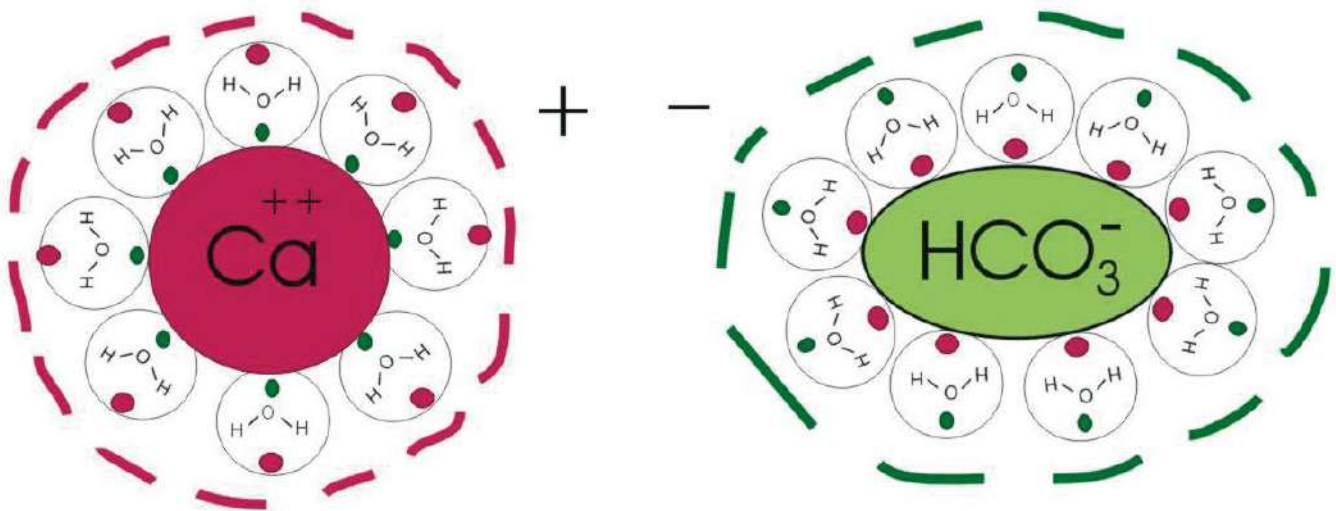


El tratamiento físico del agua

Funcionamiento



El tratamiento físico del agua: funcionamiento

Hartmut Jünke

1. Introducción

En las últimas dos décadas, se ha hecho común el uso de tratamientos físicos del agua, y con ello ha surgido una discusión en torno a este tema. Durante este tiempo, este tipo de tratamientos ha demostrado su eficacia, aunque algunos siguen cuestionándola.

¿A qué se debe esto? Al analizar las discusiones al respecto, es posible encontrar diferentes razones, pero este no es el lugar para discutir las. Por el contrario, nos parece necesario examinar los fundamentos físicos que explican el funcionamiento de este tipo de tecnología, de modo de librarla de cualquier acusación de falsedad y poder identificar a las ovejas negras que condujeron a tales acusaciones.

El siguiente es un intento por aclarar estos temas.

Aparte de mi propia experiencia positiva, la cual demuestra claramente la eficacia que ofrece el tratamiento físico del agua al menos en lo que respecta al dispositivo que instalé en mis propias tuberías¹, existe una serie de informaciones procedentes de instituciones de renombre, como el Instituto de Fisiología de la Universidad Ludwig-Maximilian de Múnich, que también lo confirman. En esta institución, el cambio de los tubos de láser que fue necesario realizar tras las obstrucciones ocasionadas por el refrigerante, pudo evitarse gracias a la instalación de un dispositivo de tratamiento físico del agua. Los hoteles y conjuntos residenciales, así como un sinnúmero de conversaciones mantenidas con usuarios privados confirman la acción de dicho tratamiento, si bien también se observa a menudo insatisfacción por su mal funcionamiento. Puesto que en la mayoría de los casos los usuarios particulares no conocen al fabricante del dispositivo de tratamiento del agua (muchas veces declararon que era un dispositivo barato comprado en el supermercado), sólo podemos concluir que existen dispositivos que no reúnen las condiciones físicas para ser eficaces, sin embargo, esto no permite concluir que la tecnología misma del tratamiento es inútil y no funciona.

Desgraciadamente, esta es la impresión que también suele darse a través de publicaciones serias,

muchas veces sin ninguna prueba científica, o sin pruebas orientadas al modo de funcionamiento del tratamiento que le hagan justicia.

Antes de explicar el modo de funcionamiento del tratamiento físico del agua por medio de una prueba de factibilidad, debemos aclarar por qué se producen acumulaciones calcáreas en las tuberías de agua.

Por lo anterior, consideramos que la cal es el objetivo del tratamiento físico del agua.

2. . La cal

Desde el punto de vista químico, la cal es carbonato de calcio, CaCO_3 , un compuesto insoluble en agua. Pregunta: ¿Cómo puede entonces disolverse en el agua? Respuesta: cuando el agua que contiene dióxido de carbono circula a través de suelos calcáreos, la cal es arrastrada y queda en el agua como carbonato ácido de calcio, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Esto es posible porque el dióxido de carbono, CO_2 , junto con el agua, H_2O , forma ácido carbónico, H_2CO_3 . Como también nos lo ha enseñado la práctica doméstica, para disolver la cal y eliminarla con agua se requieren agentes ácidos. Puede parecer fastidioso aclarar que existe una diferencia entre la cal disuelta y la no disuelta, pero esta es precisamente la falla en la argumentación sobre cómo funcionan los dispositivos de tratamiento físico del agua.

Esto nos lleva a preguntarnos antes que nada por qué se separa la cal. La cantidad disuelta de carbonato ácido de calcio en el agua potable no alcanza nunca el límite de saturación a partir del cual un soluto se separa en forma de cristal.

Si observamos los puntos de la tubería de agua donde se deposita la cal, ya tenemos la respuesta. Los principales lugares de formaciones calcáreas son las curvas, las ramificaciones y los puntos finales (grifos), así como, en cierta medida, las zonas del agua caliente. Pero incluso en este último caso, hay que distinguir: los depósitos de agua caliente suelen no presentar acumulaciones de cal. Las superficies afectadas son las resistencias, las bobinas calentadoras y los intercambiadores de

El tratamiento físico del agua: funcionamiento

Hartmut Jünke

calor, es decir, las superficies que transmiten calor al agua.

¿Por qué en estos puntos en particular? La respuesta es muy sencilla: debe existir un gradiente de energía que haga que las jaulas de agua (véase más adelante) que rodean a los iones disueltos se abran, permitiendo que reaccionen entre sí. Al mismo tiempo, debe alterarse el “equilibrio cal-ácido carbónico”, es decir que debe desarrollarse localmente una deficiencia de CO₂. Entonces los componentes buscarán un punto de cristalización (núcleo) donde puedan comenzar la formación de cristales. Estos lugares se encuentran siempre en las paredes del tubo, que representan la base sólida sobre la que pueden crecer los cristales. A continuación, otros componentes se adhieren, los depósitos de cal crecen y se forman incrustaciones, también denominadas sarro. Estas incrustaciones se componen de carbonato de calcio mezclado con compuestos de magnesio, yeso, silicatos y compuestos de hierro (de ahí su color amarillo-marrón). Estos sedimentos favorecen la corrosión y obstaculizan la transferencia de calor de las resistencias y los intercambiadores de calor.

¿Cómo es posible que se produzcan diferencias energéticas locales en el agua? En el caso de las resistencias es sencillo, ya que el calor se transfiere al agua. En las curvas, por su parte, el agua se acelera y la energía para esta aceleración proviene de la energía interna del agua. Esto produce cambios de presión y de temperatura. Lo mismo ocurre con las ramificaciones y los puntos finales de agua. Aquí se crean turbulencias, cuya demanda de energía la cubre también la energía interna del agua, con los mismos resultados señalados.

Si observamos tuberías de agua que han estado en funcionamiento durante años, veremos que las incrustaciones siempre parten en los codos o ramificaciones y luego crecen hacia las secciones rectas. Cuando una tubería se obstruye, generalmente el problema proviene sólo de estas zonas, mientras que la parte recta predominante del circuito sigue funcionando correctamente y pudiendo transportar el agua.

¿Qué ocurre químicamente cuando se produce la

cristalización? La fórmula (1) explica este proceso:



En primer lugar, hay que señalar que las reacciones descritas respecto a la formación de cal también pueden ocurrir en sentido contrario, es decir, la cal puede volver a disolverse (véase más arriba). El proceso que ocurra dependerá del “equilibrio cal-ácido carbónico”. Si hay un exceso de CO₂, la cal se disuelve, de lo contrario la cal se separa. Estos procesos también dependen de los cambios de presión y temperatura, es decir, de parámetros físicos.

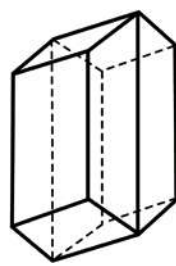


Fig. 1: Célula elemental de un aragonito (sistema romboide)

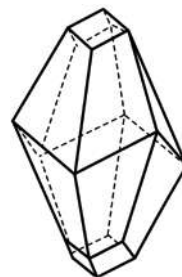


Fig. 2: Célula elemental de una calcita (sistema trigonal)

A este respecto conviene señalar algo sobre el cristal de cal.

Se sabe que la mayoría de las sustancias que se denominan sólidas son cristalinas.

Según su composición, los cristales se clasifican en 7 sistemas cristalinos y 32 clases de cristales que se diferencian por su estructura reticular.

La cal puede cristalizar en dos estructuras diferentes que son idénticas desde el punto de vista químico. Aunque sus estructuras reticulares son diferentes, estas están relacionadas. En una etapa posterior, se formará el tipo de red del aragonito (Fig. 1) o de la calcita (Fig. 2). Cuando la composición química es la misma, la modificación que se produce depende de las condiciones termodinámicas (presión, temperatura). Como muestran las imágenes, en ambas células elementales un eje en longitud es más largo que los demás. Esto significa que un cristal crece más rápido en esta dirección que en las otras.

El tratamiento físico del agua: funcionamiento

Hartmut Jünke

La tasa de crecimiento es anisótropa, es decir que depende de la dirección.

Así, cuando los cristales crecen sin perturbaciones, estos adoptan una forma acicular [de aguja]. Si la velocidad de crecimiento fuera la misma en todas las direcciones axiales (isótropa), se formarían cristales esféricos. El carbonato de magnesio MgCO_3 y FeCO_3 también cristalizan en el tipo de retícula de la calcita, por lo que también estas sustancias se incorporan fácilmente a los depósitos calcáreos. Por su parte, la anhidrita (yeso deshidratado o yeso propiamente tal, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) corresponde al tipo de retícula del aragonito. Los fosfatos y sulfatos, así como los silicatos de calcio y magnesio, también cristalizan en tipos de retículas similares. Esto favorece su incorporación a los depósitos calcáreos. Especialmente en las secciones del agua caliente – donde estos elementos presentes en el agua suelen disolverse primero – los núcleos de cristalización existentes también sirven como punto de partida para la precipitación en el agua y no para formar depósitos en las paredes ni en las resistencias calentadoras.

Entonces, ¿cómo actúan realmente los dispositivos que prometen una acción contra la cal?

1. Dichos dispositivos no transforman la cal. ¿En qué podrían convertirla de todos modos? Estos dispositivos hacen que el carbonato ácido de calcio $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ precipite como carbonato de calcio CaCO_3 , el cual es eléctrica y químicamente neutro en el agua. Este un cuerpo sólido y cristalino con el efecto secundario especial de que el cristal no cristaliza en un cuerpo sólido ya existente (p ej., en las paredes de la tubería como núcleo de cristalización), sino que se forma en el agua corriente. Dicho cristal se forma de acuerdo a las leyes de la naturaleza con los parámetros típicos de cada sustancia y adopta formas determinadas por aquella.

2. De esto se deduce que estos cristales no tienen propiedades especiales, sino formas especiales que ya no pueden “adherirse” entre sí, evitando así la

calcificación. Aquí es donde interviene eficazmente el mecanismo descrito.

3. El agua

Para entender los procesos siguientes, hay que agregar algunas palabras sobre el agua. El agua es mucho más de lo que dice la fórmula H_2O . Los dos átomos de hidrógeno forman un triángulo equilátero con el átomo de oxígeno en el vértice y encierran un ángulo de ≈ 110 grados, como se muestra en la Figura 3.

Esta es la causa de muchas de las propiedades

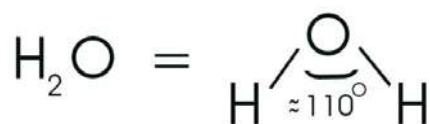


Fig. 3: Estructura angular de una molécula de agua

especiales del agua que la distinguen de otras moléculas similares. Dos gases que reaccionan entre sí forman un líquido y no otro gas, como ocurre, por ejemplo, con el dióxido de carbono CO_2 (¡sólido + gas!), una molécula mucho más pesada. Debido a esta posición angular, las moléculas de agua forman cadenas y racimos que originan el estado líquido.

Esto también podría explicar por qué el agua podría tener una “memoria” en la que asume ciertas estructuras en sus cadenas y racimos que permanecen intactas incluso cuando circula. Estas cadenas y racimos se mantienen unidos por las fuerzas de Van der Waals o “fuerzas de dispersión” y por los enlaces de hidrógeno. Esta unión se basa en la atracción de los dipolos eléctricos que se producen en las moléculas con enlaces polarizados o con una estructura angular.

Científicos de la Universidad de Stuttgart están investigando este problema y los primeros resultados muestran que el comportamiento del agua se ve influido por los campos eléctricos y magnéticos. Estos fenómenos se conocen desde

El tratamiento físico del agua: funcionamiento

Hartmut Jünke

hace mucho tiempo, pero nunca se han investigado científicamente.

Esta forma molecular origina otra característica especial: el agua posee un carácter dipolar. A través del enlace, sus dos elementos se esfuerzan en alcanzar una configuración de gas inerte en sus capas de electrones exteriores. En el caso del hidrógeno son dos electrones y en el caso del oxígeno, ocho. Al oxígeno le faltan dos electrones y a cada hidrógeno le falta uno. En la molécula, el total de dos electrones de enlace están disponibles para los tres átomos, por lo que todos los átomos pueden alcanzar la configuración de gas inerte.

En todos los enlaces homopolares de diferentes tipos de átomos, el enlace está polarizado, es decir que el par de electrones del enlace se desplaza en la dirección del compañero de enlace con el que tiene mayor afinidad electrónica, en este caso el átomo de oxígeno. Si se lleva la molécula de agua a un campo eléctrico, esta se alinea de tal manera que el oxígeno apunta al lado eléctricamente positivo y los átomos de hidrógeno apuntan al lado eléctricamente negativo. Así, la molécula de agua está un poco más cargada negativamente por el lado del oxígeno y un poco más cargada positivamente por el lado del hidrógeno.

Este hecho, junto con la forma molecular, desempeña un papel importante en la solubilidad del agua, así como en el tratamiento físico del agua. Aquí es necesario mencionar brevemente otras anomalías: si el agua pasa al estado sólido (hielo), su densidad disminuye. Si se somete el hielo a presión, vuelve a licuarse. Los líquidos suelen pasar al estado sólido y cristalino bajo presión. Estos pocos elementos deberían bastar para señalar que probablemente hay más cosas ocultas en el agua de las que nuestra ciencia universitaria actual ha descubierto hasta ahora.

4. La física y la química

¿Qué ocurre desde el punto de vista físico-químico cuando se utiliza un dispositivo para el tratamiento físico del agua?

Dado que existen varios mecanismos de tratamiento

que van desde los imanes insertos en las tuberías de agua hasta la inyección de cristales de semillas en el agua alrededor de los cuales se asientan las partículas de cal, aquí sólo examinaremos un mecanismo que se propone con frecuencia y que suele dar lugar a intensas discusiones.

Los procesos se explicarán utilizando un dispositivo cuya apariencia externa es bastante común y cuyo principio de acción se pone en duda. En la Figura 4 se ofrece una representación de este dispositivo, cuya función y modo de acción constituyen la base de este trabajo. Se trata de una caja negra de la que salen uno o dos cables que se enrollan alrededor de una tubería de agua. A través de estos cables se transmiten vibraciones al agua que se supone que “transforman” la cal disuelta y la hacen inofensiva.

Hemos elegido intencionalmente esta formulación



Fig. 4: Disposición básica del tratamiento físico del agua

porque corresponde esencialmente a la descripción de la función de los dispositivos que se ofrecen en el mercado, la cual plantea dudas sobre su seriedad.

¿Qué tipo de vibraciones se transmiten? En algunas descripciones de dispositivos –cuyos fabricantes parecen venir de la época alquimista– se habla incluso de que estos convierten el calcio. Otros dicen que el material de la tubería es irrelevante y que el dispositivo también elimina las incrustaciones ya existentes. ¿Cómo puede conseguirse esto mediante vibraciones? La verdad es que cualquiera que crea tener conocimientos básicos de física y química encontrará en esta explicación básica suficientes

El tratamiento físico del agua: funcionamiento

Hartmut Jünke

argumentos aparentemente científicos para dudar del funcionamiento de tales dispositivos.

¿Cómo opera un dispositivo que realmente evita la calcificación de las tuberías?

Lo primero que hay que preguntarse es qué tendría que hacer un dispositivo para cumplir este propósito. La respuesta es sencilla: debe crear las condiciones para que el carbonato ácido de calcio $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ se deposite en el agua en forma de cristal y no en las paredes de la tubería como cristal de carbonato cálcico, CaCO_3 .

En pocas palabras, esto significa que debe proporcionar los medios para que la cal disuelta no se cristalice y adhiera a las paredes o puntos de contacto de las tuberías, aparatos y accesorios con los que el agua entra en contacto. Esto sólo es posible si la cal disuelta pasa a un estado cristalino antes de entrar en contacto con estas zonas, es decir, si los cristales se forman en el agua misma. Para que esto ocurra, deben darse dos condiciones en el agua:

1. Deben existir o crearse núcleos de cristalización.
2. El equilibrio cal-ácido carbónico debe modificarse de modo tal que la cal disuelta pase al estado sólido.

La práctica ha demostrado que al incorporar campos magnéticos o eléctricos en el agua se pueden conseguir estos efectos, aunque con una eficacia variable. Aquí sólo consideraremos el efecto de los campos eléctricos, pero de ellos podemos deducir las condiciones en las que también pueden ser eficaces los campos magnéticos.

Si observamos la Figura 4, podemos apreciar los dos devanados mediante los cuales se transmiten los impulsos. Muchos fabricantes llaman a estos devanados “bobinas” porque ese es su aspecto, sin embargo, en el sentido eléctrico no lo son. Por tanto, no es posible un acoplamiento “inductivo”. Por lo demás, si fuera una inductancia, el dispositivo no funcionaría en tubos de hierro, cosa que sí ocurre. Este devanado representa una parte de la

capacitancia, es una superficie del condensador, la segunda es el agua. Este devanado representa una concesión tecnológica: una lámina metálica colocada alrededor de la tubería, a la misma longitud, aportaría una capacidad ligeramente superior, pero habría que fabricarla y adaptarla por separado a cada diámetro de tubería. Por su parte, los cables de altavoz normales se pueden adquirir por metro y se adaptan fácilmente a los distintos diámetros de tubo.

¿Cómo puede generarse un campo eléctrico en el agua con esa disposición, y ello a través de cualquier material de tubería? Aquí es donde surgen las mayores dudas. Con esta disposición entra en juego un efecto físico muy común, pero poco conocido en la vida eléctrica cotidiana: la inductancia. La Figura 5 muestra el proceso básico mediante un diagrama de condensación.

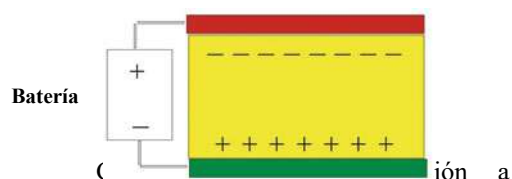


Fig. 5: Separación de la carga mediante influencia

las dos placas del condensador, se genera un desplazamiento de carga en el dieléctrico (aislante) que es opuesto a la carga de las placas. Cuando las placas se descargan, la polarización del aislante también desaparece, ya que ningún electrón puede desplazarse en él; sólo los electrones ligados sufren un desplazamiento. Si por el contrario, se introducen en el campo eléctrico entre las placas del condensador dos láminas metálicas (conductoras de la electricidad) superpuestas, se produce una separación de cargas, de modo que una lámina recibe una carga negativa (opuesta a la placa positiva del condensador) y la otra recibe una carga positiva equivalente. Este fenómeno se conoce como inductancia. Si se separan las dos láminas metálicas de un campo eléctrico, una de ellas tendrá carga negativa (exceso de electrones) la otra, carga positiva (falta de electrones).

El tratamiento físico del agua: funcionamiento

Hartmut Jünke

Un condensador es impermeable a la tensión continua, pero no a la tensión alterna. Este hecho se puede aprovechar para acoplar campos eléctricos alternos en la tubería. La Figura 6 muestra este proceso de forma esquemática para un estado instantáneo. Se puede observar que el material del tubo no influye en el efecto condensador de la disposición.

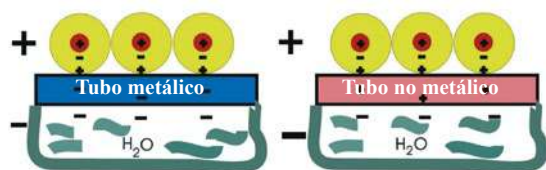


Fig. 6: Transferencia de un campo eléctrico al agua por influencia

Si el cable del devanado está cargado por un polo de una fuente de energía, la misma carga eléctrica de signo opuesto se une en la tubería de agua por influencia (ya que el agua viene de la tierra).

Si se trata de una recarga periódica o de una carga y descarga, entonces se produce una corriente llamada de desplazamiento (que puede calcularse mediante las ecuaciones de Maxwell) entre el bobinado de hilo aislado y la pared del tubo como continuación de una corriente de línea alterna (+-+-+...) o pulsante (0+0+0+... o 0-0-0-...). ... que se forma entre la tubería (incluida el agua) y la tierra, y que está asociada, por un lado, a un campo eléctrico alterno o pulsante orientado en la dirección longitudinal de la tubería y, por otro, a un campo magnético de vórtice centrado alrededor de la tubería.

Las mediciones mostraron que entre el devanado y el agua se acumula una tensión efectiva de ≈ 1 voltio y fluye una corriente de desplazamiento de $\leq 5\mu\text{A}$.

En este punto es necesario que nos detengamos en la cal disuelta en el agua. La Figura 7 muestra las conexiones. La cal disuelta –carbonato ácido de calcio– se disocia en un doble ion de calcio con carga positiva y dos iones de carbonato ácido con carga negativa. Estos iones están rodeados por una jaula de agua. Las moléculas de agua se asientan alrededor del calcio, de manera que el oxígeno

apunta hacia el calcio y el hidrógeno, hacia el exterior. Las fuerzas electrostáticas mantienen unidos estos racimos. Los restos de carbonato están rodeados de la misma manera, sólo que los átomos de oxígeno de las moléculas de agua apuntan hacia el exterior. En su conjunto estos racimos tienen una carga global positiva o negativa.

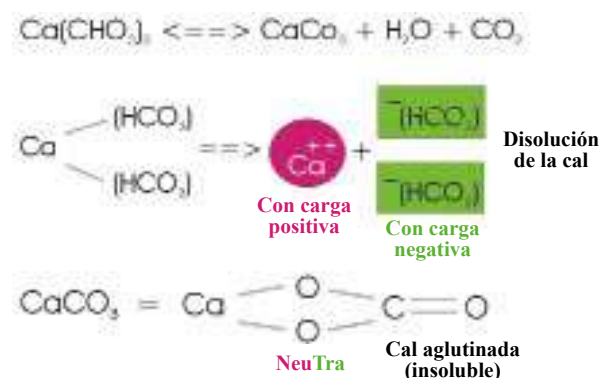


Fig. 7: Representación esquemática de la cal disuelta y la cal aglutinada

La Figura 8 ofrece una representación esquemática; hay que imaginar los racimos como esferas diminutas. Estos tienen un diámetro de 1 a 2 nanómetros (nm), suponiendo que haya entre 100 y 200 moléculas de agua. Si se calcula la masa de estos racimos, se obtiene que la masa de los racimos de calcio, así como la masa de los restos de bicarbonato oscila entre 30×10^{-22} g y 60×10^{-22} g. Estos resultados son interesantes en lo que se refiere al tratamiento del agua.

Regresemos al campo eléctrico alterno inducido. El campo periódicamente alterno en el interior del tubo influye en los iones o moléculas dipolares cerradas en las jaulas de agua presentes en el agua, de forma que se desplazan en vaivén a lo largo del tubo al compás del campo alterno.

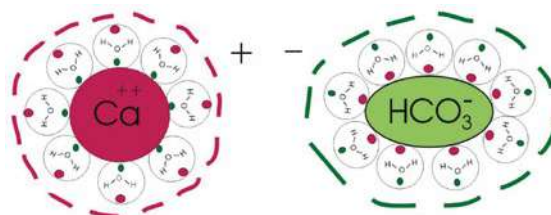


Fig. 8: Estado de la cal disuelta en el agua (esquema)

El tratamiento físico del agua: funcionamiento

Hartmut Jünke

La oscilación eléctrica origina una oscilación de la materia que se propaga axialmente. Desde el punto de vista físico, esto se expresa en una onda longitudinal mecánica (acústica) u onda de choque en la que se alternan zonas con sobrepresión y presión negativa. En los campos atómicos y moleculares, esto provoca localmente una adherencia del CO₂. Si la frecuencia de oscilación es adecuada, las jaulas de agua se desintegran y esto también conduce a una disminución local de la concentración de CO₂. El equilibrio cal-ácido carbónico se altera localmente y al mismo tiempo los iones de cal disueltos que se liberan de la jaula de agua pueden encontrarse y reaccionar entre sí: se ha producido una molécula de cal que ahora sirve como núcleo de cristalización*. Este núcleo capta otras moléculas y forma un cristal de cal en el agua, el cual es electrónicamente neutro y ya no reacciona en el agua potable. Así, los depósitos de cal existentes en las paredes de las tuberías ya no captan este cristal de cal.

Para desencadenar estos procesos, el campo eléctrico alterno tiene que contener frecuencias que puedan provocar oscilaciones de resonancia en las jaulas de agua. Dado que todas las aguas que se ajustan a la normativa [alemana] en materia de agua potable son diferentes en cuanto a la cantidad de minerales disueltos, al pH y a la conductividad, la formación del campo eléctrico alterno también se ve influida. Además, hay que tener en cuenta el cambio de la velocidad del flujo. Los dispositivos que funcionan con una sola frecuencia también pueden activar este ciclo casualmente, pero la mayoría de las veces no ofrecen eficacia alguna.

Existen algunos datos técnicos sobre el dispositivo aquí examinado, como también experiencias positivas sobre su efecto, por lo que tiene sentido evaluar de forma teórica y práctica –en la medida de lo posible– la eficacia de dicho dispositivo a través de dicha información.

El dispositivo analizado está equipado con dos devanados. Cada uno recibe impulsos con una frecuencia de reloj de 10 Hz, 50 ms de duración del impulso, y 50 ms de pausa y desenergización.

Cuando uno está en pausa y desenergizado, el otro recibe los impulsos. Cada impulso tiene una respuesta de frecuencia de aproximadamente 3 a 15 kHz, repartida en 50 ms. Al no disponerse de un equipo de medición adecuado, no fue posible medir la respuesta de frecuencia. Si se calculan 10 oscilaciones por kHz, se alcanza aproximadamente la duración del impulso. En este punto hay que hacer una vez más especial hincapié en que este es solo un intento de explicación general de la eficacia. No es posible estimar la complejidad de las oscilaciones excitadas, incluida la superposición de diferentes formas de onda (sobretonos).

Se supone que el dispositivo escogido permite tratar con seguridad 5.000 litros de agua por hora. En el caso de una tubería de media pulgada, esto equivale al flujo de una columna de agua de 11,3 mm/ms, en una tubería de una pulgada sería de 2,8 mm/ms y en una tubería de dos pulgadas, de 0,7 mm/ms. Como la longitud del efecto de un campo eléctrico alterno es de ≈500 mm (el fabricante indica ≈1000 mm), esto implica que dicha distancia alcanza a cubrirse. Cada jaula de agua de iones tiene tiempo suficiente para desintegrarse.

¿Qué pasa con la velocidad de reacción de los componentes químicos? El Instituto Max-Born de Óptica No Lineal y Espectroscopia Transitoria de Berlín examinó la velocidad de formación de las moléculas a partir de moléculas de agua mediante un tipo de láser especial. El resultado fue un tiempo de entre 10 y 20 femto segundos (1 fs = 10⁻¹⁵ segundos). Este tiempo es tan inconcebiblemente corto como el universo es inconcebiblemente grande. La distancia que recorre la luz en 1 fs nos da una idea aproximada de lo breve que es este tiempo: ≈0,3 μm. En el tiempo que la luz recorre 6 mm se pueden formar 1000 moléculas, por lo que es muy probable que la formación de moléculas y la formación de cristales

de núcleo tengan lugar en la sección sometida a tratamiento.

El tratamiento físico del agua: funcionamiento

Hartmut Jünke

5. Capas protectoras e incrustaciones

La formación de incrustaciones se describirá aquí solo brevemente utilizando como ejemplo lo que ocurre en los codos o curvas de las tuberías. En las curvas de las tuberías, el agua que circula experimenta una aceleración. El agua que corre por el radio exterior se mueve más rápido que la que corre por el radio interior. Según la ecuación simplificada de Bernoulli (2), la suma de la presión estática y dinámica es constante:

$$P_{\text{dyn}} + P_{\text{stat}} = \text{const.} \quad (2)$$

En el agua que fluye con mayor rapidez, la presión dinámica aumenta y la presión estática disminuye. Esto significa que el CO_2 escapa del radio interior hacia el radio exterior y el equilibrio cal-ácido carbónico se altera. La cal se libera, busca un punto de cristalización y lo encuentra en las paredes del radio interior. Poco a poco se va formando una capa de cal epitaxial en la que también se depositan otros minerales. En esta superficie irregular se desarrollan turbulencias, lo que también ocurre en las ramificaciones de las tuberías a causa de las fluctuaciones de presión, de modo que en ambos casos se desarrollan depósitos calcáreos. Al igual que en los grifos y en las duchas, en que se evapora el agua y por lo tanto también el CO_2 , también aquí se forman depósitos de cal. En las superficies calientes el CO_2 también se elimina de la zona circundante más cercana, por lo que estas superficies también son puntos de cristalización preponderantes para la cal.

La normativa [alemana] en materia de agua potable estipula que el agua debe contener una cantidad mínima de cal que corresponda a una dureza del agua de $8,4^\circ\text{d}$. Esto debido a que la presencia de cal en el agua potable es importante por dos razones. En primer lugar, porque el agua potable proporciona una gran parte del calcio que el cuerpo necesita y, en segundo lugar, porque los restos de bicarbonato de la cal disuelta reaccionan con el metal de la tubería, formando así una capa protectora de carbonato metálico. Esto es especialmente importante para las tuberías de cobre (véase más adelante).

La Figura 9 muestra un detalle de dicha capa de protección en la se puede apreciar cómo los cristales crecen en la superficie del metal. Estos haces de cristales cubren la superficie y protegen la tubería contra la corrosión.

La Figura 10 lo muestra aún con mayor claridad. Se trata de la imagen con microscopio electrónico de una capa protectora de fosfato producida artificialmente contra la corrosión. Los fosfatos cristalizan en un sistema de cristales similar al de los carbonatos. Con el tiempo, esta cualidad deseable de la cal se convierte en una desventaja, ya que cada vez se producen más acumulaciones calcáreas en estas capas protectoras que son puntos de cristalización ideales. Poco a poco, la tubería se va atascando, partiendo por los codos y ramificaciones de la misma.

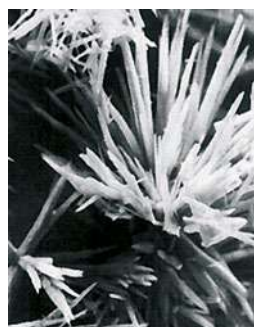


Fig. 9: Capa protectora de cal

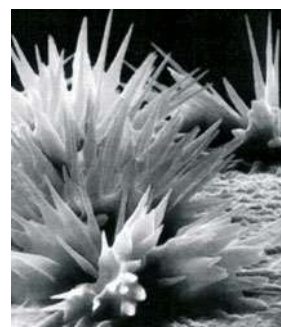


Fig. 10: Capa protectora de fosfato

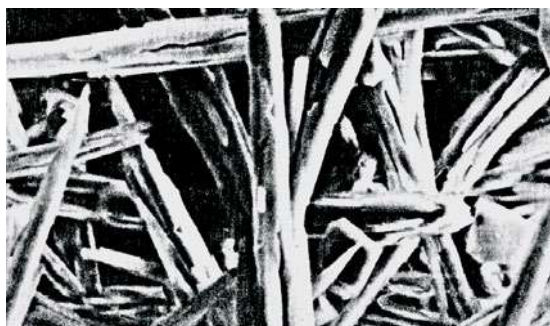


Fig. 11: Depósitos de polvo de cal

El tratamiento físico del agua: funcionamiento

Hartmut Jünke

Como se ha indicado anteriormente, a partir de estos puntos las incrustaciones crecen hacia los tramos rectos de la tubería. Este proceso ocurre mientras exista cal disuelta en el agua.

No obstante, la mayor parte de la cal transportada en el agua es arrastrada fuera de la tubería sin depositarse. Con un consumo de agua de 100 m³ al año y una dureza del agua de 28°d, las tuberías transportan unos 45 kg de cal. Si la cal se ha transformado en cristales en el agua como se ha descrito anteriormente, esta será arrastrada fuera de la tubería con el agua en forma de un fino cristal submicroscópico y no será posible su cristalización en las paredes de las tuberías. Los cristales de cal se depositan de forma aleatoria, como se muestra en la Figura 11. Esta situación también se mantiene en el agua caliente. El empleo del dispositivo, por ejemplo, en calderas de agua, ha demostrado que otros minerales disueltos se depositan en los núcleos de los cristales de cal y precipitan en forma de polvo, sin formar depósitos en las resistencias. Así, en una caldera de agua de 150 litros se pudieron eliminar 2 kg de depósitos de polvo de cal tras un año de funcionamiento del dispositivo y las barras de calefacción se hallaron absolutamente libres de incrustaciones. Respecto a la calefacción urbana, los usuarios del dispositivo de tratamiento examinado informaron que los intercambiadores de calor para el suministro de agua caliente también permanecieron libres de cal en el lado secundario. Desde la instalación del dispositivo, hace cuatro años, no ha sido necesaria ninguna limpieza. La cal se ha vuelto inofensiva, pero no se ha eliminado y sigue estando fisiológicamente presente. Otra consecuencia de esto es que las gotas de agua que se secan en las superficies dejan polvo de cal que se puede eliminar con un paño húmedo. Sin embargo, si este permanece en un entorno húmedo durante un tiempo, puede disolverse localmente bajo la influencia del CO₂ del aire y si se vuelve a secar, puede producirse una cristalización en la superficie: esta incrustación sólo puede eliminarse con un descalcificador.

Pero se supone que estos dispositivos también eliminan los depósitos existentes y evitan el óxido o la corrosión. ¿Es esto posible, y si es así, cómo funciona?

6. Eliminación de los depósitos y protección contra la corrosión

Veamos en primer lugar algunos datos sobre la eliminación de los depósitos calcáreos: si observamos detenidamente la ecuación (1), veremos que la reacción química no sólo se produce de izquierda a derecha (segregación de la cal), sino también de derecha a izquierda (disolución de la cal). También en este caso el equilibrio cal-ácido carbónico juega un papel fundamental. Si existe un exceso de ácido carbónico, la cal se disuelve. Con cada molécula de cal disuelta y cristalizada en el agua se produce una molécula de ácido carbónico. Este último ataca y disuelve paulatinamente los depósitos en las paredes de las tuberías, eliminando así la cal. Dependiendo del grado de incrustaciones en la tubería (dureza del agua, vida útil), este proceso puede tomar entre medio año y dos años. Durante este tiempo, vuelven a aparecer leves depósitos de cal fuera del agua. Cuando este proceso finaliza, dejan de producirse calcificaciones. La cal se elimina, pero la capa protectora de carbonato se mantiene.

Por supuesto, el cristal de cal en el agua también está expuesto a esta influencia. Pero este último ha podido desarrollarse en un estado casi ingrátido y, por tanto, se forma una estructura cristalina que muestra sólo unos pocos defectos, tales como espacios vacíos, átomos intersticiales, átomos y moléculas de sustitución, y fallos de desplazamiento y de apilamiento. Así, este cristal ofrece menos blancos que la incrustación que presenta estos errores y, por lo tanto, también una mayor superficie y con ello una mayor energía interna. Por eso esta incrustación es más atacada, a menudo con una disolución selectiva, lo que lleva a la erupción de partículas de cal más gruesas que pueden acumularse en los aireadores.

Ahora bien, la ecuación (1) representa un estado estacionario de equilibrio, pero en la naturaleza no existen los equilibrios fijos, sino los equilibrios fluidos. Así por ejemplo, en el punto de derretimiento del agua, el hielo y el agua existen al mismo tiempo y por lo tanto están equilibrados. Esto significa que estadísticamente en una unidad de tiempo, la misma

El tratamiento físico del agua: funcionamiento

Hartmut Jünke

cantidad de moléculas de agua pasa del estado líquido al sólido al derretirse las moléculas de agua del hielo.

El equilibrio es fluido. Si no hay intervención del exterior, la separación de la cal, así como la disolución de la cal descrita en la ecuación (1), también está sujeta a este proceso estático. Los procesos de la sección tratada no atraparán todas las moléculas presentes. Aunque sea en menor cantidad, seguirá habiendo cal disuelta en la tubería, la que también puede separarse y volver a disolverse posteriormente. Pero como el tratamiento físico del agua interviene a favor de la disolución de la cal y la eliminación de los depósitos, no se vuelven a formar incrustaciones de cal. Estadísticamente es posible que durante estos procesos las superficies que aún no están cubiertas de cristales de carbonato metálico (véanse las Figs. 9 y 10) formen ahora dichos cristales, engrosando la capa de protección contra la corrosión.

El mecanismo descrito de formación de una capa protectora no es el único efecto que evita la corrosión. Puesto que ya existe una capa protectora, no debería producirse corrosión, pero como lo muestra la experiencia, esta sí se produce tanto en las tuberías de hierro galvanizado como en las de cobre. ¿Por qué razón?

En la tecnología existe un proceso de corrosión denominado “elemento de ventilación”, que se describe en la Figura 12. El hierro es un conductor eléctrico y el agua es un electrolito. Cuando una gota de agua se encuentra sobre el hierro, se forma un elemento electrolítico al que solo le falta la tensión eléctrica. En el borde de la gota de agua el contacto del oxígeno hacia la superficie del metal es más fuerte y el centro de la gota está menos ventilado. De este modo, se desarrolla una diferencia de potencial entre estas dos zonas: el borde de la gota de agua se convierte en un cátodo (excedente de electrones) y el centro de la gota, en un ánodo (escasez de electrones). Como electrolito, el agua ahora hace posible la creación de un circuito eléctrico cerrado entre el ánodo y el cátodo. En el ánodo, los iones con carga positiva del metal predominante se disuelven, reaccionan con el agua y se depositan en forma de óxido, mientras que los electrones se abren paso a través del metal hasta el cátodo.

En principio, este proceso es idéntico en el caso del cobre

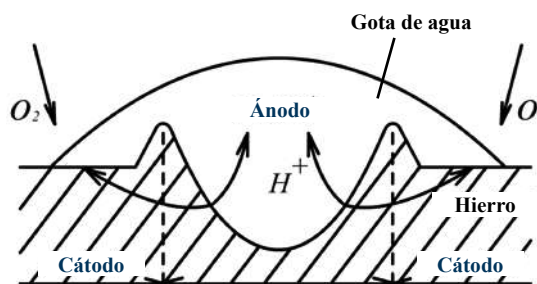


Fig. 12: Elemento de ventilación

En principio, este proceso es el mismo que ocurre en nuestras tuberías, salvo que otras causas determinan el diferente acceso del oxígeno a las superficies metálicas. La Figura 12a esquematiza esta situación. Mientras el agua no sea tratada físicamente, la cal se depositará, tal como se ha descrito anteriormente. En consecuencia, entre las zonas con fuertes depósitos de cal y las zonas sin cal, el contacto más o menos fuerte del oxígeno en el agua afecta a las superficies con una concentración diferente. De este modo, se provoca el mismo proceso que en el elemento de ventilación.

Como es sabido, la mayoría de las veces la corrosión se produce en los codos, derivaciones y piezas en T de las tuberías, las cuales presentan depósitos gruesos. Si estos depósitos se eliminan dejando sólo la capa protectora, el contacto de oxígeno es el mismo en todas partes y ya no se puede desarrollar un potencial eléctrico. Este proceso es especialmente importante para las tuberías de cobre, ya que con un alto contenido de oxígeno y un pH inferior a 6,5, el cobre está particularmente expuesto a la corrosión por picaduras. En estos casos es especialmente importante que exista una capa protectora gruesa, también debido a la impureza del cobre (productos de mala calidad) que favorece las acumulaciones. Así, cada vez entra más cobre en el agua, lo que es desfavorable para la salud. Según las recomendaciones del Ministerio de Salud de Alemania, en estos casos los bebés no deben beber agua del grifo. Los productores de agua llaman al cobre “el plomo del siglo XX”.

El tratamiento físico del agua: funcionamiento

Hartmut Jünke

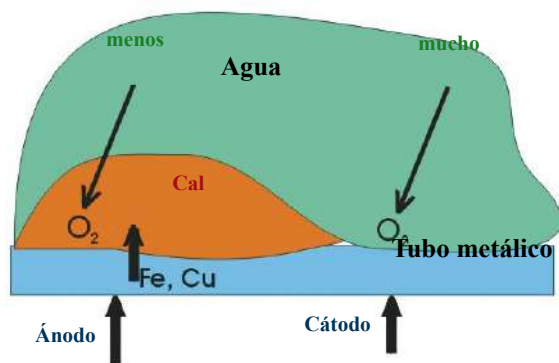


Fig. 12a: Corrosión por depósitos de cal de diferente grosor

7. Observaciones finales

Los elementos empíricos analizados muestran que la eficacia del tratamiento físico del agua no solamente ha sido probada por los usuarios, sino que también existen pruebas teóricas y prácticas desde el punto de vista físico y químico. Sin embargo, una condición previa para su eficacia es que el dispositivo ofrecido cumpla aproximadamente con los parámetros descritos. Generalmente, el esfuerzo electrónico y tecnológico que ello involucra es bastante elevado, por lo que la mayoría de las veces los dispositivos baratos no pueden cumplir con las exigencias.

El modo de funcionamiento de este tipo de dispositivos muestra que los procedimientos de prueba habituales, especialmente los de corta duración, que se utilizan para comprobar la eficacia de los mecanismos de “descalcificación”, fallan y ofrecen resultados falsos. Es necesario desarrollar nuevos métodos de prueba que permitan confirmar cuantitativamente las relaciones teóricas aquí presentadas.

Quisiera agradecer al Prof. Dr. H. Ungenandt, de Mageburg, por su apoyo en la interpretación de los procesos eléctricos; al Sr. K. Matthies, ingeniero diplomado, de Berlín, por su asistencia técnica en las mediciones; al Prof. Dr. W. Morgner, de Eichenbarleben, por las discusiones críticas del presente trabajo y a la empresa de ingeniería para el tratamiento físico del agua Helmut Siegmund, de Königs-Wusterhausen, por la puesta a disposición del dispositivo.

1. Para obtener mayor información sobre este dispositivo, dirigirse al fabricante:

Christiani Wassertechnik GmbH
Köpenicker Str. 154
10997 Berlín
Alemania

Créditos de las imágenes:

- Figs. 1 y 2: W. Kleber, Introducción a la Cristalografía, Verlag Technik Berlin, 1956.
- Fig. 4: Folleto informativo de Christiani Wassertechnik GmbH.
- Figs. 9 y 11: Folleto informativo de Christiani Wassertechnik GmbH.
- Fig. 10: Folleto informativo de la fábrica de motocicletas BMW, Berlín.
- Fig. 12: W. Schatt (editor), Introducción a la ciencia de los materiales, VEB Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1981.

* Los corales se desarrollan según este mismo principio físico. En la zona de los pies poseen células vegetales que contienen clorofila, la que gracias a la luz solar, produce materia orgánica (carbohidratos) a partir del agua y del CO₂. En este caso el equilibrio cal-ácido carbónico también se altera (reducción del CO₂), lo que lleva a una secreción de cal que forma los corales. Esta es la razón por la que los corales sólo existen en aguas poco profundas bañadas por el sol, ya que solo allí hay suficiente energía solar para que se realice la fotosíntesis.