

Physikalische Wasserbehandlung – so funktioniert sie!

Dr.-Ing. Hartmut Jünke

1. Einleitung

Seit etwa zwei Jahrzehnten ist die physikalische Wasserbehandlung in der praktischen Anwendung und im Gespräch. Seit dieser Zeit beweist sie ihr Funktionieren und wird doch in ihrer Wirkung bestritten. Woran liegt das? Verfolgt man die Diskussion, so lassen sich mehrere Ursachen dafür ausmachen, die jedoch hier nicht diskutiert werden sollen. Vielmehr erscheint es notwendig, die physikalischen Grundlagen zu untersuchen, die die Wirkungsweise dieser Verfahren erklären können und so diese Verfahren vom Vorwurf der Scharlatanerie zu befreien und die schwarzen Schafe zu erkennen, die zu diesem Vorwurf geführt haben.

Dieser Versuch wird hier unternommen.

Abgesehen von meiner eigenen positiven Erfahrung, die eindeutig die Wirkung beweist, zumindest des Gerätes¹⁾, welches in meiner Installation tätig ist, gibt es eine Reihe von Informationen, welche das ebenfalls tun und die von renommierten Institutionen stammen, u.a. vom physiologischen Institut der Ludwig-Maximilians-Universität München. Hier konnte der vorher erforderliche Austausch von Laserröhren wegen Verkalkung durch das Kühlwasser nach Einbau einer physikalischen Wasserbehandlung vermieden werden. Hotels und Wohnungsbaugesellschaften sowie eine Vielzahl von Gesprächen mit privaten Anwendern bestätigen die Wirkungsweise, wenn auch häufig das Nichtfunktionieren beklagt wird. Da in den meisten Fällen die privaten Anwender in der Diskussion den Hersteller des Gerätes nicht nennen konnten, (es gab häufig den Hinweis: billig, aus dem Baumarkt), kann daraus nur der Schluss gezogen werden, dass es Geräte gibt, die die physikalischen Bedingungen für das Erreichen der Wirksamkeit nicht erfüllen, daraus kann aber nicht der Schluss gezogen werden, es wäre grundsätzlich dieses Prinzip ungeeignet, das angebotene Ziel zu erreichen. Leider wird oft auch in seriösen Veröffentlichungen dieser Eindruck erweckt, häufig ohne einen wissenschaftlichen Beweis, oder ohne einen Beweis, der sich an der Wirkungsweise orientiert und ihr gerecht wird.

Bevor in einem Plausibilitätsbeweis die Wirkungsweise der physikalischen Wasserbehandlung erläutert wird, muß zunächst geklärt werden, warum Wasserleitungen verkalken.

Betrachten wir daher den Kalk als Zielobjekt der physikalischen Wasserbehandlung.

2. Kalk

Kalk ist chemisch gesehen Calciumkarbonat CaCO_3 . Diese Verbindung ist wasserunlöslich. Frage:

Wie kann sie dann im Wasser gelöst sein?

Antwort: Beim Durchströmen kalkhaltiger Böden wird von kohlendioxidhaltigem Wasser Kalk gelöst und befindet sich als Calciumhydrogenkarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ im Wasser. Dieses Lösen ist möglich, weil Kohlendioxid CO_2 zusammen mit Wasser H_2O Kohlensäure H_2CO_3 bildet. Wie jeder auch aus der häuslichen Praxis weiß, benötigt man säurehaltige Mittel um Kalk zu lösen und durch Wasser zu entfernen. Es scheint Haarspalterei zu sein, wenn hier der Unterschied zwischen gelöstem und nicht gelöstem Kalk betont wird, aber gerade darin liegt der Mangel in der Argumentation für die Wirkungsweise der Geräte.

Damit ergibt sich die Frage, warum scheidet sich Kalk überhaupt ab? Die gelöste Menge Calciumhydrogenkarbonat im Trinkwasser erreicht niemals die Sättigungsgrenze, bei deren Überschreitung sich ein gelöster Stoff als Kristall abscheidet.

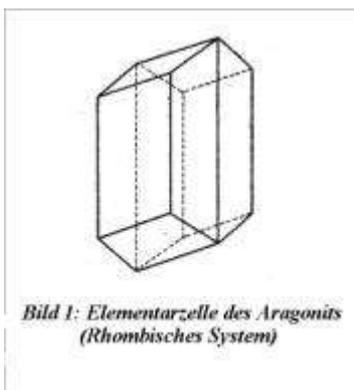
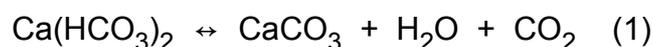
Betrachtet man die Orte in der Wasserleitung, an denen sich der Kalk ablagert, so ergibt sich die Antwort von selbst. Primäre Abscheidungsorte sind die Bögen, die Abzweigungen und die Endstellen (Wasserhähne), sowie in besonderem Maße die Warmwasserbereiche. Aber auch im letzteren Fall muß man differenzieren. Warmwasserbehälter sind im Allgemeinen von Ablagerungen frei. Betroffen sind immer Heizstäbe, Heizspiralen oder Wärmetauscher, also Oberflächen, die Wärme an das Wasser abgeben.

Warum gerade an diesen Stellen? Die Antwort ist recht einfach: Es muß ein Energiegradient vorhanden sein, der dazu führt, dass die Wasserkäfige (s.u.) um die gelösten Ionen aufbrechen und diese so die Möglichkeit bekommen, miteinander zu reagieren. Gleichzeitig muß das sog. Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht gestört sein, d.h. es muß ein CO_2 -Mangel lokal entstehen. Die Bestandteile suchen sich dann einen Kristallisationspunkt (Keim), an dem der Kristallaufbau beginnen kann. Solche Orte sind immer an der Rohrwandung gegeben, sie bildet die feste Unterlage, auf der die Kristalle aufwachsen können. Daran lagern sich dann weitere Bestandteile an, die Kalkablagerungen wachsen, Verkrustungen entstehen, die man auch als Kesselstein bezeichnet. Sie bestehen aus Calciumkarbonat im Gemisch mit Magnesiumverbindungen, Gips, Silikaten und Eisenverbindungen (daher die gelbbraunliche Farbe). Diese Ablagerungen begünstigen die Korrosion (s.u.) und verschlechtern den Wärmeübergang von Heizstäben und in Wärmetauschern.

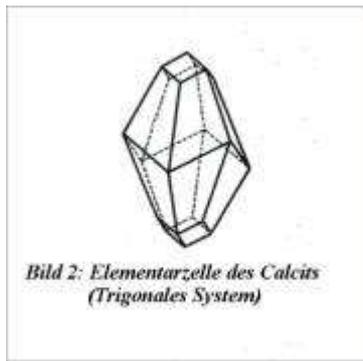
Wie ist es möglich, dass örtlich Energieunterschiede im Wasser auftreten können? Im Fall des Heizstabes ist es einfach, Wärme wird an das Wasser abgegeben. An Bögen wird das Wasser beschleunigt, die Energie für diese Beschleunigung wird aus der inneren Energie des Wassers entnommen, Druck und Temperaturänderungen sind die Folge. Dasselbe gilt für Abzweigungen und Wasserendstellen. Hier entstehen Turbulenzen, deren Energiebedarf ebenfalls aus der inneren Energie des Wassers gedeckt wird mit den gleichen Folgen.

Schaut man in jahrelang betriebene Wasserleitungen hinein, so stellt man fest, dass Verkrustungen immer von Rohrbögen oder Abzweigungen ausgehen und dann in die geraden Bereiche hineinwachsen. Ist eine Leitung wasserundurchlässig geworden, so betrifft das im Allgemeinen nur diese Bereiche, während der überwiegende gerade Teil des Systems noch nahezu voll wasserleitungsfähig ist.

Was passiert chemisch bei der Kristallisation? Die Formel (1) erläutert den Ablauf.



Hierbei ist zunächst beachtenswert, dass die beschriebene Reaktion zur Kalkbildung auch in umgekehrter Richtung ablaufen kann, d.h. der Kalk kann sich wieder auflösen (s.o.). Welcher Vorgang abläuft, ist vom „Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht“ abhängig. Ist CO_2 im Überschuss da, wird Kalk gelöst, ansonsten Kalk abgeschieden. Diese Vorgänge sind zusätzlich von Druck- und Temperaturänderungen abhängig, also von physikalischen Parametern.



An dieser Stelle ist es angebracht, etwas über den Kalkkristall anzumerken.

Es ist bekannt, dass fast alle Substanzen, die man als fest bezeichnet, kristallin sind. Man unterscheidet im Strukturaufbau der Kristalle 7 Kristallsysteme und 32 Kristallklassen, die sich durch ihren Gitteraufbau unterscheiden. Kalk kann in zwei verschiedenen Strukturen kristallisieren, die chemisch völlig gleich sind. Die Gitterstrukturen sind unterschiedlich, aber verwandt. Danach wird der Gittertypus des Aragonits (Bild 1) oder des Calcits

(Bild 2) gebildet. Welche Modifikation entsteht, ist bei gleichem chemischem Bestand abhängig von den thermodynamischen Bedingungen (Druck, Temperatur). Wie die Bilder zeigen, überwiegt bei beiden Elementarzellen eine Achse in ihrer Länge. Das bedeutet, dass ein Kristall in dieser Richtung schneller wächst, als in den anderen. Die Wachstumsgeschwindigkeit ist anisotrop, d.h. richtungsabhängig. Damit nehmen ungestört wachsende Kristalle eine nadelförmige Gestalt an. Wäre die Wachstumsgeschwindigkeit in allen Achsenrichtungen gleich (isotrop), würden kugelförmige Kristalle entstehen. Im Gittertyp des Calcits kristallisieren auch Magnesiumkarbonat $MgCO_3$ und $FeCO_3$, weshalb sie auch problemlos in die Kesselsteinablagerungen eingebaut werden. Dem Gittertyp des Aragonits wiederum entsprechen Anhydrit (entwässerter Gips oder Gips selbst $[CaSO_4 \cdot 2H_2O]$). In ähnlichen Gittertypen kristallisieren auch Phosphate und Sulfate sowie Silikate von Calcium und Magnesium. Das begünstigt ihren Einbau in Ablagerungen. Vor allem im Warmwasserbereich - in dem sich diese Wasserbegleiter häufig erst lösen - dienen auch für sie vorhandene Kristallisationskeime ebenfalls als Ausgangspunkt einer Abscheidung im Wasser und nicht an den Wandungen oder Heizstäben.

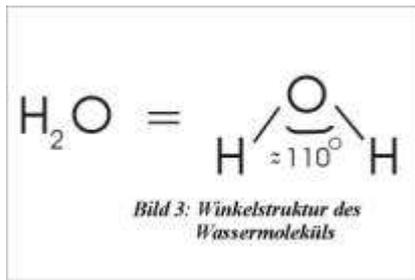
Was tun also Geräte, welche die versprochene Wirkung zeigen?

1. Sie wandeln Kalk nicht um. Wohin auch? Sie bewirken, dass Calciumhydrogenkarbonat $Ca(HCO_3)_2$ als Calciumkarbonat $CaCO_3$ ausfällt, welches im Wasser elektrisch und chemisch neutral ist. Das aber ist ein Festkörper, also kristallin; mit der besonderen Begleiterscheinung, dass der Kristall nicht an einem schon vorhandenen Festkörper, z.B. der Rohrwand als Kristallisationskeim, kristallisiert, sondern im fließenden Wasser entsteht. Ein solcher Kristall bildet sich nach Naturgesetzen mit für jeden Stoff typischen Parametern und er nimmt gesetzmäßig vorgegebene Formen an.
2. Daraus ergibt sich, dass diese Kristalle keine besonderen Eigenschaften haben, besondere Formen, die sich nicht mehr „verhakeln“ können und auf diese Weise eine Verkalkung verhindern. Hier wirkt der beschriebene Mechanismus.

3. Wasser

Zum Verständnis der weiteren Vorgänge soll etwas über das Wasser gesagt werden. Es ist weit mehr, als die Formel H_2O aussagt. Die beiden Wasserstoffatome bilden mit dem Sauerstoffatom an der Spitze ein gleichseitiges Dreieck und schließen einen Winkel von $\approx 110^\circ$ ein, wie in Bild 3 gezeigt ist.

Hier ist die Ursache für viele besondere Eigenschaften des Wassers zu suchen, die es gegenüber anderen, ähnlichen Molekülen auszeichnen. Zwei miteinander reagierende Gase bilden eine



Flüssigkeit und nicht wiederum ein Gas, wie das z.B. bei Kohlendioxid CO_2 (Feststoff + Gas!), einem viel schwereren Molekül, der Fall ist. Auf Grund dieser Winkelstellung bilden die Wassermoleküle Ketten und Cluster, die den flüssigen Zustand bedingen. Möglicherweise ist darin auch eine Erklärung zu suchen, dass Wasser ein „Gedächtnis“ haben könnte, in dem es bestimmte Strukturen in seinen Ketten und Clustern annimmt, die auch bei einer Wasserbewegung erhalten

bleiben. Diese Ketten und Cluster werden durch Van der Waals-sche Kräfte oder auch Dispersionskräfte und Wasserstoffbrücken zusammen gehalten. Die Bindung beruht auf der Anziehung von elektrischen Dipolen, die bei Molekülen mit polarisierten Bindungen oder mit gewinkelter Struktur auftreten.

An der Universität Stuttgart laufen Forschungen, die sich mit diesem Problem befassen und erste Ergebnisse zeigen, dass Wasser in seinem Verhalten durch elektrische und magnetische Felder beeinflusst wird. Solche Erscheinungen sind seit langem bekannt, aber noch nie wissenschaftlich untersucht worden.

Diese Molekülform führt zu einer weiteren Besonderheit. Wasser weist einen Dipolcharakter auf. Beide Elemente streben durch die Bindung für sich eine Edelgaskonfiguration in ihren äußeren Elektronenschalen an. Beim Wasserstoff sind das zwei, beim Sauerstoff acht Elektronen. Dem Sauerstoff fehlen zwei, jedem Wasserstoff fehlt ein Elektron. Im Molekül stehen die insgesamt zwei Bindungselektronen allen drei Atomen zur Verfügung, so dass Edelgaskonfiguration für alle Atome erfüllt werden kann. Bei allen homöopolaren Bindungen aus verschiedenartigen Atomen ist die Bindung polarisiert, d.h. das Bindungselektronenpaar ist in Richtung des Bindungspartners verschoben, der die größere Elektronenaffinität besitzt, hier das Sauerstoffatom. Bringt man das Wassermolekül in ein elektrisches Feld, so richtet es sich in der Weise aus, dass der Sauerstoff zur elektrisch positiven Seite zeigt und die Wasserstoffatome zur elektrisch negativen Seite weisen. Das Wassermolekül ist also auf der Sauerstoffseite etwas negativer geladen, auf der Wasserstoffseite etwas positiver. Diese Tatsache spielt, zusammen mit der Molekülform, für die Lösungsfähigkeit des Wassers eine große Rolle, ebenso für die physikalische Wasserbehandlung. Weitere Anomalien sollen nur kurz erwähnt werden: geht Wasser in den festen Zustand (Eis) über, nimmt seine Dichte ab. Setzt man das Eis unter Druck, verflüssigt es sich wieder. Flüssigkeiten gehen normalerweise unter Druck in den festen, kristallinen Zustand über. Diese wenigen Hinweise sollen genügen um darauf hinzuweisen, dass im Wasser vermutlich mehr verborgen ist, als unsere heutige Schulweisheit bisher entdeckt hat und sicherlich bisher unverständliche Wirkungen des sogenannten Plocher- oder Grander-Wassers beinhaltet. Wenn wir etwas vom Wasser nicht verstehen, sollten wir nicht voreilig dem Wasser die Schuld geben.

4. Physik und Chemie

Was spielt sich physikalisch-chemisch ab, wenn ein Gerät zur physikalischen Wasserbehandlung eingesetzt wird?

Da es verschiedene Anwendungsprinzipien gibt, angefangen von Magneten, die in die Wasserleitung eingefügt werden bis zur Injektion von Impfkristallen ins Wasser, um die sich Kalkpartikel ansetzen, soll hier nur ein häufig angebotenes Prinzip untersucht werden, was überwiegend zu kontroversen Diskussionen Anlass gibt.

Die Vorgänge werden an einem Gerät erläutert, dessen äußeres Erscheinungsbild sehr häufig



Bild 4: Grundsätzliche Anordnung zur physikalischen Wasserbehandlung

anzutreffen ist und dessen Wirkprinzip bezweifelt wird. Eine prinzipielle Darstellung ist in Bild 4 wiedergegeben, ein Gerät, dessen Funktions- und Wirkungsweise dieser Arbeit zugrunde liegt. Es ist eine Blackbox, aus der ein oder zwei Kabel herausgeführt werden, welche man um die Wasserleitung wickelt und über die Schwingungen ins Wasser eingekoppelt werden, welche den gelösten Kalk „umwandeln“ und unschädlich machen sollen.

Diese Formulierung wurde absichtlich gewählt, weil sie im Wesentlichen den Funktionsbeschreibungen angebotener Geräte entspricht und so bereits Zweifel an der Seriosität weckt. Was für Schwingungen werden eingekoppelt? In manchen Beschreibungen wird gar das Calcium umgewandelt, die Anbieter scheinen aus der Alchimistenzeit zu kommen. Das Rohrmaterial soll keine Rolle spielen und das Gerät bewirkt auch noch die Entfernung bereits vorhandener Verkrustungen. Wie kann das eine Schwingung erreichen? Wahrlich, wer meint, nur halbwegs etwas von Physik und Chemie zu verstehen, findet auf dieser Halbwegsbasis genug scheinbar wissenschaftliche Argumente, um ein Funktionieren zu bezweifeln.

Was tut ein Gerät, welches tatsächlich eine Verkalkung von Rohrleitungen verhindert?

Hier muß man zunächst fragen, was müsste es tun, um diese Forderung zu erfüllen? Die Antwort ist einfach: Es muß die Bedingungen schaffen, unter denen sich Calciumhydrogenkarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ **im Wasser als Kristall** und **nicht an den Rohrwandungen** als Calciumkarbonatkristall CaCO_3 abscheidet.

Im Folgenden werden die physikalischen und elektrischen Möglichkeiten untersucht, die ein funktionierendes System zur physikalischen Wasserbehandlung bieten muß.

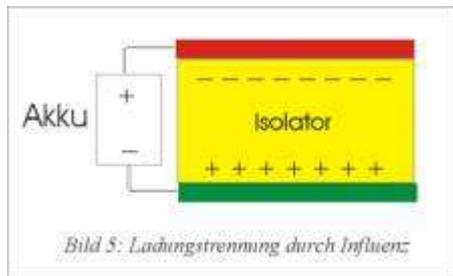
Einfach gesagt heißt das, es muß die Möglichkeiten schaffen, dass der gelöste Kalk nicht an den Wandungen oder Kontaktstellen von Rohrleitungen, Geräten und Armaturen, die das Wasser berührt, ankrustet. Das ist nur möglich, wenn der gelöste Kalk vor der Berührung mit diesen Bereichen in den Kristallzustand übergeht, also im Wasser selbst Kristalle bildet. Dazu ist es erforderlich, dass im Wasser zwei Bedingungen erfüllt werden:

1. Es müssen Kristallisationskeime vorhanden sein oder geschaffen werden,
2. Es muß das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht so verändert werden, dass gelöster Kalk in den festen Zustand übergeht.

Die Praxis hat gezeigt, dass das Einkoppeln von magnetischen oder elektrischen Feldern in das Wasser solche Effekte erreichen kann, wenn auch mit unterschiedlichem Erfolg. Hier soll nur die Wirkung von elektrischen Feldern betrachtet werden, daraus lassen sich aber die Bedingungen ableiten, unter denen auch Magnetfelder eine Wirkung erzielen können.

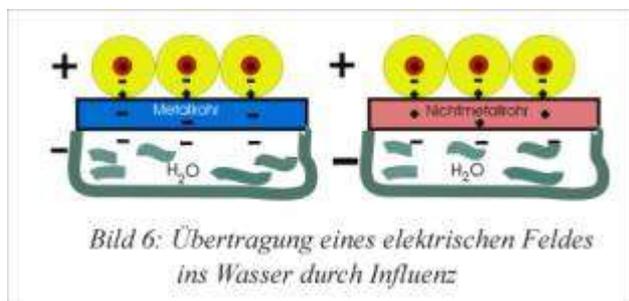
Betrachtet man das Bild 4, so erkennt man die beiden Wicklungen, mittels derer Impulse eingekoppelt werden. Viele Hersteller benennen diese Wicklungen als „Spulen“, weil sie so aussehen. Im elektrischen Sinne sind sie es aber gar nicht. Eine „induktive“ Einkopplung ist dadurch nicht möglich, und wäre es eine Induktivität, so würde das Gerät an Eisenrohren versagen, was es aber nicht tut. Diese Wicklung stellt einen Teil einer Kapazität dar, sie ist eine Kondensatorfläche, die zweite wird durch das Wasser gebildet. Diese Wicklung ist ein technologischer Kompromiss, eine um die Rohrleitung gelegte Metallfolie brächte bei gleicher

Länge eine etwas höhere Kapazität, müsste aber speziell angefertigt und für jeden Rohrdurchmesser gesondert angepasst werden. Normales Lautsprecherkabel gibt es dagegen vom Meter und passt sich bei der Montage dem Rohrdurchmesser problemlos an.



Wie kann mit einer solchen Anordnung ein elektrisches Feld im Wasser erzeugt werden, und das durch jedes Rohrmaterial hindurch? Hier entstehen die größten Zweifel. Bei dieser Anordnung kommt ein physikalischer Effekt zur Wirkung, der im elektrischen Alltag weit verbreitet, aber wenig bekannt ist: die Influenz. Im Bild 5 wird anhand einer Kondensatoranordnung der grundsätzliche Vorgang gezeigt. Bei Anlegen einer Spannung an die beiden

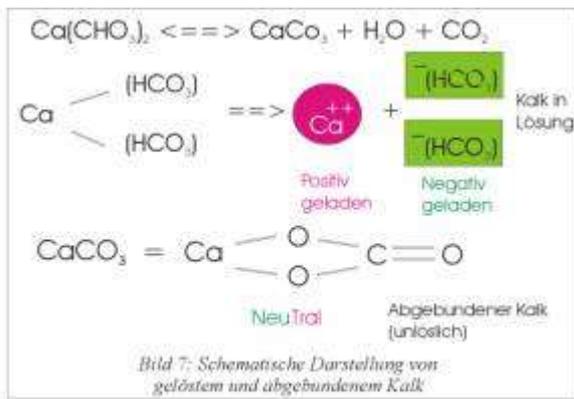
Kondensatorplatten wird im Dielektrikum (Isolator) eine Ladungsverschiebung erzeugt, die entgegengesetzt der Ladung der Platten ist. Beim Entladen der Platten verschwindet auch die Polarisation des Isolators, da in ihm keine Elektronen wandern können, sondern nur gebundene Elektronen eine Verschiebung erleiden. Bringt man dagegen z.B. zwei aufeinanderliegende Bleche (elektrischer Leiter) in das elektrische Feld zwischen den Kondensatorplatten, so tritt eine Ladungstrennung derart auf, dass die eine Blechoberfläche eine negative (der positiven Kondensatorplatte gegenüberliegend), die andere eine gleich große positive Aufladung erhält. Diese Erscheinung nennt man Influenz. Trennt man die beiden Bleche im elektrischen Feld, so weist das eine Blech eine negative Ladung (Elektronenüberschuss), das andere eine positive Ladung (Elektronenmangel) auf. Ein Kondensator ist für Gleichspannung undurchlässig, für Wechselspannung dagegen nicht. Von dieser Tatsache macht man bei der Einkopplung elektrischer Wechselfelder in die Rohrleitung Gebrauch. Im Bild 6 ist dieser Vorgang für einen Augenblickszustand schematisch wiedergegeben. Man erkennt, dass das Rohrmaterial keinen Einfluß auf die Kondensatorwirkung der Anordnung hat.



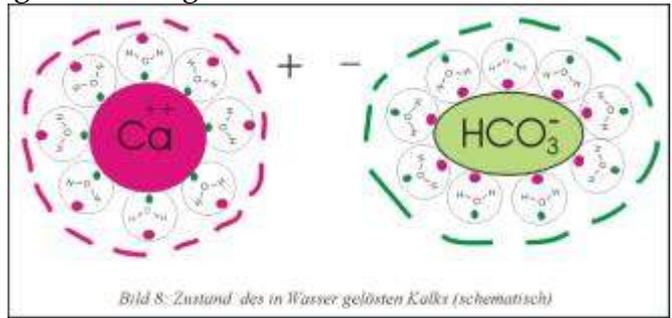
Wird der Wicklungsdraht durch Anlegen eines Pols einer Spannungsquelle aufgeladen, so wird im Wasserleitungsrohr durch Influenz eine gleich große elektrische Ladung von jeweils entgegengesetztem Vorzeichen gebunden (durch Nachfließen von der Erde her). Handelt es sich um ein zeitlich periodisches Umladen bzw. Auf- und Entladen, so entsteht - wie in einem von Wechselstrom (scheinbar)

durchflossenen Kondensator – zwischen isolierter Drahtwicklung und Rohrwandung ein sogenannter Verschiebungsstrom (was sich über die Maxwell'schen Gleichungen berechnen lässt) als Fortsetzung eines wechselnden (+-+-+...) oder pulsierenden (0+0+0+... bzw. 0-0-0-...) Leitungsstroms, der sich zwischen dem Rohr (einschließlich Wasser) und Erde ausbildet. Verbunden damit ist zum einen ein in Rohrlängsrichtung orientiertes, wechselndes bzw. pulsierendes elektrisches Feld, zum anderen ein zentrisch um das Rohr herumführendes magnetisches Wirbelfeld. Messungen zeigten, dass sich zwischen Wicklung und Wasser eine effektive Spannung von ≈ 1 Volt aufbaut und ein Verschiebungsstrom von $\leq 5\mu\text{A}$ fließt.

An dieser Stelle muß noch einmal etwas ausführlicher auf den im Wasser gelösten Kalk eingegangen werden. Im Bild 7 sind die Zusammenhänge dargestellt. Der gelöste Kalk – Calciumhydrogencarbonat – dissoziiert in ein doppelt positiv geladenes Calcium-Ion und zwei negativ geladene Hydrogencarbonat – Ionen. Diese Ionen werden von einem Wasserkäfig umgeben. Dabei lagern sich Wassermoleküle um das Calcium in der Weise, dass der Sauerstoff zum Calcium weist und der Wasserstoff nach außen. Elektrostatische Kräfte halten diesen Cluster zusammen. In gleicher Weise werden die Carbonatreste umgeben, jedoch so, dass nun die Sauerstoffatome der Wassermoleküle nach außen gerichtet sind. Diese Cluster weisen insgesamt eine positive bzw.



negative Ladung auf. Eine schematische



Darstellung ist im Bild 8 gegeben, zu beachten ist, dass man sich diese Cluster als winzige Kugeln

vorstellen muß. Sie haben einen Durchmesser von 1 bis 2 Nanometern (nm), unter der Annahme, dass daran 100 bis 200 Wassermoleküle beteiligt sind. Berechnet man die Masse dieser Cluster, so ergibt sich, sowohl für den Ca-Cluster wie für den Bikarbonatrest eine Masse von 30×10^{-22} g bis 60×10^{-22} g. Diese Werte sind für das Verhalten bei der Wasserbehandlung von Interesse.

Kommen wir auf das eingekoppelte elektrische Wechselfeld zurück. Das periodisch wechselnde Feld im Rohrrinnern beeinflusst die im Leitungswasser befindlichen, in Wasserkäfige eingehüllten Ionen oder Dipolmoleküle in der Weise, dass diese im Takt des Wechselfeldes kurzstreckige Hin- und Herbewegungen in Rohrrichtung ausführen. Die elektrische Schwingung hat zu einer Materieschwingung geführt, die sich axial ausbreitet. Physikalisch gesehen ist das eine mechanische (akustische) Longitudinal- oder Druckwelle. Hier wechseln Bereiche mit Über- und Unterdruck einander ab. In atomaren und molekularen Bereichen bewirkt das lokal ein Ausdunsten des CO_2 .

Bei geeigneter Schwingungsfrequenz zerfallen die Wasserkäfige, was lokal ebenfalls zu einer Senkung der CO_2 -Konzentration führt. Damit ist örtlich das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht gestört, gleichzeitig können sich die gelösten Kalk-Ionen, vom Wasserkäfig befreit, begegnen und miteinander reagieren: ein Kalkmolekül ist entstanden, welches als Kristallisationskeim dient*). An diesen lagern sich andere Moleküle an und bilden im Wasser einen Kalkkristall. Dieser Kalkkristall ist elektrisch neutral und im Leitungswasser nicht mehr reaktionsfähig. Er lagert sich daher nicht mehr in vorhandene Ablagerungen an den Rohrwänden ein.

Um diese Vorgänge auszulösen, muß das elektrische Wechselfeld Frequenzen beinhalten, die möglichst zu Resonanzschwingungen der Wasserkäfige führen. Da praktisch alle Leitungswässer, die der Trinkwasserverordnung entsprechen, unterschiedlich sind hinsichtlich der Quantität der gelösten Mineralien, des pH-Wertes und der Leitfähigkeit, wird auch die Ausbildung des elektrischen Wechselfeldes dadurch beeinflusst. Hinzu kommt die wechselnde Strömungsgeschwindigkeit. Geräte, die nur mit einer Frequenz arbeiten, werden zufällig auch einmal erfolgreich den beschriebenen Zyklus auslösen, meistens aber erfolglos bleiben.

Für das hier betrachtete Gerät sind einige technische Daten bekannt, zugleich die aus der Erfahrung bestätigte Wirkung. Es ist also sinnvoll, mit diesen Daten theoretisch und praktisch (soweit möglich) die Wirkungsmöglichkeit abzuschätzen.

Das Gerät ist mit zwei Wicklungen versehen. Jede Wicklung erhält Impulse mit einer Taktfrequenz von 10 Hz, Impulsdauer 50 ms, 50 ms Pause. In die Pausenzeiten der jeweiligen Wicklung fällt der Impuls der anderen Wicklung. Jeder Impuls beinhaltet einen Frequenzgang von ca. 3 bis 15 kHz, verteilt auf 50 ms. Da keine geeignete Messtechnik zur Verfügung stand, konnte der Frequenzgang nicht gemessen werden. Rechnet man je kHz 10 Schwingungen, so ist überschlägig die Impulsdauer erreicht. Es sei ausdrücklich noch einmal darauf hingewiesen, dass hier nur der

Versuch gemacht wird, modellhaft die Wirkmöglichkeit zu erklären. Die Komplexität der angeregten Schwingungen, einschließlich der Überlagerung verschiedener Wellenformen (Obertöne) kann hier nicht berücksichtigt werden.

Das Gerät soll 5000 Liter Wasser pro Stunde sicher behandeln. Bei einem Halbzollrohr bedeutet das den Durchfluß einer Wassersäule von 11,3 mm/ms, bei einem Einzellrohr wären es 2,8 mm/ms, bei einem Zweizollrohr 0,7 mm/ms. Geht man von einer Wirklänge des elektrischen Wechselfeldes von ≈ 500 mm aus (der Hersteller gibt ≈ 1000 mm an), so wird diese Strecke während eines Impulses gerade durchlaufen. Jeder Ionenwasserkäfig hat Zeit genug, zu zerfallen.

Wie sieht es mit der Reaktionsgeschwindigkeit der chemischen Komponenten aus? Im Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie in Berlin hat man mit einer speziellen Laseranordnung die Molekülbildungsgeschwindigkeit an Wassermolekülen untersucht. Es ergab sich eine Zeit zwischen 10 und 20 Femtosekunden ($1 \text{ fs} = 10^{-15}$ Sekunden). Diese Zeit ist so unvorstellbar klein, wie das Universum unvorstellbar groß ist. Eine annähernde Vorstellung von der Winzigkeit dieser Zeit erhält man durch die Entfernung, die das Licht in 1 fs zurücklegt: $\approx 0,3 \mu\text{m}$. In der Zeit, in der Licht 6 mm zurücklegt, kann eine Molekülbildung 1000mal erfolgen. Es ist also sehr wahrscheinlich, dass Molekülbildung und Kristallisationskeimbildung in der Behandlungsstrecke stattfinden.

5. Schutzschichten und Verkrustungen

Die Entstehung von Verkrustungen soll hier nur kurz an den Vorgängen in Rohrbögen angedeutet werden. In Rohrbögen erfährt das fließende Wasser eine Beschleunigung. Das am Außenradius fließende Wasser bewegt sich schneller, als das am Innenradius. Nach der vereinfachten Bernoullischen Gleichung (2) ist die Summe aus statischem und dynamischem Druck konstant:

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

Im schneller fließenden Wasser steigt der dynamische Druck, der statische fällt. Damit gas CO_2 am Innenradius in Richtung Außenradius aus, das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht ist gestört. Kalk scheidet sich ab, der einen Kristallisationspunkt sucht und ihn an der Wandung des Innenradius findet. Dort wächst nach und nach epitaktisch eine Kalkschicht auf, in die auch andere gelöste Mineralien aufgenommen werden. An dieser unregelmäßigen Oberfläche entstehen Turbulenzen, ebenso an Rohrabzweigungen, was wiederum mit Druckschwankungen verbunden ist, so dass auch dort Kalkablagerungen entstehen. Da in Wasserhähnen und Duschköpfen das Wasser verdunstet, also auch das CO_2 , wächst auch hier eine feste Kalkablagerung auf. An beheizten Flächen wird das CO_2 ebenfalls aus der näheren Umgebung entfernt, so dass diese Flächen bevorzugte Kristallisationspunkte für den Kalk darstellen.

Kalk im Trinkwasser ist aus zwei Gründen wichtig und deshalb mit einer Mindestmenge, die einer Wasserhärte von $8,4 \text{ }^\circ\text{d}$ entspricht, durch die Trinkwasserverordnung vorgeschrieben. Erstens liefert das Trinkwasser einen großen Teil des vom Körper benötigten Calciums, zweitens reagiert der Bikarbonatrest des gelösten Kalks mit dem Metall der Rohrleitung und bildet so eine Metallkarbonatschutzschicht. Diese ist besonders wichtig bei Kupferrohren (s.u.). Einen Ausschnitt aus einer solchen Schutzschicht zeigt das Bild 9. Man erkennt, wie die Kristalle aus der Metalloberfläche herauswachsen. Derartige Kristallbündel bedecken die Metalloberfläche und verhindern einen Korrosionsangriff.



Bild 10: Kristallbildung in einer Phosphatschutzschicht



Bild 11: Kalkstaubablagerung



Bild 9: Kalkschutzschicht

Noch besser ist das im Bild 10 zu sehen. Es ist eine

elektronenmikroskopische Aufnahme einer künstlich erzeugten Phosphatschutzschicht zum Korrosionsschutz. Phosphate

kristallisieren in einem ähnlichen Kristallsystem wie Karbonate. Diese erwünschte Eigenschaft des Kalks wird im Laufe der Zeit zum Nachteil, indem auf diese Schutzschicht weitere Kalkablagerungen aufwachsen, da diese Schutzschichten ideale Kristallisationspunkte liefern, langsam setzt sich ein Rohr zu, beginnend an Rohrkrümmungen und Abzweigungen. Wie o.a. wächst die Verkrustung von dort in lineare Rohrbereiche hinein. Der Vorgang läuft so lange ab, wie sich gelöster Kalk im Wasser befindet. Allerdings wird der größte Teil des mit dem Wasser beförderten Kalks aus der Leitung transportiert, ohne dass er sich festsetzt. Bei einem Wasserverbrauch von 100 m^3 pro Jahr werden bei einer Wasserhärte von $28 \text{ }^\circ\text{d}$ immerhin ca. 45 kg Kalk durch die Rohre geleitet. Hat man auf die oben beschriebene Weise den Kalk zur Kristallisation im Wasser gebracht, so wird er als submikroskopisch feiner Kristall mit dem Wasserstrom aus der Leitung ausgeschwemmt, eine Ankrystallisation an der Rohrwand ist nicht mehr möglich. Die Kalkkristalle lagern sich regellos ab, wie in Bild 11 gezeigt. Dieser Zustand bleibt auch im warmen Wasser erhalten. Anwendungen haben gezeigt, dass sich an die mit den Kalkkristallen gegebenen Keime weitere gelöste Mineralien anlagern und z.B. in Elektroboilern als Staub zu Boden sinken, ohne auf Heizstäben aufzuwachsen. So konnten aus einem 150-Liter-Elektroboiler nach einjährigem Betrieb über 2 kg Kalkstaubablagerungen entfernt werden, die Heizstäbe waren völlig kalkfrei. Wie Anwender berichten, werden auch Wärmetauscher für die Warmwasserversorgung bei Fernheizung auf der Sekundärseite kalkfrei gehalten. In vier Jahren seit Einbau eines Geräts der hier betrachteten Art war keine Reinigung mehr erforderlich. Der Kalk ist im Sinne der Schädlichkeit unschädlich gemacht, er ist aber nicht entfernt und steht physiologisch weiterhin zur Verfügung. Damit verbunden ist auch, dass Wassertropfen, welche auf Oberflächen eintrocknen, Kalkstaub hinterlassen. Dieser ist mit einem feuchten Tuch zu entfernen. Läßt man ihn jedoch unter dem Einfluß von Feuchtigkeit längere Zeit lagern, so kann er sich unter der Einwirkung des CO_2 in der Luft örtlich auflösen und bei erneutem Trocknen auf der Unterlage ankrystallisieren: Diese Verkalkung ist dann nur mit einem Kalkreiniger zu entfernen.

Nun sollen diese Geräte aber auch vorhandene Ablagerungen entfernen und Rost, genauer gesagt Korrosion verhindern. Ist so etwas möglich, und wenn, dann wie?

6. Entfernung von Ablagerungen und Korrosionsschutz

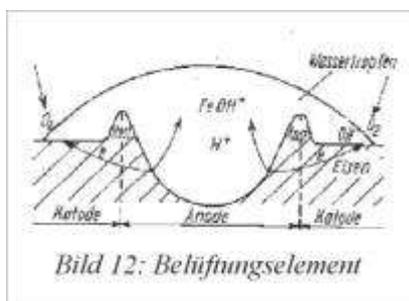
Zunächst zur Entfernung der Kalkablagerungen. Betrachtet man die Gleichung (1) genauer, so sieht man, dass die chemische Reaktion nicht nur von links nach rechts (Kalkabscheidung), sondern auch nach links (Kalkauflösung) ablaufen kann. Entscheidend ist hier wieder das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht. Ist Kohlensäure im Überschuß da, wird Kalk aufgelöst. Nun wird mit jedem abgeschiedenen, im Wasser kristallisierten Kalkmolekül, ein Molekül Kohlensäure gebildet. Diese Kohlensäure greift nach und nach den an den Wandungen abgelagerten Kalk an, löst ihn auf und entfernt ihn so. Je nach Verkalkungsgrad der Leitung (Wasserhärte, Betriebszeit) dauert dieser

Vorgang ein halbes Jahr bis zu zwei Jahre. In dieser Zeit ist eine leichte Verkalkung von Oberflächen außerhalb des Wassers wieder vorhanden. Ist der Vorgang abgeschlossen, tritt eine weitere Verkalkung nicht mehr auf. Dieser Kalkabtrag findet statt bis auf die Karbonatschutzschicht, welche erhalten bleibt.

Natürlich ist auch der im Wasser schwebende Kalkkristall diesem Einfluß ausgesetzt. Der im Wasser entstandene Kristall konnte sich aber im quasi-schwerelosen Zustand bilden, es entsteht dadurch eine Kristallstruktur, die nur sehr wenige Gitterfehlstellen wie Leerstellen, Zwischengitteratome, Substitutionsatome und -moleküle, Versetzungen und Stapelfehler aufweist. Er bietet daher erheblich weniger Angriffspunkte, als die mit diesen Fehlern behaftete, dadurch auch eine größere Oberfläche und damit höhere innere Energie besitzende Verkrustung. Diese wird deshalb bevorzugt angegriffen, häufig mit selektiver Auflösung, was zum Herausbrechen größerer Kalkpartikel führt, die sich in Perlatorensieben ansammeln können.

Nun stellt die Gleichung (1) einen stationären Zustand dar, der im Gleichgewicht ist. In der Natur gibt es aber keine festen Gleichgewichtszustände, sondern nur Fließgleichgewichte. Am Schmelzpunkt des Wasser z.B. sind Eis und Wasser gleichzeitig existent, also im Gleichgewicht. Das bedeutet, dass in der Zeiteinheit statistisch gesehen gleich viel Wassermoleküle aus dem flüssigen Zustand in den festen übergehen, wie Wassermoleküle aus dem Eis abschmelzen. Das Gleichgewicht wird fließend erhalten. Auch die in der Gleichung (1) beschriebene Kalkabscheidung wie Kalkauflösung unterliegt, wenn nicht von außen eingegriffen wird, diesem statistischen Vorgang. Die Vorgänge in der Behandlungstrecke werden nicht alle dort vorhandenen Moleküle erfassen, gelöster Kalk wird, wenn auch in sehr verringerter Menge, sich in der Leitung befinden und abscheiden können, aber auch wieder gelöst werden. Da mit der physikalischen Wasserbehandlung jedoch zu Gunsten der Abscheidung des Kalks im Wasser und zur Auflösung der Ablagerungen in den Gesamtvorgang eingegriffen wird, findet eine erneute Verkrustung nicht statt. Im statistischen Ablauf dieser Vorgänge ist es dabei möglich, dass Oberflächenbereiche, die noch nicht mit Metallkarbonatkristallen besetzt sind (s. Bilder 9 u. 10), nun solche bilden und somit die Schutzschicht verdichten und korrosionsverhindernd wirken.

Der beschriebene Mechanismus zur Schutzschicht ist nicht die einzige korrosionsverhindernde Wirkung. Da schon eine Schutzschicht da ist, dürfte eigentlich keine Korrosion mehr auftreten, sie ist aber erfahrungsgemäß vorhanden, sowohl in verzinkten Eisenrohren wie auch in Kupferrohren. Woran liegt das?

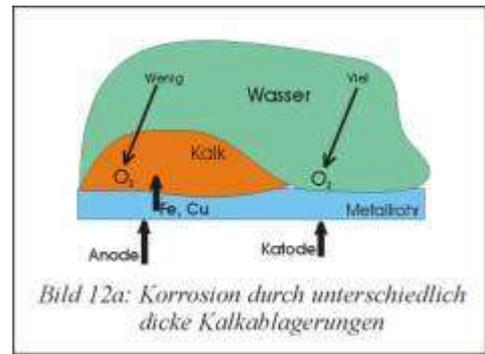


In der Technik ist ein Korrosionsvorgang bekannt, den man Belüftungselement nennt. Im Bild 12 ist dieser Vorgang erklärt. Eisen ist ein elektrischer Leiter, Wasser ist ein Elektrolyt. Liegt ein Wassertropfen auf dem Eisen, so ist ein elektrolytisches Element entstanden, dem nur noch die antreibende elektrische Spannung fehlt. Am Tropfenrand ist der Sauerstoffzutritt zur Metalloberfläche stärker, die Tropfenmitte ist schlechter belüftet. Dadurch entsteht zwischen diesen Bereichen ein Potentialunterschied, bei dem der Tropfenrand zur

Katode wird (Elektronenüberschuß), die Tropfenmitte zur Anode (Elektronenmangel). Das Wasser als Elektrolyt ermöglicht nun den geschlossenen Stromkreis zwischen Anode und Katode. An der Anode gehen positiv geladene Ionen des jeweiligen Metalls in Lösung, reagieren mit dem Wasser und lagern sich als Rost ab, während die Elektronen den Weg durchs Metall zur Katode nehmen.

Der grundsätzlich gleiche Vorgang läuft beim Kupfer ab.

In unseren Rohrleitungen spielt sich prinzipiell der gleiche Vorgang ab, nur dass andere Ursachen den unterschiedlichen Sauerstoffzutritt zur metallischen Oberfläche bedingen. Im Bild 12a ist diese Konstellation schematisch dargestellt. Solange das Wasser nicht physikalisch behandelt wird, lagert sich Kalk bevorzugt ab wie oben beschrieben. Das bewirkt, dass zwischen den Bereichen mit starker Kalkablagerung und kalkfreien Bereichen, bzw. nur Schutzschichtbereichen, der immer im Wasser mehr oder weniger starke Sauerstoffgehalt in unterschiedlicher Konzentration auf die Oberfläche einwirkt. Damit setzt sich derselbe Ablauf in Gang wie beim Belüftungselement. Wie allgemein bekannt, tritt Korrosion bevorzugt an Bögen, Abzweigungen, Verschraubungen auf, die stets starke Ablagerungen aufweisen. Entfernt man diese Ablagerungen bis auf die Schutzschicht, so ist der Sauerstoffzutritt überall gleich, ein elektrisches Potential kann sich nicht mehr aufbauen. Insbesondere für Kupferleitungen ist dieser Vorgang von Bedeutung, da Kupfer bei stärkerem Sauerstoffgehalt und pH-Werten unterhalb von 6,5 besonders korrosionsgefährdet ist und speziell zur Lochfraßkorrosion neigt. Hier ist eine dichte Schutzschicht vor allem gefragt. Das auch deshalb, weil Verunreinigungen des Kupfers (Billiganbieter) die Bildung von Lokalelementen fördern. Es gelangt dadurch verstärkt Kupfer ins Wasser, was für die Gesundheit nachteilig ist. In solchen Fällen sollten Säuglinge nach Empfehlung des Bundesministeriums für Gesundheit kein Leitungswasser trinken. Wasseranbieter bezeichnen Kupfer als das "Blei des 20. Jahrhunderts".



7. Schlussbetrachtung

Betrachtet man die hier vorgestellten Fakten, so beweisen nicht nur die Aussagen von Anwendern die Wirksamkeit der physikalischen Wasserbehandlung, sondern sie ist auch theoretisch und praktisch physikalisch-chemisch begründet. Voraussetzung ist allerdings, dass angebotene Geräte die beschriebenen Parameter in etwa einhalten. Der elektronisch-technologische Aufwand ist dafür im allgemeinen hoch, so dass Billiggeräte die Forderungen kaum erfüllen können.

Die Wirkungsweise der Geräte lässt erkennen, dass übliche Prüfverfahren, insbesondere Kurzzeitverfahren, die man zum Test der Wirksamkeit von „entkalkenden“ Verfahren einsetzt, hier versagen müssen und Falschergebnisse liefern. Eine Entwicklung neuer Testverfahren ist angesagt, womit gleichzeitig die quantitative Bestätigung der hier vorgestellten theoretischen Zusammenhänge erfolgen kann.

Ich danke Herrn Prof. Dr. H. Ungenannt, Magdeburg, für die Unterstützung bei der Interpretation der elektrischen Vorgänge, Herrn Dipl.-Ing. K. Matthies, Berlin, für messtechnische Hilfe, Herrn Prof. Dr. W. Morgner, Eichenbarleben, für kritische Diskussionen zur vorliegenden Arbeit und dem Ingenieurbüro für physikalische Wasserbehandlung Helmut Siegmund für die Bereitstellung des Gerätes.

Bildnachweis:

- Bild 1 und 2: W. Kleber, Einführung in die Kristallographie, Verlag Technik Berlin, 1956
- Bild 10: Informationsschrift der BMW-Motorradwerke Berlin
- Bild 12: W. Schatt (Herausgeber), Einführung in die Werkstoffwissenschaft, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1981