. Doch sie hinterlassen Salzlösungen, liefern also kein Reinwasser. Zur Desinfektion von Reinwasser eignen sich dagegen Wasserstoffperoxid (H₂O₂) und Ozon, denn sie zerfallen rückstandsfrei. Eingesetzt werden diese chemisch-oxidativen Prozesse auch in Kombination mit UV-Licht.

4.3.7 Kombination oxidativer und photolytischer Prozesse

Enthält das Wasser schwerst abbaubare organische Verbindungen, wird heute in der Reinstwasseraufbereitung, aber auch in der Vorbehandlung von Prozessabwässern gerne mit der Kombination von UV-Licht und Peroxiden bzw. Ozon gearbeitet. Das garantiert sicheren Abbau bei relativ kurzer Behandlungsdauer.

4.3.8 Chlor zur Desinfektion

Letzten Endes ist die Behandlung mit Chlorgas, Chlordioxid oder Natriumhypochlorit ein Oxidationsverfahren: Chlor und Wasser zerfallen über die Hypochloritstufe zu Salzsäure und atomarem Sauerstoff. Auch wenn das Hypochlorit selbst schon viele Mikroben schädigt, genauso wirksam ist

auch der atomare Sauerstoff. Da sich bei der Behandlung der pH-Wert ändert bzw. Natrium und Chloridionen als Rückstand im Wasser bleiben, wird die „Chlorung“ zur Prozesswasseraufbereitung in der Regel nicht mehr verwendet. In der **Trinkwasseraufbereitung und in Schwimmbädern** ist sie jedoch nach wie vor Standard. Das gelöste Chlor bzw. Hypochlorit hat relativ lange Lebenszeiten und sorgt so für gleichmäßige und zeitlich fortwirkende Desinfektion auch in räumlich weit verteilten Systemen.

4.4 Trennung nach Löslichkeit

4.4.1 Lösungsgleichgewicht ermöglicht Ausfällung

Bei jeder wasserlöslichen ionischen Verbindung („Salz“) steht je nach Temperatur immer ein gewisser Prozentsatz ungelöster Stoff im Gleichgewicht mit dem gelösten. Der ungelöste Anteil kann also durch Sedimentation oder Filtration abgetrennt werden. Viele Salze lösen sich jedoch so gut, dass dies kein gangbarer Weg ist.

Oft liegt es an der Oxidationsstufe der Ionen, wie gut die Löslichkeit ist. Zum Beispiel sind zweiwertiges Eisen und Mangan gut wasserlöslich, dreiwertiges dagegen schlecht.

Gibt man jedoch zur Lösung eines „vollständig“ gelösten Salzes die Lösung eines anderen gelösten Salzes, kann es dazu kommen, dass sich die Anionen und Kationen der Stoffe neu kombinieren. Zum Beispiel bilden die Kationen des Salzes A mit den Anionen des Stoffes B ein Salz geringer Löslichkeit, das zum größten Teil ausfällt und soweit abgetrennt werden kann.

4.4.2 Enteisung und Entmanganung von Trinkwasser

Werden die im Rohwasser befindlichen Eisen- und Manganionen mittels intensiver Belüftung durch Wasserführung über Kaskaden oder Einblasen von Luftsauerstoff ins Rohwasser aufoxidiert, bilden sich schwer lösliche Oxide und Hydroxide. Diese fallen als Flocken aus und können am Sandfilter abgetrennt werden. Eine höhere Trinkwasserqualität erhält man jedoch, wenn das Wasser nur schwach belüftet wird und der eigentliche Oxidationsprozess durch Mikroorganismen in einem Sandfilter erfolgt. Die so entstehenden Oxide und Hydroxide haften fester am Filterkorn als die Flocken, die im Filter abgetrennt werden.

4.4.3 Ausfällung von Phosphat aus dem Abwasser mit Eisensalzen

Eisen- und Aluminiumphosphat sind schlecht wasserlöslich, deshalb kann das im Abwasser enthaltene Phosphat durch Zugabe gut löslicher Eisen- und Aluminiumsalze ausgefällt werden. Dass die Löslichkeit auch vom pH-Wert abhängen kann, zeigt dieses Beispiel ebenfalls sehr schön. In saurem Wasser bliebe das Eisenphosphat gelöst, in leicht basischem Wasser sinkt dagegen die Löslichkeit noch weiter ab, nähme dann aber im stark basischen Bereich wieder zu. Durch zusätzliche Zugabe von leicht basischem Kalziumcarbonat wird deshalb bei der Dephosphatisierung der pH-Wert auf ca. 7,2 erhöht.

5 Biologische Verfahren

Diese Verfahren arbeiten unter indirektem Einsatz chemischer Prozesse, die über die Stoffwechselvorgänge und Vermehrungsprozesse von Mikroben wie Bakterien, Protozoen, Pilzen usw. vermittelt werden. Es sind also biochemische Prozesse, die hier genutzt werden. Diese Verfahren sind detailliert in den Leitfäden zu Abwasser und Trinkwasser behandelt.