

Tratamiento del agua

1	Delimitación del tema del tratamiento del agua.....	3
1.1	Intersecciones con la física, la química y la biología	3
1.2	Tratamiento, depuración, preparación – definición de términos	3
2	Procedimientos físicos	3
2.1	Separación mecánica por tamaño de partículas	3
2.1.1	Rastrillos o coladores.....	3
2.1.2	Filtración	3
2.2	Separación mecánica por densidad	6
2.2.1	Sedimentación	6
2.2.2	Hidrociclones	7
2.2.3	Flotación	7
2.3	Separación térmica por el punto de ebullición.....	7
2.3.1	Destilación – el principio	7
2.3.2	Destilación para la desalinización	7
2.3.3	Destilación para la obtención de agua de alta pureza	8
3	Procedimientos físico-químicos.....	8
3.1	La gravedad y la química.....	8
3.1.1	Caso problemático: separación de coloides.....	8
3.1.2	Floculación	8
3.2	Filtración por membrana en campo eléctrico	8
3.2.1	Electrodesionización – el principio	8
3.2.2	La electrodesionización para la eliminación de ciertos iones	9
3.2.3	La electrodesionización para la desmineralización total en la preparación de agua de alta pureza.....	9
3.3	Adsorción.....	9
3.3.1	Enlace superficial como caso límite de enlace químico.....	9
3.3.2	La adsorción en carbón activado, un procedimiento estándar en la química.....	9
3.3.3	Filtros de carbón activado en el tratamiento de aguas	10
4	Procedimientos químicos	10
4.1	Intercambio de iones.....	10
4.1.1	Desmineralización o ablandamiento	10
4.1.2	Desionización – desmineralización total	11
4.2	Ajuste del valor pH.....	11
4.2.1	Valor pH – la fuerza del hidrógeno.....	11
4.2.2	Neutralización	11
4.2.3	Acidificación.....	11
4.3	Degradación / transformación química.....	12
4.3.1	Degradación catalítica mediante luz UV	12
4.3.2	Desinfección del agua con luz UV.....	12
4.3.3	Luz UV contra la legionela en hogares, hoteles y piscinas.....	12
4.3.4	Oxidación.....	12
4.3.5	Degradación oxidativa de contaminantes con oxígeno del aire.....	12
4.3.6	Degradación oxidativa de contaminantes y desinfección con peróxidos y ozono	12
4.3.7	Combinación de procesos oxidativos y fotolíticos	13

4.3.8	Cloro para la desinfección	13
4.4	Separación por la solubilidad	13
4.4.1	El equilibrio de disolución hace posible la precipitación	13
4.4.2	Eliminación del hierro y el manganeso del agua potable.....	13
4.4.3	Precipitación con sales de hierro de fosfatos presentes en el agua residual.....	14
5	Procedimientos biológicos	14

1 Delimitación del tema del tratamiento del agua

1.1 Intersecciones con la física, la química y la biología

La preparación, el tratamiento y la depuración del agua juegan un papel importante en los ámbitos más diversos de nuestra vida: preparación de agua potable para los hogares, tratamiento de agua de abastecimiento y de proceso en la industria, tratamiento y depuración de agua en procesos cíclicos, como piscinas o muchos procesos de producción en la industria, tratamiento y depuración de aguas residuales. Los procedimientos aplicados al efecto se clasifican en procedimientos físicos, físico-mecánicos, físico-químicos, químicos y biológicos. Los procedimientos son en principio los mismos en todos los ámbitos, con la diferencia de que en la práctica varía el alcance y la sofisticación del procedimiento aplicado en cada caso.

Esta guía presenta por esto los procedimientos en su contexto científico-técnico. En búsqueda de una educación íntegra, a partir del ejemplo del agua como “elixir de la vida” se facilita a profesores y alumnos la posibilidad de establecer vínculos con la clase en las asignaturas de ciencias.

1.2 Tratamiento, depuración, preparación – definición de términos

En el estricto lenguaje técnico de los diferentes sectores cada término tiene su propio ámbito de aplicación. En un sentido estricto, “tratamiento” es el término genérico que reúne a todos los demás. En la práctica de los diferentes sectores, el término “tratamiento” se utiliza siempre que se habla con carácter general de una modificación de la calidad del agua. En ocasiones es necesario utilizar una terminología más “neutra”, por lo que a menudo también se emplea el término “tratamiento” cuando existe una presencia alta o incluso peligrosa de contaminantes. Así, el experto en la eliminación de aguas residuales a veces habla de tratamiento, otras de purificación o depuración del agua residual, cuando en realidad se está refiriendo siempre a lo mismo.

En la producción de agua potable y agua pura, en cambio, se emplea el término “potabilización/preparación” cuando la calidad del agua disponible todavía es insuficiente para el uso previsto. Es decir, p. ej., potabilización de agua cruda (agua de pozo, agua de manantial, agua subterránea, etc.) para el consumo humano o preparación de agua potable para la obtención de agua de alta pureza en el sector farmacéutico, etc.

2 Procedimientos físicos

2.1 Separación mecánica por tamaño de partículas

2.1.1 Rastrillos o coladores

En la separación de sólidos relativamente grandes, se habla de coladores cuando el tamaño de poro o de malla varía entre aprox. 0,5 y 10 mm, o de rastrillos si el tamaño ronda los 10 cm. Estos se emplean, p. ej., en las entradas de extracción de agua cruda de ríos y lagos para la obtención de agua potable y agua industrial, así como en la etapa inicial de las depuradoras de aguas residuales.

2.1.2 Filtración

Por filtración se entiende la separación de sólidos presentes en un líquido mediante los poros de un medio filtrante que no dejan pasar los sólidos que superen un cierto tamaño. Esta barrera separadora puede estar formada por los poros de papeles o membranas sintéticas, pero también por los poros naturales de granulados minerales (diatomita, alúmina) o los pequeños huecos entre granos de arena compactada (“lecho filtrante”). Aparte de la separación por el tamaño de las partículas (efecto de colado), en el proceso de potabilización de agua juega también un papel muy

importante la adhesión de pequeñas partículas a la superficie del grano filtrante. Hacia abajo es posible reducir el tamaño de poro hasta escala molecular (nanofiltración).

Filtros de arena

Los filtros de arena se emplean con frecuencia para eliminar del agua sustancias en suspensión. Sustancias en suspensión son sólidos especialmente finos y relativamente ligeros dispersos en el agua ("suspensión"). Es decir, la separación por sedimentación llevaría mucho tiempo. El filtro consta de una capa compuesta por granos de arena de cuarzo de diferente tamaño. Las sustancias en suspensión filtradas quedan retenidas en los huecos existentes entre los granos de arena de cuarzo y en su superficie, aumentando la resistencia de filtración conforme avanza el uso del filtro. Para evitar que el filtro de arena se obstruya por completo es necesario regenerarlo regularmente. Esto se hace con agua limpia y, en caso necesario, con una mezcla de aire y agua en contracorriente. El agua residual de lavado generada también debe ser depurada. Los filtros de arena son filtros estándar en la primera etapa de la potabilización de agua cruda y del tratamiento de agua para usos industriales, así como de la depuración final en las depuradoras de aguas residuales municipales.

Filtros de papel

Para el tratamiento de aguas no se emplean por lo general ni los filtros planos de papel, como los que se emplean en los laboratorios o la clase de química, ni tampoco cartuchos de papel filtrante o similares. Estos filtros son de un único uso y los costes de material y de personal (intercambio) serían demasiado elevados en el tratamiento de grandes cantidades de agua.

Filtros de membrana

En la actualidad se emplean por lo general filtros de membrana fabricadas con materiales sintéticos, aunque en principio también podrían servir membranas metálicas o cerámicas. Dependiendo del tamaño de las partículas a retener, se habla de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración u ósmosis inversa.

Microfiltración	Estos filtros están hechos generalmente de material orgánico o de cerámica y tienen un tamaño de poro micrométrico (0,05 – 10 µm). Se utilizan para separar sólidos en suspensión, como fibras, proteínas, microorganismos (amebas) y similares. Para superar la resistencia de la membrana, es necesaria una diferencia de presión hidrostática de aprox. 0,1 – 2 bar que actúe como fuerza impulsora para el transporte de sustancias. El campo de aplicación es, p. ej., la eliminación de finas fibras de papel del circuito de agua en la fabricación de papel o el post-tratamiento de aguas residuales depuradas.
Ultrafiltración	La ultrafiltración trabaja con tamaños de poro de aprox. 0,005 – 0,15 µm. Sirve para retener macromoléculas, virus, coloides y bacterias. La diferencia de presión debe alcanzar entre 0,1 y 5 bar. Este tipo de filtración se usa, por ejemplo, como etapa principal o previa en la producción de agua pura y de alta pureza en la industria alimentaria y de bebidas, así como en la industria farmacéutica y de semiconductores. En la potabilización de agua para el consumo humano pueden utilizarse membranas de ultrafiltración para la extracción de partí-

	culas, a fin de asegurar el éxito de la posterior desinfección.
Nanofiltración	Los nanofiltros, hechos principalmente de capas poliméricas homogéneas, se utilizan con tamaños de poro nanométricos (0,7 – 10 nm). Con ellos pueden retenerse compuestos orgánicos, iones (bivalentes), colorantes, pesticidas y también herbicidas. Aquí se necesita una diferencia de presión de entre 3 y 20 bar, a pesar de lo cual el flujo de agua filtrada apenas llega al 10–15% del flujo a través de un microfiltro. Esta es una etapa importante en la producción de agua de alta pureza, así como en la etapa de tratamiento previo si el agua residual procede de procesos de producción que exijan este tipo de descontaminación. La ultra y nanofiltración como procesos físico-químicos: para ser exactos, un filtro de membrana con el tamaño de poro mínimo ya no funciona únicamente como filtro mecánico. Si el tamaño de poro es similar al tamaño de las moléculas o iones de la sustancia que se desee dejar pasar o retener, las fuerzas de adhesión entre las partículas y el borde de los poros es también un factor a tener en cuenta. Aquí juegan un papel importante la forma molecular de las sustancias a filtrar y la clase de fuerzas de enlace químico tanto en la membrana misma, como en la sustancia a filtrar. A esto se debe que en muchos casos también sean retenidos, p. ej., moléculas o iones más pequeños que los poros de la membrana.
Ósmosis inversa, Reverse Osmosis (RO)	El principio: de acuerdo con la ley de la naturaleza del equilibrio de distribución, todas las sustancias, ya se trate de moléculas de gas, átomos metálicos o iones en disolventes, se distribuyen “por sí solas” hasta que en todas partes se haya alcanzado la misma concentración. Es decir, si, p. ej., se ponen en contacto dos soluciones a través de una superficie limítrofe (p. ej., una membrana permeable), “automáticamente” se producirá un transporte de sustancias hasta que todas las sustancias estén distribuidas uniformemente. En las membranas semipermeables, no obstante, solo determinadas sustancias, p. ej., moléculas de agua, pueden pasar por los poros de la membrana. Por tanto, no se puede alcanzar una concentración uniforme de todas las sustancias en el sistema global. Si, por ejemplo, se pone en contacto agua pura con una solución de azúcar concentrada, a través de una membrana que solo deja pasar agua (¡experimento escolar!), el transporte de agua hacia la solución de azúcar se mantendrá hasta que la presión hidrostática (aumento de la columna de líquido) del lado del azúcar haya alcanzado una magnitud capaz de detener ese transporte. La palabra griega para “transición” es “ósmosis”. El proceso recibe por ello en la química física el nombre de “ós-mosis”; y la presión limítrofe, “presión osmótica”. La ósmosis es responsable, p. ej., de que sales y azúcar pasen de la sangre a las células en el cuerpo humano o de que en primavera

	ascienda la savia en las plantas. Y al contrario, aumentando la presión del lado de la solución de azúcar por encima de la presión osmótica, es posible forzar el retorno de agua al lado que contiene exclusivamente agua. Esto es lo que se conoce como ósmosis inversa. Campos de aplicación: por ósmosis inversa es posible separar las partículas más pequeñas, como moléculas e iones. La ósmosis inversa se aplica para partículas con un diámetro inferior a aprox. 1 nm. Con este método es posible retener sales alcalinas y alcalinotérreas, así como iones de metales pesados, alcoholes y azúcares. Las presiones típicas oscilan entre 10 y 100 bar. El campo de aplicación más conocido es el de la desalinización de agua de mar para la preparación de agua potable y de proceso. Aunque también en la “descontaminación” de aguas residuales de galvanoplastia o en la obtención de agua de alta pureza, se ha establecido la ósmosis inversa como una etapa del procedimiento estándar.
--	---

Filtración en contracorriente

En toda clase de filtro llega un momento en que los poros se obstruyen y la resistencia de filtración es tan grande, que el proceso de filtrado (es decir, de separación) se detiene. Como ya se explicó anteriormente al tratar el filtro de arena, para desobstruir de nuevo el filtro es necesario hacer circular el solvente en sentido contrario en intervalos regulares, de manera automática, de ser posible. En principio, esta posibilidad existe también para los filtros de membrana más finos, pero requiere una presión relativamente alta. Además de esto, los tiempos muertos y el mantenimiento cuestan dinero, por lo que la industria siempre procura trabajar de continuo. Esto se consigue si la corriente de líquido a filtrar y la corriente del filtrado no circulan vertical sino paralelamente sobre la membrana. Si los procesos están bien optimizados, de esa forma se consigue que la membrana del filtro se regenere por sí sola de manera continua. En el campo de la ultrafiltración para el tratamiento de agua potable, la filtración en contracorriente (también llamada filtración tangencial o de flujo cruzado) es más bien la excepción. Aquí pasa por la membrana realmente toda el agua que se aporta a ella. Esta es la llamada filtración frontal o “dead end”, que, a diferencia de la filtración en contracorriente, precisa un agua menos turbia pero a cambio consume mucha menos energía.

2.2 Separación mecánica por densidad

2.2.1 Sedimentación

Sedimentación es el nombre que recibe el proceso por el cual sólidos finamente dispersos en agua, es decir, sustancias en suspensión, se depositan en el fondo por efecto de la gravedad. Esto significa que la sustancia sedimentada es más pesada o posee una mayor densidad que el líquido. El filtro de arena, el colector de grasa y el tanque de decantación primaria en las depuradoras de aguas residuales, son buenos ejemplos extraídos del tratamiento de aguas. La importancia de la sedimentación como proceso natural se hace evidente en el hecho de que muchas capas del suelo, como p. ej., pizarra y caliza de conchas, son el resultado de sedimentaciones producidas durante largos periodos geológicos.

2.2.2 Hidrociclones

En los laboratorios se utiliza la fuerza centrífuga en centrifugadoras para separar por aceleración sustancias en suspensión. Evidentemente, esta tecnología no es adecuada para procesar grandes cantidades de agua. En las plantas de proceso se emplean para tal efecto los llamados separadores ciclónicos o simplemente ciclones. Así como en las aspiradoras modernas sin bolsa se hace rotar la corriente de aire, también se puede hacer rotar una corriente de agua por medio de una conducción de agua adecuada. Las partículas más pesadas se acumulan en el borde exterior, de donde pueden ser retiradas de manera continua. Este procedimiento se utiliza tanto en el tratamiento de aguas residuales, como en el de agua cruda cuando el líquido presenta un contenido especialmente alto de sustancias en suspensión relativamente pesadas.

2.2.3 Flotación

La flotación, por el contrario, se emplea para separar sustancias relativamente ligeras en suspensión de un modo rápido y eficiente. En una corriente de agua paralela al suelo se sopla aire desde abajo. Las burbujas de aire acumulan las sustancias en suspensión relativamente ligeras en la superficie límite aire-agua y las arrastran a la superficie, de donde son retiradas continuamente. Este procedimiento se utiliza tanto en el tratamiento de aguas residuales (decantación primaria y secundaria) como también en el de agua cruda, cuando el líquido presenta un contenido especialmente alto de sustancias relativamente ligeras en suspensión. En la industria del plástico y del papel también se retiran del circuito de agua mediante flotación pequeñas gotas, bolas o fibras.

2.3 Separación térmica por el punto de ebullición

2.3.1 Destilación – el principio

Las mezclas de líquidos se pueden separar a partir de sus diferentes puntos de ebullición, eso lo sabe todo destilador de alcohol. No obstante, no se puede producir una separación al 100% en una única operación de destilación (equilibrio de distribución). Por eso se efectúan a menudo varias destilaciones (escalonadas). Por el contrario, si en el líquido hay disueltos sales y sólidos, estos quedan al final como único resto una vez vaporizado el disolvente. El disolvente se puede separar en este caso al 100%.

2.3.2 Destilación para la desalinización

La destilación es el procedimiento clásico para la desalinización de agua del mar y agua salobre para la obtención de agua cruda en la preparación de agua potable y agua de proceso. Sin embargo, los procedimientos convencionales consumen tanta energía, que entretanto se estaba implantando cada vez más la ósmosis inversa. Los procedimientos más modernos, no obstante, aprovechan el agua del mar a destilar como agua de refrigeración, por lo que de esta forma se puede recuperar casi el 100% del calor de condensación. En plantas de destilación en contracorriente de hasta 16 etapas, es posible reducir de esta forma el consumo de energía a aprox. un 15% del de las plantas clásicas. En los países árabes, la desalinización térmica de agua del mar está experimentando actualmente un renacimiento gracias a una política de conservación del medio ambiente que aprovecha el gas natural procedente de la extracción de petróleo que, de otra forma, se quemaría inútilmente.

2.3.3 Destilación para la obtención de agua de alta pureza

La llamada “agua bidestilada” fue hace 30 años el estándar para agua de alta pureza en la medicina y la farmacia. Hoy en día, por lo general, solamente se efectúa una destilación –precedida, p. ej., de una desalinización, desionización y ultrafiltración– como última etapa del tratamiento de agua de alta pureza.

3 Procedimientos físico-químicos

En sentido estricto, la **nanofiltración** y la **ósmosis inversa**, ya tratadas más arriba, son también procedimientos físico-químicos.

3.1 La gravedad y la química

3.1.1 Caso problemático: separación de coloides

Cuando el tamaño de las partículas en suspensión es inferior a un micrómetro, el proceso de sedimentación es extremadamente lento aunque las partículas tengan una gran densidad. Tampoco suelen formar grandes coágulos, ya que se mantienen “a distancia” debido a su carga eléctrica por lo general negativa. Este tipo de suspensiones reciben el nombre de coloide. En teoría sería posible separar un coloide por el método de la ultra o nanofiltración, pero con grandes cantidades de agua resultaría demasiado costoso. En esos casos se aglutinan las partículas más finas por medio de la floculación, para formar partículas más grandes. De esta forma pueden sedimentarse al cabo de un tiempo razonable.

3.1.2 Floculación

Para esta floculación se añaden primero cationes (iones polivalentes positivos, generalmente sales de hierro o aluminio). Estos descargan las partículas coloidales negativas, que se aglutinan formando aglomerados más grandes de carga positiva (“flóculos”). Si ahora se vierte calcio o sosa cáustica, se precipitan hidróxidos alcalinos, a los que se agregan los flóculos, que son arrastrados al fondo.

El efecto del agente floculante puede ser respaldado por medio de aditivos modernos. Estos aditivos de la floculación, utilizados para la reticulación de los flóculos sueltos, son polielectrolitos sintéticos (polímeros solubles en agua de múltiple carga positiva o negativa, p. ej., acrilatos). Los floculantes se utilizan en la industria generalmente para tratar las aguas residuales procedentes de explotaciones mineras o refinerías, donde aceleran los procesos de sedimentación o filtración. Con aguas crudas problemáticas (p. ej., agua de río), la floculación se emplea a menudo en las primeras etapas de la preparación de agua potable, agua industrial y agua de proceso.

La floculación se emplea también en la decantación primaria o en la secundaria en el tratamiento de aguas residuales. Un efecto adicional de la floculación es que los flóculos “envuelven” asimismo pequeñas trazas de iones de metales pesados o algunos compuestos orgánicos poco biodegradables, precipitándolos también.

3.2 Filtración por membrana en campo eléctrico

3.2.1 Electrodesionización – el principio

El principio básico de funcionamiento de la electrodesionización es similar al de la ósmosis inversa. Dos soluciones de agua en las que están sumergidos los electrodos están en contacto a través de una membrana semipermeable. Al aplicar una tensión positiva o negativa, los cationes o los aniones, respectivamente, se trasladan a través de la membrana. A diferencia de la ósmosis

inversa, no se traslada el agua, sino los iones de sal, y la fuerza impulsora es un campo eléctrico, en lugar de la presión. No es necesaria una regeneración. Se trata por tanto de un procedimiento extremadamente respetuoso con el medio ambiente.

3.2.2 La electrodesionización para la eliminación de ciertos iones

Variando el tamaño de poro y la tensión, es posible remover de manera selectiva ciertas clases de iones. En caso necesario, incluso hasta un grado de pureza del 100% (v. siguiente párrafo). La electrodesionización se utiliza en la actualidad, p. ej., para eliminar de aguas residuales de proceso iones peligrosos de metales pesados.

3.2.3 La electrodesionización para la desmineralización total en la preparación de agua de alta pureza

En la ósmosis inversa, la capacidad de carga mecánica de las membranas y los costes del diseño para garantizar la resistencia a la presión de la instalación, limitan la presión y el tamaño de poro que pueden ser utilizados, por lo que en la práctica se obtiene como máximo un agua desalinizada al 99,3%. La electrodesionización, por el contrario, no plantea ninguna dificultad desde el punto de vista del diseño. Debido al aporte continuo de agua fresca (agua potable) en el lado de separación de sales de la membrana, es posible desplazar el equilibrio de distribución de manera extrema para favorecer la separación. La obtención de agua pura al 99,99% o incluso más ya solo depende de la velocidad de paso y de la cantidad de agua fresca aportada. Por esto hoy en día para la preparación de agua de alta pureza, p. ej., para la producción de semiconductores (chips), se prefiere la electrodesionización –precedida de una desalinización mediante ósmosis inversa– para una auténtica desionización o desmineralización total.

3.3 Adsorción

3.3.1 Enlace superficial como caso límite de enlace químico

La adsorción de moléculas de gas o de moléculas disueltas en superficies de sólidos es un caso límite en la física del estado sólido y la química. Tradicionalmente se encuadraba el efecto dentro de la química física, mientras que hoy en día se estudia en el marco de la ciencia de superficies (física y química de superficies). En un sentido estricto, se habla de adsorción cuando las fuerzas de enlace entre molécula y sólido son superiores a fuerzas netas de Van der Waals. Que pueda llegar a establecerse un enlace, p. ej., entre una molécula de un herbicida disuelta en agua y la superficie de un cristal de carbono, se debe a la presencia de enlaces incompletos en la superficie limítrofe absoluta de los sólidos. El profesor de química diría: un átomo de carbono situado en la superficie de un sólido es retenido por tres de sus cuatro enlaces posibles en el interior del volumen, mientras que la cuarta valencia carece de enlace y se “asoma” al espacio. En el grafito, el cuarto enlace (por naturaleza relativamente débil) apunta hacia afuera, permitiendo así a que un gran número de clases de moléculas se acoplen de manera energéticamente favorable. Determinados minerales como las bentonitas, las zeolitas y la alúmina se utilizan también como filtros de adsorción.

3.3.2 La adsorción en carbón activado, un procedimiento estándar en la química

El carbón de grafito con una superficie particularmente grande se emplea ya desde hace más de 100 años como adsorbente debido a las propiedades especiales que presenta la superficie del carbono. Esa gran superficie se obtiene gracias a una estructura porosa que se forma al transformar madera en “carbón activado” mediante destilación seca y tratamiento con vapor de agua y

agua. Hoy en día se emplea a escala industrial como carbón activado, hulla especialmente tratada (filtro de antracita) y lignito.

3.3.3 Filtros de carbón activado en el tratamiento de aguas

La filtración con carbón activado se utiliza en el tratamiento de aguas para depurar agua cruda contaminada con herbicidas, pesticidas, fungicidas, aceites, medicamentos, hidrocarburos clorados, hidrocarburos aromáticos y otros hidrocarburos. Dependiendo de la contaminación y de las normas legales, la eliminación en incineradoras o depósitos de residuos peligrosos o la incineración a carbón del material filtrante saturado de las sustancias adsorbidas, en centrales eléctricas, puede resultar muy caro. Aunque también puede ser regenerado en instalaciones especiales. La filtración con carbón activado es sencilla y eficiente desde un punto de vista tecnológico, pero al final resulta relativamente cara, y la eliminación de los residuos que genera es contaminante.

La filtración con carbón activado se utiliza en presencia de contaminantes especiales en el **agua cruda empleada para la preparación de agua potable y agua de proceso**. El carbón activado se utiliza también en la decantación previa del **agua residual** si esta contiene contaminantes que puedan afectar negativamente a la degradación microbiana en la fase biológica de la planta de tratamiento. Si la calidad del agua depurada debe cumplir requisitos especiales, por ejemplo, en caso de verse en aguas aptas para el baño o de filtrarse en el agua subterránea para la obtención de agua potable, el carbón activado se utiliza también en el tratamiento de aguas residuales, concretamente en la decantación secundaria.

El carbón activado sigue siendo un estándar en el pre-tratamiento de las **aguas residuales industriales** de procesos de producción especialmente contaminados, aunque está siendo reemplazado cada vez más por procedimientos “sin residuos” (filtración por membrana, degradación oxidativa o química con peróxidos, ozono, UV, entre otros).

4 Procedimientos químicos

4.1 Intercambio de iones

Que una sal se disuelva depende de la energía de enlace recíproca de los iones de la sal y de la energía de hidratación de los iones de sal en el agua. Si la energía de hidratación de los iones de la sal es mayor que su energía de enlace recíproca, los iones se disuelven en el agua. Esto aplica también cuando los iones de la sal no están enlazados entre sí, sino adheridos a la superficie de sustancias minerales (determinadas zeolitas) o resinas sintéticas. Si a una superficie de este tipo hay adheridos, p. ej., iones de sodio o de hidrógeno, estos pueden disolverse al contacto con agua si a cambio se depositan sobre la superficie otros iones presentes en el agua como, p. ej., iones de calcio. De ahí el nombre de “intercambiador de iones”. Es decir, si la solubilidad del sodio o del hidrógeno enlazado por el intercambiador de iones es mayor que la del calcio, el intercambio de iones se mantiene en el tiempo hasta que se haya alcanzado un equilibrio de distribución (v. Ley de distribución de Nernst).

4.1.1 Desmineralización o ablandamiento

El ablandamiento normal del agua en instalaciones de agua doméstica, pero también en la industria de bebidas, se efectúa con plantas de intercambiadores de iones, donde los iones endurecedores del agua Mg^{2+} o Ca^{2+} son reemplazados por Na^{+} . El intercambiador de iones se regenera de nuevo con cloruro de sodio (NaCl) una vez saturada su capacidad de intercambio. Es lo mismo que sucede en el lavavajillas.

4.1.2 Desionización – desmineralización total

Mediante el reemplazo “completo” por iones H^+ es posible remover todos los cationes disueltos en el agua, como p. ej. los de metales pesados. El intercambiador de iones se regenera a continuación con ácido (p. ej., ácido clorhídrico). Con frecuencia se refiere erróneamente a esto como desionización o desmineralización total. Pero, en sentido estricto, la desmineralización total debe incluir no solo a los cationes, sino también a todos los aniones (cloruro, sulfato, etc.). Esto es posible por medio de intercambiadores de aniones adicionales. El intercambio iónico para la desionización se utiliza en la industria en casos excepcionales, para el tratamiento previo de aguas residuales de proceso muy contaminadas. Para la preparación de agua de proceso con elevadas exigencias en su pureza, se emplean cada vez más otros procedimientos de funcionamiento continuo sin regeneración química (v. también Electrodesionización).

4.2 Ajuste del valor pH

4.2.1 Valor pH – la fuerza del hidrógeno

El “potencial de hidrógeno” es el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno. El valor pH indica si en una solución acuosa hay un exceso o un déficit de iones de hidrógeno (H^+ = “protones”) en relación al punto neutro. Un valor pH de 7 indica que la solución es neutra. Un valor pH inferior a 7 indica que la solución es ácida. Un valor pH superior a 7 indica que la solución es básica. Determinadas reacciones químicas y bioquímicas – en parte deseadas, en parte no deseadas – se aceleran o se retardan en función del valor pH.

4.2.2 Neutralización

El agua ácida produce en poco tiempo corrosión en la red de agua potable. Eso significa que se acortaría la vida útil de todas las tuberías que conducen agua y que sería necesario sustituirlas antes de tiempo. La neutralización tiene por esto una **importancia esencial en la preparación de agua potable**.

En la **preparación de agua potable**, un valor pH demasiado bajo (ácido) puede llevar al llamado pH de equilibrio, por eliminación del dióxido de carbono (ácido carbónico) disuelto en el agua o mediante filtración a través de piedra caliza (grava de mármol o dolomita semicalcinada). El calcio disuelto en el agua y el ácido carbónico restante disuelto quedan entonces en equilibrio (equilibrio calcio-ácido carbónico). En función de la dureza del agua, ese valor pH de equilibrio se sitúa entre 6,5 y 7,5.

En el **tratamiento de aguas residuales** se utiliza frecuentemente calcio en la decantación previa para ajustar el pH del agua residual a un valor entre neutro y ligeramente básico. Esto favorece la precipitación de fosfatos con sales de hierro y reduce la solubilidad de los metales pesados, que de esta forma también pueden ser precipitados. Por otra parte, un valor pH demasiado bajo (ácido) frenaría la degradación aerobia en la fase biológica.

En la química, la farmacia y la producción de chips, el **agua de alta pureza** se ajusta lo más exacto posible a un pH 7 neutro, con sosa cáustica (antes de la desmineralización o desionización).

4.2.3 Acidificación

En cambio, en la **planta de tratamiento de aguas residuales** se aumenta la acidez del fango para la generación de biogás en el biodigestor. Esto se debe a que las reacciones bioquímicas de la fermentación se desarrollan mejor en entornos ácidos.

4.3 Degradación / transformación química

4.3.1 Degradación catalítica mediante luz UV

La radiación de alta energía puede excitar hasta llegar a romper los enlaces químicos en sustancias que de otra forma resultarían difícilmente biodegradables. Las moléculas se descomponen así en sustancias, por lo general, más fácilmente degradables.

4.3.2 Desinfección del agua con luz UV

La fotólisis también es responsable de que mueran o se impida la multiplicación de prácticamente todos los microbios (bien se trate de bacterias, virus, hongos, etc.) al radiarlos con luz UV de alta energía. Solo que aquí se rompen normalmente los enlaces químicos en el ADN.

Dado que este procedimiento altamente eficaz no necesita de ninguna regeneración química ni genera residuos, se ha convertido en uno de los procedimientos estándar para la **preparación de agua potable, agua industrial y agua de proceso**. Incluso en la producción de agua de alta pureza para la farmacia se aplica a menudo como fase de desinfección complementaria de otros procedimientos como la ultrafiltración y la nanofiltración por membrana. (Aniquilación de los microbios con luz UV, separación por filtración de los organismos muertos y las endotoxinas).

4.3.3 Luz UV contra la legionela en hogares, hoteles y piscinas

En el agua estancada durante mucho tiempo en depósitos y tuberías a temperaturas por encima de aprox. 25 °C pueden multiplicarse muy rápidamente agentes patógenos especiales causantes de la neumonía: la legionela. Solamente las temperaturas constantes del agua considerablemente por debajo de 20 °C o por encima de 60 °C son una protección segura. Mediante sistemas de tratamiento UV integrados en el sistema de conducción de agua, se exterminan con seguridad estas legionelas.

4.3.4 Oxidación

Se denomina oxidación a todas las reacciones que se producen con sustancias capaces de aceptar electrones. Entre estas sustancias se encuentran el oxígeno, el ozono, el cloro o el permanganato. Ejemplos de este tipo de reacciones son la combustión de hidrocarburos (gasolina, diésel, gas natural), formándose dióxido de carbono y agua, o la oxidación de pesticidas presentes en agua cruda mediante ozono. En el tratamiento de agua, estos procesos no transcurren en forma de combustión rápida, sino como oxidación lenta.

4.3.5 Degradación oxidativa de contaminantes con oxígeno del aire

Este es el procedimiento estándar que tiene lugar en la fase biológica de una **estación depuradora de aguas residuales** con la ayuda de microbios aerobios. En la preparación de agua potable se utiliza en casos especiales, en ocasiones en bioreactores de lecho fijo. Pero aunque no se apliquen de manera selectiva procesos biológicos oxidativos, no dejan de tener lugar en casi todos los filtros empleados para la separación de partículas.

4.3.6 Degradación oxidativa de contaminantes y desinfección con peróxidos y ozono

Cuando el ozono (O₃) o los peróxidos se descomponen, se libera oxígeno atómico en forma de radicales de oxígeno. Mientras que el oxígeno molecular requiere temperaturas más altas (energía de activación), los radicales de oxígeno oxidan de por sí muchos contaminantes a baja temperatura. Los perboratos, percarbonatos y algunos persulfatos especiales tienen un efecto especialmente

te rápido y permiten acortar los tiempos de tratamiento. Pero generan soluciones salinas, por lo que no proporcionan agua pura. Para la desinfección de agua pura, en cambio, se utiliza peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y ozono, ya que se descomponen sin dejar residuos. Estos procesos químico-oxidativos se aplican también en combinación con luz UV.

4.3.7 Combinación de procesos oxidativos y fotolíticos

Si el agua contiene compuestos orgánicos muy poco degradables, hoy en día se trabaja preferiblemente tanto en la preparación de agua de alta pureza como en el tratamiento previo de aguas residuales de proceso con una combinación de luz UV y peróxidos u ozono. Esto garantiza una degradación segura en un tiempo de tratamiento relativamente corto.

4.3.8 Cloro para la desinfección

En última instancia, el tratamiento con gas de cloro, dióxido de cloro o hipoclorito de sodio es un procedimiento de oxidación: el cloro y el agua se descomponen en ácido clorhídrico y oxígeno atómico a través de la fase de hipoclorito. Y aunque el hipoclorito ya elimine por sí mismo muchos microbios, igual de eficaz es también el oxígeno atómico. En la actualidad ya no se utiliza por lo general la cloración durante el tratamiento de agua de proceso debido a que deja restos de sodio y de iones de cloruro en el agua, cambiando el valor pH. No obstante, continúa siendo un estándar en la **preparación de agua potable y en piscinas**. El cloro o hipoclorito disueltos tienen una longevidad relativamente larga, por lo que tienen un efecto desinfectante uniforme y persistente en el tiempo, incluso en sistemas ampliamente distribuidos en el espacio.

4.4 Separación por la solubilidad

4.4.1 El equilibrio de disolución hace posible la precipitación

En todo compuesto iónico soluble en agua ("sal") siempre hay, dependiendo de la temperatura, un determinado porcentaje de sustancia no disuelta en equilibrio con la disuelta. La fracción no disuelta puede separarse mediante sedimentación o filtración. Pero muchas sales se disuelven tan bien, que esta no es una opción viable.

La solubilidad depende a menudo del estado de oxidación de los iones. Por ejemplo, el hierro y el manganeso bivalentes se disuelven bien en agua, mientras que el trivalente se disuelve mal. Pero si a una solución de una sal "completamente" disuelta se añade la solución de otra sal disuelta, puede ser que los aniones y cationes de las sustancias se combinen de nuevo. Por ejemplo, los cationes de la sal A forman con los aniones de la sustancia B una sal de menor solubilidad, que en su mayor parte se precipita, pudiendo así ser separada.

4.4.2 Eliminación del hierro y el manganeso del agua potable

Los iones de hierro y manganeso presentes en el agua cruda forman óxidos e hidróxidos difícilmente solubles al aumentar su grado de oxidación mediante la aireación intensiva del agua cruda, conduciendo el flujo de agua en cascadas o insuflando en ella oxígeno del aire. Estos se precipitan como flóculos y pueden ser separados en el filtro de arena. Sin embargo, para obtener un agua potable de mayor calidad es mejor airear el agua solo ligeramente y dejar que el verdadero proceso de oxidación lo lleven a cabo microorganismos en un filtro de arena. Los óxidos e hidróxidos así formados se adhieren mejor a los granos filtrantes, que los flóculos que se separan en el filtro.

4.4.3 Precipitación con sales de hierro de fosfatos presentes en el agua residual

Los fosfatos de hierro y de aluminio son difícilmente solubles, por lo que el fosfato presente en el agua residual se puede precipitar añadiendo sales de hierro y de aluminio fácilmente solubles. Este ejemplo muestra además, de un modo muy gráfico, que la solubilidad también puede depender del valor pH. El fosfato de hierro permanecería disuelto en agua ácida, mientras que en agua ligeramente básica la solubilidad decrecería aún más, pero volvería a aumentar de nuevo en agua altamente básica. Por esa razón se aumenta el valor pH a aprox. 7,2 durante la desfosfatación, al añadir carbonato de calcio ligeramente básico.

5 Procedimientos biológicos

Estos procedimientos actúan de manera indirecta a través de los procesos químicos que tienen lugar en los procesos metabólicos y de multiplicación de microbios como bacterias, protozoos, hongos, etc. Aquí se emplean, por tanto, procesos bioquímicos. Esos procedimientos se describen en detalle en las directrices sobre agua residual y agua potable.