FUNKTIONIERT MAGNETISCHE KALKBEHANDLUNG?

Der wissenschaftliche Hintergrund — von der Kalkchemie bis zu Coeys Designkriterium

Skejby Nordlandsvej 305, 1. Etage
8200 Aarhus N
Dänemark

+45 70 60 56 00
eksperten@lagur.dk
www.lagur.de

KURZ GEFASST

Viele erleben, dass hartes Wasser überall im Haushalt Kalkprobleme verursacht, sind zugleich aber skeptisch gegenüber den verfügbaren Lösungen zur Beseitigung von Kalkproblemen – Enthärtungsanlagen führen dem Trinkwasser Natrium zu, und die magnetische Wasserbehandlung stößt auf Skepsis. Funktioniert das überhaupt, oder ist es eine moderne Form von Quacksalberei?

Dieses Whitepaper nimmt die Skepsis ernst. Es erläutert, woher der Kalk stammt, welche Lösungen es gibt und — als sein Hauptthema — die inzwischen umfangreiche peer-reviewte Forschung dazu, ob und wie ein Magnetfeld die Art und Weise verändern kann, in der Kalk ausfällt. Zum Schluss wird erläutert, warum LAGURs patentierte HOME und PRO technisch optimiert sind – im Hinblick auf das mathematische Kriterium des Physikers J.M.D. Coey dafür, wann eine solche Behandlung tatsächlich wirkt.

ZUSAMMENFASSUNG

Kalk im Trinkwasser ist kein Gesundheitsproblem, sondern ein physikalisches und wirtschaftliches: Er setzt sich als harter Belag auf Heizflächen ab und verkürzt die Lebensdauer von Geräten. Jahrzehntelang wurde die magnetische Wasserbehandlung abgelehnt, weil niemand erklären konnte, wie ein Magnetfeld eine Wirkung auf Kalkprobleme hinterlassen sollte. Der Durchbruch kam, als nachgewiesen wurde, dass Kalk über langlebige prä-nukleare Cluster (PNCs/DOLLOPs) ausfällt — und dass gerade diese Cluster einem Magnetfeld einen physikalischen Angriffspunkt bieten. Coey (2012) stellte ein konkretes Designkriterium auf, das zeigt, dass die Wirkung von der Länge der Behandlungseinheit und dem Gradienten des Magnetfelds abhängt. LAGUR HOME und PRO sind so konstruiert, dass sie dieses Kriterium erfüllen, und vier unabhängige externe Analysen im Auftrag von LAGUR (GEUS, Teknologisk Institut, Rambøll und FORCE Technology) weisen übereinstimmend auf eine Umwandlung der Kristallstruktur des Kalks von hartem Calcit hin zu weichem Aragonit — ohne die gesunden Mineralien des Wassers zu entfernen. Die XRD-Quantifizierung der Phasen durch FORCE Technology ist vorläufig und noch nicht abgeschlossen.

Dieses Whitepaper verweist ausschließlich auf peer-reviewte Fachliteratur und namentlich genannte Analyseberichte. Alle Quellen sind laufend angegeben und hinten zusammengefasst.

INHALT

01 Kalkprobleme: warum hartes Wasser ein Problem ist 4
02 Wie gelangt der Kalk ins Wasser? 5
03 Lösungen gegen Kalkprobleme: entfernen oder umwandeln 7
04 Der Vorteil, die Mineralien nicht zu entfernen 8
05 Die Forschung: kann Magnetismus die Ausfällung des Kalks verändern? 9
05.01 Warum stieß die magnetische Wasserbehandlung auf Skepsis? 9
05.02 Der Durchbruch: nicht-klassische Nukleation und prä-nukleare Cluster 9
05.03 Coeys Mechanismus — und ein konkretes Designkriterium 11
05.04 Die experimentelle Dokumentation 14
05.05 Ein unabhängiger ingenieurtechnischer Realitätscheck 15
05.06 Dänische Dokumentation speziell zu LAGUR 15
06 Warum LAGUR optimiert ist: Coeys Formel in der Praxis 19
06.01 So beeinflusst LAGUR das Feld: $\partial B/\partial t + v \cdot \nabla B$ — einfach erklärt 19
07 Fazit 23
08 Referenzen 24

01 KALKPROBLEME: WARUM HARTES WASSER EIN PROBLEM IST

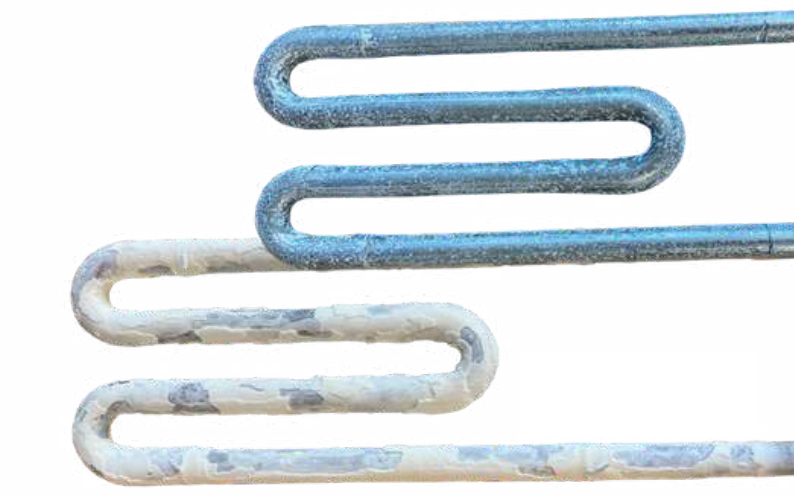
Die Härte im Trinkwasser beruht vor allem auf gelösten Calcium- und Magnesiumionen, wobei Calciumcarbonat ($CaCO_3$) in kalkhaltigen Grundwasserleitern die dominierende Quelle ist (WHO, 2011). In Dänemark, wo der Großteil des Trinkwassers aus Kalk- und Kreidevorkommen gewonnen wird, hat das Wasser typischerweise eine Gesamthärte von 15–30 °dH, was als „hart" bis „sehr hart" eingestuft wird (Hansen et al., 2011). Das Phänomen ist jedoch keineswegs auf Dänemark beschränkt – hartes Wasser und die damit verbundenen Kalkprobleme treten in vielen Regionen weltweit auf.

Das Problem ist nicht gesundheitlicher Natur — es gibt kein dokumentiertes Gesundheitsrisiko durch das Trinken von hartem Wasser. Das Problem ist technisch und wirtschaftlich. Wenn der Kalk sich auf Heizflächen ablagert, verringert er die Wärmeübertragung erheblich: ein Belag von nur 1 mm $CaCO_3$ kann den Energieverbrauch eines Warmwasserspeichers um 7–10 % erhöhen (Müller-Steinhagen et al., 2011). Hinzu kommen ein erhöhter Druckverlust in Rohrsystemen, eine verkürzte Lebensdauer von Haushaltsgeräten sowie ein höherer Verbrauch an Seife und Reinigungsmitteln (MacAdam & Parsons, 2004; Gabrielli et al., 2006). Mehrere europäische Untersuchungen haben geschätzt, dass die Gesamtkosten von hartem Wasser über einen Zeitraum von 10 Jahren die Ausgaben für eine Kalkbehandlungsanlage übersteigen (van der Bruggen et al., 2009).

Der Grund dafür, dass herkömmlicher Kalk so schwer zu entfernen ist, liegt in der Art seiner Entstehung. Wenn der Kalk direkt auf einer Heizfläche ausfällt, entstehen dichte, orientierte Ablagerungen mit nadelförmigen oder rhomboedrischen Kristallen, die sich mechanisch in den Mikroporen der Oberfläche verankern (Andritsos & Karabelas, 2003). Dieses epitaktische Wachstum ist der Grund, weshalb Kalkbeläge hart und dicht sind und in der Regel Säure erfordern, um entfernt zu werden.

Abbildung 1. Heizelemente aus zwei identischen Waschmaschinen nach ~190 Stunden Kochwäsche bei 14–15 °dH. Oben (blau): mit LAGUR. Unten (weiß): ohne LAGUR. Quelle: Teknologisk Institut (TI LAGUR Test, 2020).

140 Hochtemperatur-Waschzyklen
bei 14 °dH *mit* LAGUR



140 Hochtemperatur-Waschzyklen
bei 14 °dH ohne LAGUR

02 WIE GELANGT DER KALK INS WASSER?

Der Kalk wird durch CO_2-getriebene Verwitterung gelöst. Regenwasser ist leicht sauer (pH ~5,6), weil sich atmosphärisches CO_2 löst und Kohlensäure bildet (Stumm & Morgan, 1996). Wenn dieses mit CO_2-angereicherte Wasser durch Bodenschichten sickert, in denen der CO_2-Partialdruck 10–100-mal höher sein kann als in der Atmosphäre, beschleunigt sich die Auflösung kalkhaltiger Gesteine — die klassische Karbonatverwitterung, beschrieben von Plummer & Busenberg (1982). Diese Verwitterung von Karbonatgesteinen ist zugleich ein zentrales Glied im langfristigen Kohlenstoffkreislauf der Erde (Berner, 2003).

Im Grundwasser liegt der „Kalk" als getrennte Ionen vor — nicht als Feststoff. Anorganischer Kohlenstoff tritt in drei Formen auf, deren Verteilung durch den pH-Wert gesteuert wird. Bei typischen Grundwasser-pH-Werten (6,8–7,8) dominiert Bicarbonat (HCO_3^-), während Carbonat (CO_3^{2-}) in geringen Konzentrationen vorkommt. Calcium liegt als freies Kation Ca^{2+} vor (Parkhurst & Appelo, 2013). Der Kalk ist also vorhanden als Ca^{2+}, HCO_3^- und etwas CO_3^{2-} — nicht als festes $CaCO_3$.

Die chemische Formel für die Auflösung des Kalks sieht folgendermaßen aus:
$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2\,HCO_3^-$

Das Wasser „balanciert auf der Kante". Dänisches Grundwasser ist typischerweise nahe der Sättigung oder leicht übersättigt in Bezug auf Calcit (Appelo & Postma, 2005; Hansen et al., 2011). Das bedeutet, dass schon kleine Störungen — ein Temperaturanstieg, ein Druckabfall oder eine CO_2-Entgasung — das System in Richtung Ausfällung treiben. Diese marginale Stabilität erklärt, warum Kalkbeläge schon bei geringfügigen Änderungen des Wasserzustands spontan entstehen.

Das Erwärmen löst die umgekehrte Reaktion aus. Wenn hartes Wasser erwärmt wird, verschiebt sich das Gleichgewicht: die Löslichkeit von CO_2 nimmt mit der Temperatur ab (Henry-Gesetz) und entweicht, und — im Gegensatz zu den meisten Salzen — nimmt auch die Löslichkeit von Calcit mit der Temperatur ab. Diese retrograde Löslichkeit (Plummer & Busenberg, 1982; Morse et al., 2007) ist genau der Mechanismus, der den weißen Belag in Wasserkochern, Duschköpfen, Heizelementen und Waschmaschinen bildet (MacAdam & Parsons, 2004; Muryanto et al., 2014). Ein Druckabfall an Auslaufhähnen und Verdunstung wirken auf dieselbe Weise.

Wird hartes Wasser eingedampft oder erwärmt, läuft die Reaktion also umgekehrt ab – CO_2 wird freigesetzt, und $CaCO_3$ fällt als Feststoff aus:
$Ca^{2+} + 2\,HCO_3^- \rightarrow CaCO_3\downarrow + CO_2 + H_2O$

Drei Kristallformen — eine weich, eine hart. $CaCO_3$ fällt in drei wasserfreien Polymorphen aus: Calcit, Aragonit und Vaterit (Elfil & Roques, 2001; Morse et al., 2007). Calcit ist die thermodynamisch stabile Form mit rhomboedrischer Kristallstruktur (Markgraf & Reeder, 1985) und dominiert bei langsamer Ausfällung auf Heizflächen — es ist diejenige, die die harte, fest haftende Kruste bildet. Aragonit wird bei höheren Temperaturen (>60 °C) begünstigt (Chen et al., 2006) und bildet weichere, weniger haftende Ablagerungen. Diese Unterscheidung — harter Calcit gegenüber weichem Aragonit — ist der Schlüssel zum Verständnis dessen, was die magnetische Behandlung zu bewirken versucht.

03 LÖSUNGEN: ENTFERNEN ODER UMWANDELN

Die Lösungen gegen Kalk lassen sich in zwei grundlegend verschiedene Familien einteilen, die oft verwechselt werden:

A. Methoden, die Calcium (und Mineralien) aus dem Wasser ENTFERNEN

- Ionenaustausch / Enthärtung: Ca^{2+} und Mg^{2+} werden über ein Harz gegen Natrium (Na^{+}) ausgetauscht. Wirksam gegen Kalk, führt jedoch Natrium zu, erfordert Salz und Regenerierung und erzeugt salzhaltiges Abwasser (Gabrielli et al., 2006).
- Umkehrosmose (RO) / Nanofiltration: Das Wasser wird durch eine Membran gepresst, die Ionen zurückhält. Entfernt Kalk wirksam, demineralisiert jedoch das Wasser, verliert einen Teil als Konzentrat und erfordert Energie und Wartung (van der Bruggen et al., 2009).
- Templatgestützte Kristallisation (TAC/NAC): Kalk wird an Keimen auf einem Granulat gebunden und als Mikrokörner entfernt. Chemikalienfrei, aber das Verbrauchsmedium muss gewechselt werden (Fox et al., 2014).

B. Methoden, die den Kalk UMWANDELN, ohne ihn zu entfernen

Physikalische Wasserbehandlung — darunter die magnetische und elektromagnetische Behandlung, die LAGUR anwendet — entfernt kein Calcium. Stattdessen wird die Art und Weise verändert, in der der Kalk ausfällt, sodass er einen weichen, nicht haftenden Belag statt einer harten Kruste bildet. Die chemische Zusammensetzung des Wassers bleibt unverändert. Zusammenfassende Übersichtsliteratur beschreibt diese Kategorie als nicht-invasiv: sie verändert weder die Zusammensetzung des Wassers noch erzeugt sie chemischen Abfall (Martínez Moya & Boluda Botella, 2021; Fox et al., 2014).

Tabelle 1 Vergleich der Kalklösungen

Methode	Prinzip	Entfernt Mineralien?	Chemie / Abfall?	Typ
Ionenaustausch (Enthärtung)	Ca^{2+}/Mg^{2+} werden gegen Na^{+} ausgetauscht	Ja	Salz + Abwasser	Entfernt
Umkehrosmose	Membranfiltration	Ja (alles)	Abwasser	Entfernt
Nanofiltration	Teilweise Membranfiltration	Teilweise	Abwasser	Entfernt
TAC / Templat	Kalk wird an Granulat gebunden	Teilweise	Verbrauchsmedium	Entfernt
LAGUR (magnetisch)	Wandelt Calcit → Aragonit um	**Nein**	**Keine**	**Wandelt um**

Quellen: Gabrielli et al. (2006); van der Bruggen et al. (2009); Fox et al. (2014); Martínez Moya & Boluda Botella (2021).

04 DER VORTEIL, DIE MINERALIEN NICHT ZU ENTFERNEN

Den Kalk umzuwandeln, statt ihn zu entfernen, hat eine wichtige Folge: der natürliche Gehalt des Wassers an Calcium und Magnesium bleibt erhalten. Das ist aus mehreren Gründen von Vorteil.

- Calcium und Magnesium sind Nährstoffe. Die WHO hat in einem gesonderten Expertenbericht die mögliche gesundheitliche Bedeutung von Calcium und Magnesium im Trinkwasser untersucht, darunter den Beitrag des Wassers zur gesamten täglichen Aufnahme und die epidemiologischen Zusammenhänge zwischen Wasserhärte/Magnesium und Herz-Kreislauf-Erkrankungen (WHO, 2009). Trinkwasser kann somit einen ergänzenden — wenn auch geringeren — Beitrag zur Aufnahme dieser Mineralien leisten.

- Demineralisiertes und sehr weiches Wasser ist aggressiver. Wasser mit geringem Mineralgehalt ist korrosiver gegenüber Rohren und Installationen, was gerade in die Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Aspekte der Enthärtung und Demineralisierung durch die WHO einfließt (WHO, 2009; van der Bruggen et al., 2009).

- Keine Natriumbelastung. Die Enthärtung durch Ionenaustausch ersetzt Calcium durch Natrium und erhöht damit den Natriumgehalt des Wassers — relevant für Personen mit natriumreduzierter Ernährung (Gabrielli et al., 2006). Die magnetische Behandlung führt nichts zu.

- Keine Chemikalien, kein Abfall. Membran- und Ionenaustauschverfahren erzeugen Abwasser oder Regenerierungswasser. Die physikalische Behandlung nicht (Martínez Moya & Boluda Botella, 2021).

05 KANN MAGNETISMUS DIE KALKAUSFÄLLUNG VERÄNDERN?

Dieser Abschnitt ist der Kern des Whitepapers.

Dieser Abschnitt ist der Kern des Whitepapers. Die Frage ist einfach zu stellen und schwer zu beantworten: kann ein Magnetfeld — ohne etwas zuzusetzen — die Art und Weise verändern, in der Kalk ausfällt, und damit die Probleme durch Kalk im Wasser beseitigen? Die Antwort hat sich von „wahrscheinlich nicht" zu „ja, unter den richtigen Bedingungen" verschoben, während die Grundlagenforschung dazu, wie Kalk überhaupt entsteht, gereift ist. Im Folgenden wird die Dokumentation dargelegt.

05.01 WARUM STIESS DIE MAGNETISCHE WASSERBEHANDLUNG AUF SKEPSIS?

Jahrzehntelang fehlte ein plausibler Mechanismus. Die klassische Nukleationstheorie geht davon aus, dass (Kalk-)Kristalle spontan aus freien Ionen entstehen und dass ein solcher Keim nur Mikrosekunden lebt — viel zu kurz, um sich an eine magnetische Einwirkung zu „erinnern", die vielleicht Minuten oder Stunden zuvor stattfand (Coey, 2012). Hinzu kam, dass die Wirkung der magnetischen Wasserbehandlung in vielen frühen Versuchen schwer zu reproduzieren war, weil sie von Strömungsgeschwindigkeit, Magnetfeldgradient und Feldstärke abhängt (Vaskina et al., 2020; Martínez Moya & Boluda Botella, 2021). Ohne Mechanismus und mit schwankenden Ergebnissen war die Skepsis berechtigt.

05.02 NICHT-KLASSISCHE NUKLEATION UND PRÄ-NUKLEARE CLUSTER

Der wissenschaftliche Durchbruch kam, als nachgewiesen wurde, dass Kalk in Wirklichkeit einem nicht-klassischen Nukleationsweg, also einer nicht-klassischen Kristallbildung, folgt. Bereits in untersättigten Lösungen gibt es stabile, prä-nukleare Cluster (PNCs) — nanometergroße, dynamische Ionen-Aggregate, die bis zu etwa 50 % des gelösten Calciums im Wasser ausmachen können (Gebauer, Völkel & Cölfen, 2008; Pouget et al., 2009). Molekulardynamische Simulationen zeigten, dass diese Cluster flexible, flüssigkeitsähnliche ionische Polymere sind — sogenannte DOLLOPs (Dynamically Ordered Liquid-like Oxyanion Polymers) — Ketten, Ringe und Verzweigungen aus abwechselnd Ca^{2+} und CO_3^{2-}, zusammengehalten durch rein ionische Wechselwirkungen (Demichelis, Raiteri, Gale, Quigley & Gebauer, 2011). Entscheidend für das Folgende: der Radius eines DOLLOPs lässt sich um den Faktor zwei ändern, bei einem Energieaufwand, der geringer ist als die thermische Energie k_BT — er ist mit anderen Worten leicht zu verformen (Demichelis et al., 2011).

Die Existenz von PNCs ist seither experimentell mit mehreren unabhängigen Methoden bestätigt worden — darunter synchrotronbasierte Röntgenstreuung (SAXS), die die Cluster selbst in Lösungen findet, die in Bezug auf alle bekannten Kalkphasen untersättigt sind (Avaro, Moon, Schulz & Rose, 2023), und DNP-verstärkte NMR-Spektroskopie, die die kurzlebigen prä-nuklearen Spezies direkt eingefangen hat (Balodis et al., 2024). Die Cluster wurden sogar als reale Nanopartikel in gewöhnlichem Trinkwasser gemessen (Zarei et al., 2024). Neuere Arbeiten aus Coeys eigener Gruppe haben zudem die Stabilität der prä-nuklearen Cluster und ihre Wechselwirkung mit Nanobläschen bei der Ultraschallbehandlung von hartem Wasser untersucht (Fitzgerald et al., 2024).

Die Bildung von Kalkkristallen verläuft also in Schritten — nicht direkt aus freien Ionen:
Ca^{2+} + CO_3^{2-} → PNCs / DOLLOPs (1–3 nm) → Aggregate→ amorphes $CaCO_3$ (ACC) → kristalliner Kalk

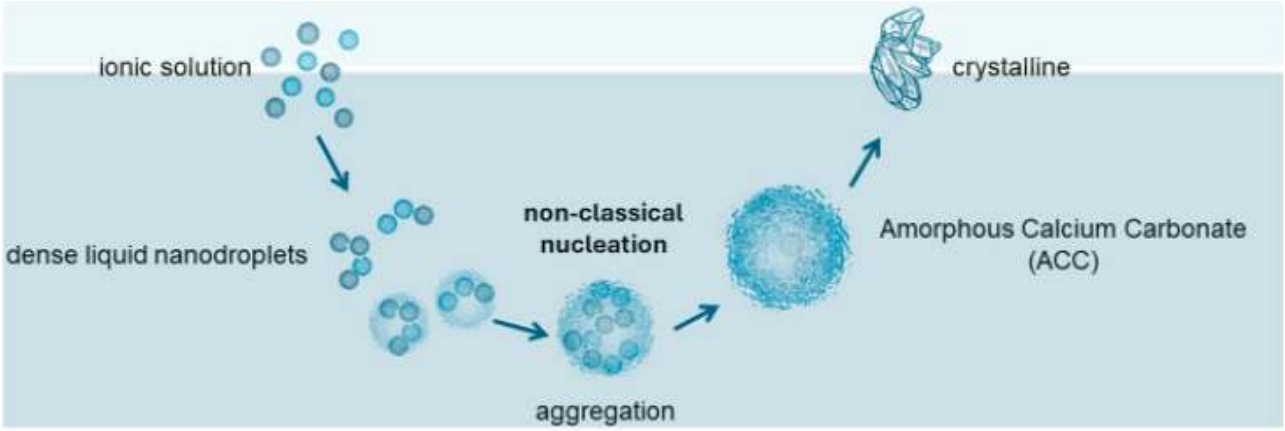


Abbildung 2. Der nicht-klassische Nukleationsweg: von Ionen über flüssigkeitsähnliche Nanotröpfchen und amorphes Calciumcarbonat zu kristallinem Kalk. Quelle: LAGUR, nach Gebauer & Cölfen (2011).

Der Punkt ist, dass die PNCs weder feste Kristalle noch freie Ionen sind, sondern dynamische Cluster im Nanomaßstab. Es ist genau die Geometrie des Clusters — und die Verteilung der Protonen auf seiner Oberfläche —, die darüber entscheidet, ob er später nukleiert, bzw. ausfällt, als harter Calcit oder als weicher Aragonit. Und ein langlebiger, verformbarer Cluster ist etwas, das ein Magnetfeld noch beeinflussen kann.

ALLTAGSSPRACHE

Stellen Sie sich Menschen in kleinen Gesprächsgruppen vor. Das stark wechselnde Feld wirkt wie wiederholte Windstöße: es stört die Gruppen, und wenn sie sich wieder zusammenfinden, geschieht das in einer etwas anderen Konstellation. Die Ladung (die Personen) ist dieselbe — aber die Organisation ist verändert. Auf dieselbe Weise verändert LAGUR nicht die Chemie des Wassers, sondern ordnet die Positionen der Ionen in den Clustern neu und damit die Kristallstruktur, zu der sie sich später entwickeln.

05.03 COEYS MECHANISMUS — UND EIN KONKRETES DESIGNKRITERIUM

Der Physiker J.M.D. Coey (Trinity College Dublin) lieferte 2012 den fehlenden Mechanismus. Er wies darauf hin, dass direkte Kräfte des Felds auf freie Ionen viel zu schwach sind, um etwas zu erklären. Die Wirkung muss daher auf eine langsame, langlebige Zwischenform wirken: die prä-nuklearen Cluster (Coey, 2012). Zwei physikalische Mechanismen sind im Spiel:

- Die Lorentz-Kraft verformt geladene Cluster. Die Kraft auf ein geladenes Teilchen in einem Magnetfeld ist $F = q(E + v \times B)$. Auf die polaren PNC-Aggregate wirkt sie wie eine mechanische Spannung — und da DOLLOPs flüssigkeitsähnlich und leicht verformbar sind, können schon mäßige Kräfte die relativen Positionen der Ionen zueinander neu ordnen (Coey, 2012; Demichelis et al., 2011).

FAKTENBOX WOBEI DIE KRAFT $F = Q(E + V \times B)$ SICH GLIED FÜR GLIED LESEN LÄSST:

- F: die Kraft auf den Cluster (in Newton) — sie ist es, die den Cluster presst und neu ordnet.
- q: die elektrische Ladung des Clusters (in Coulomb) — die Summe der Ca^{2+}- und carbonat-/bicarbonat-Ionen; je größer die Ladung, desto größer die Kraft.
- E: das elektrische Feld (Volt pro Meter); der Term qE wirkt auf die Ladung, unabhängig davon, ob sich der Cluster bewegt.
- v: die Geschwindigkeit des Clusters (des Wassers) durch das Feld (Meter pro Sekunde).
- B: das Magnetfeld — die magnetische Flussdichte (in tesla).
- $v \times B$: das Kreuzprodukt aus Geschwindigkeit und Feld; steht senkrecht auf beiden. Dieser Term erfordert Bewegung (er ist null, wenn $v = 0$) und koppelt die Strömung an das Magnetfeld — es ist der magnetische Teil der Lorentz-Kraft, $q(v \times B)$.

- Der Magnetfeldgradient manipuliert den Protonenspin. Der wesentliche, langfristig beständige Effekt entsteht, weil die Cluster polar sind: Bicarbonat (HCO_3^-) sammelt sich auf der einen Seite, Ca^{2+} auf der anderen. Damit der Cluster wachsen kann, muss ein Proton verdrängt werden, und es bildet sich kurzzeitig ein Protonen-Dimer. Der Spin der Protonen präzediert mit der Larmor-Frequenz f_pB (f_p = 42,6 MHz/T), und in einem inhomogenen Feld dephasieren die Singulett- und Triplett-Zustände, was die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass Ca^{2+} eingebaut wird. Das Ergebnis ist eine veränderte ionische Struktur, die über Stunden überdauert — der berühmte memory effect (Coey, 2012).

ALLTAGSSPRACHE

Der Cluster wächst, indem er Calcium aufnimmt, doch zuerst muss ein Wasserstoffkern (ein Proton) beiseitegeschoben werden — und für einen kurzen Moment treffen zwei Protonen aufeinander. Jedes Proton ist wie ein kleiner Kreisel, der im Magnetfeld herumtaumelt; je stärker das Feld, desto schneller taumelt er (das ist die Larmor-Frequenz).

Das Entscheidende: in einem ungleichmäßigen (inhomogenen) Feld — einem Gradienten — taumeln die zwei Protonen mit etwas unterschiedlicher Geschwindigkeit und geraten aus dem Takt, wie zwei Metronome, die fast, aber nicht ganz gleich eingestellt sind. Dieses Außer-Takt-Sein kippt das Protonenpaar zwischen zwei Zuständen, und der eine macht es dem Calcium leichter, sich am Cluster festzusetzen.

Das Feld verändert also nicht die Chemie des Wassers — es justiert nur fein, wie sich der Cluster aufbaut (hin zu weichem Aragonit statt hartem Calcit). Und weil die Cluster langlebig sind, bleibt der Effekt noch Stunden erhalten, nachdem das Wasser den Magneten verlassen hat — das ist der memory effect-Effekt. Ein völlig gleichmäßiges Feld würde die Protonen im Takt taumeln lassen, sodass nichts geschähe: es ist gerade die Ungleichmäßigkeit — der Gradient —, die den Effekt antreibt.

Das Entscheidende — Coeys Designkriterium. Coey leitete eine konkrete Bedingung dafür ab, wann eine magnetische Behandlungseinheit überhaupt wirken kann:

$$C = 2 \cdot (L / v) \cdot f_p \cdot a \cdot \nabla B \geq 1$$

wobei L die aktive Länge der Einheit ist, v die Geschwindigkeit des Wassers, f_p die Larmor-Frequenz des Protons (feste Konstante), a die Protonenseparation (feste Konstante von ~0,25 nm) und ∇B der Gradient des Magnetfelds (Coey, 2012). Das Kriterium besagt etwas Kontraintuitives, aber Wichtiges: die Wirkung skaliert mit der Länge der Einheit und dem Gradienten des Magnetfelds — und umgekehrt mit der Geschwindigkeit — nicht mit der rohen Stärke des Felds. Ein schwacher Magnet mit einem starken Gradienten und ausreichender Länge kann das Kriterium erfüllen, während ein starker, aber kurzer und gleichmäßiger Magnet dies nicht kann. Für eine Einheit von 5 cm bei 0,1 m/s erfordert das Kriterium einen Feldgradienten in der Größenordnung von 100 T/m (Coey, 2012).

Gerade der Umstand, dass die Theorie auf Gradient und Länge statt auf die Feldstärke hinweist, erklärt, warum frühere, einfache Anklemm-Magnete oft versagten — und warum eine Einheit bewusst nach dem Kriterium ausgelegt werden muss, um zu wirken.

FAKTENBOX WHY GRADIENT AND FLOW BEAT FIELD STRENGTH

Ein stärkeres Feld ist nicht unbedingt besser. Coeys Kriterium hängt vom gradient (∇B) des Felds und der Länge der Einheit ab — nicht von der rohen Stärke des Felds (B). Strömung ist notwendig. Die magnetische Kraft auf einen geladenen Cluster, F = q(v × B), ist proportional zur Geschwindigkeit v — steht das Wasser still, ist die Kraft null. Zugleich muss der Cluster durch den Feldgradienten geführt werden, um die Spin-Phasenverschiebung aufzubauen, die den Effekt antreibt; deshalb geht die Verweilzeit L/v in Coeys Kriterium ein. Eine niedrigere Geschwindigkeit ergibt eine längere Exposition — und damit einen größeren Effekt (Coey, 2012; Kožić et al., 2010).

Ein zu starkes Feld kann den Effekt schwächen. Der Mechanismus ist ein kohärenter Spin-Effekt (verwandt mit dem Radikalpaar-Mechanismus), keine Brute-Force-Wirkung. Ein sehr starkes Feld kann die Spin-Zustände so stark aufspalten (Zeeman-Aufspaltung), dass die Singulett-Triplett-Mischung, auf der der Effekt beruht, entkoppelt und zum Stillstand kommt (Vaskina et al., 2020; Paulitsch-Fuchs et al., 2021). Deshalb wirken selbst sehr schwache Felder mit steilen Gradienten: Sammer et al. (2016) und Paulitsch-Fuchs et al. (2021) erzielten einen messbaren Effekt mit Feldern von nur ~6 Gauss (0,6 mT), weil der Gradient stark war (C = 1,8–8,1).

Konsequenz für das Design: Das Ziel ist ein optimales, kein maximales, Feld — ein starker Gradient über ausreichende Länge bei der richtigen Geschwindigkeit. Genau deshalb verwendet LAGUR eine langgestreckte Spule mit hohen Gradienten und ein wechselndes Frequenzfeld statt eines einzigen starken, statischen Magneten — und deshalb versagen einfache Anklemm-Magnete oft.

05.04 DIE EXPERIMENTELLE DOKUMENTATION

Mit einem plausiblen Mechanismus bleibt die empirische Frage: verändert ein Magnetfeld tatsächlich die Ausfällung des Kalks im Versuch? Eine Reihe peer-reviewter Studien sagt ja — mit messbaren Zahlen.

- Coey & Cass (2000): in Blindversuchen stieg der Anteil an Aragonit von 7 % (unbehandelt) auf 54 % (behandelt), und der Effekt (memory) hielt über 200 Stunden an (zitiert in Fox et al., 2014; Martínez Moya & Boluda Botella, 2021).

- Ben Latifa et al. (2023): mit einem statischen Feld von 0,70 T stieg die Zeit bis zur Ausfällung von 51 auf 86 Minuten; die Hemmeffizienz stieg mit der Expositionsdauer von 24 % auf 60 % (homogen) und bis auf 88 % (heterogen), und das Feld begünstigte Aragonit. Memory-Effekt hielt bis zu 24 Stunden an.

- Lipuš & Dobersek (2007): in einem 3-wöchigen parallelen Betriebstest mit Permanentmagneten (0,6–0,8 T, Strömung 1,25 m/s) wurde der Kalkbelag auf einer Heizspirale 2,5× dünner, die Kristallnadeln ~4× dünner und der Bodensatz ~70 % geringer — alles identifiziert als Aragonit — entsprechend etwa 50 % besserer Wärmeübertragung.

- Kožić et al. (2010): bestätigten einen 2,5× dünneren Belag und dass Partikel im behandelten Wasser 10–20 nm groß waren gegenüber 50–180 nm im unbehandelten. Wichtig: die dynamische (strömende) Behandlung bei ≥0,05 T schlug die statische Behandlung bei 0,3 T, und es ist eine Verweilzeit von ≥0,1 s erforderlich — ganz im Einklang mit Coeys L/v- und Gradientenlogik.

- Vaskina et al. (2020): eine theoretische Übersicht, die erklärt, warum Strömung erforderlich ist, warum ein inhomogenes Feld (Gradient) plus Lorentz-Kraft benötigt wird und warum ein zu starkes Feld die Wirkung verringern kann — genau der Grund, warum ein schwaches Feld mit starkem Gradienten optimal sein kann.

- Sammer et al. (2016) und Paulitsch-Fuchs et al. (2021): die direkteste Bestätigung von Coey. Mit sehr schwachen Magneten (Feld ~6 Gauss, d. h. 0,6 mT), aber starken Gradienten (170–770 G/m) berechneten die Autoren das Coey-Kriterium zu C = 1,8–8,1 (also ≥ 1) — und maßen einen Anstieg von bis zu 25 % in der Anzahl der nm-großen Cluster sowie einen anhaltenden, statistisch signifikanten Effekt in 15 von 16 bzw. 8 von 10 Versuchen.

- Ein Feld mit nahezu null Stärke, aber großem Gradienten wirkt, genau wie es die Theorie vorhersagt.

- Martínez Moya & Boluda Botella (2021): eine zusammenfassende Übersicht des Feldes berichtet über typische Reduktionen von Härte und Fouling um 15–45 % über Feldstärken von 0,007 bis 1 T hinweg — betont zugleich aber ehrlich, dass die Wirkung von Temperatur, pH, CO_2, Feldstärke und Strömung abhängt.

05.05 EIN UNABHÄNGIGER INGENIEURTECHNISCHER REALITÄTSCHECK

Der Ausgewogenheit halber ist die wichtigste kritische Quelle eine unabhängige US-amerikanische Evaluierung: Fox, Wiest, Thomure & Lee (2014) testeten salzfreie Anti-Kalk-Einheiten nach dem deutschen DVGW-W512-Protokoll für die WaterReuse Research Foundation und das U.S. Bureau of Reclamation. Hier erzielte die elektromagnetische Behandlung eine reale, aber moderate Kalkreduktion von etwa 50 % und — in der Praxis wichtig — einen weichen Belag, der sich leicht abbürsten ließ, sowie die niedrigsten 10-Jahres-Lebenszykluskosten aller getesteten Alternativen. Der Bericht stellte jedoch auch fest, dass die Behandlung in mäßig hartem Wasser den Großteil des Calcits nicht in Aragonit umwandelte (über 90 % blieben Calcit) — der weiche Belag beruhte auf einer veränderten Kristallorientierung, nicht auf einer vollständigen Phasenumwandlung. Das Fazit ist nüchtern: die Wirkung ist real und wirtschaftlich attraktiv, doch ihr Ausmaß und ihr Charakter hängen vom Wasser und von der Anti-Kalk-Einheit ab.

05.06 DÄNISCHE DOKUMENTATION SPEZIELL ZU LAGUR

Die internationale Literatur zeigt, dass die magnetische Behandlung die Kalkausfällung verändert. Vier unabhängige externe Analysen im Auftrag von LAGUR wurden direkt an den LAGUR-Produkten durchgeführt und weisen übereinstimmend in dieselbe Richtung: eine veränderte Kristallmorphologie und eine Umwandlung hin zu weichem Aragonit.

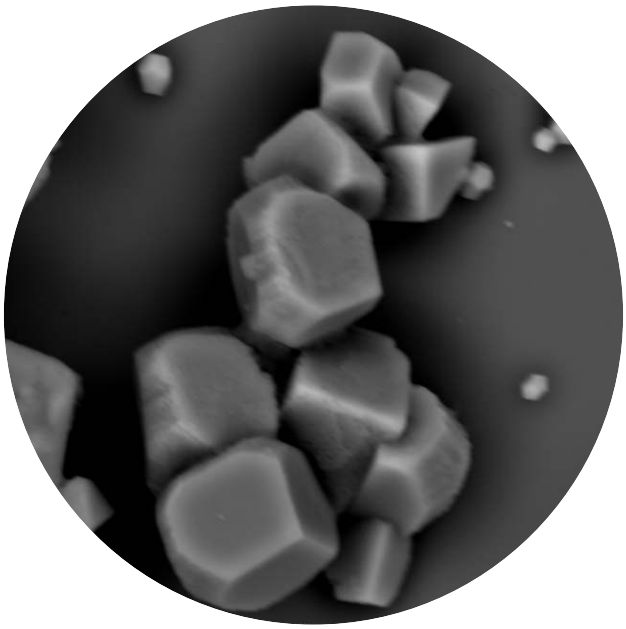
GEUS — ELEKTRONENMIKROSKOPIE DER KALKSTRUKTUR

In Zusammenarbeit mit dem Nationalen Geologischen Dienst für Dänemark und Grönland (GEUS) verglich LAGUR Kalk aus unbehandeltem Wasser mit Kalk, der mit 8 verschiedenen LAGUR-Produkten behandelt wurde, im Elektronenmikroskop bei über 100.000-facher Vergrößerung. Dem Wasser wurde nichts zugesetzt. Das Ergebnis zeigte einen deutlichen Unterschied in der Kristallstruktur.

Der Test zeigte zudem einen direkten Zusammenhang zwischen der Stärke der magnetischen Einwirkung und dem Grad der Umwandlung (GEUS SEM-Testbericht, April 2026). Das SEM dokumentiert Unterschiede in der Morphologie der Kristalle und in der Weichheit des Belags — nicht die Phasenzusammensetzung an sich; die quantitative Phasenbestimmung (Aragonit vs. Calcit) beruht auf der Röntgendiffraktion von FORCE Technology (Abschnitt unten).



Unbehandelter Kalk: nadelförmige, verwachsene Dendriten, die an Oberflächen haften.



LAGUR-behandelter Kalk: getrennte, abgerundete/kubische Kristalle, die einen lockeren, weichen Belag bilden.

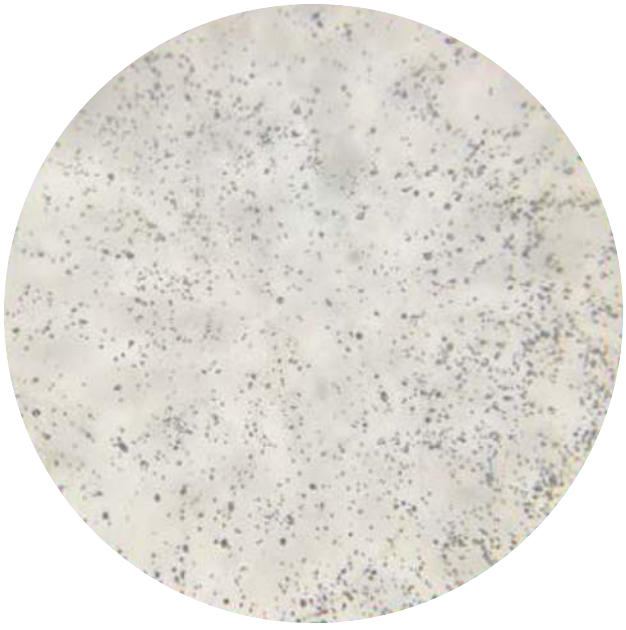
Abbildung 3. GEUS SEM-Analyse (>100.000×) von Kalk aus unbehandeltem Wasser (links) und LAGUR-behandeltem Wasser (rechts). Quelle: GEUS SEM-Bilder, April 2026.

DÄNISCHES TECHNOLOGISCHES INSTITUT — BETRIEBSTEST AN ZWEI WASCHMASCHINEN

Das Teknologisk Institut betrieb zwei identische Siemens-Waschmaschinen nebeneinander — eine mit und eine ohne LAGUR — über ca. 190 Stunden Kochwäsche bei einer Wasserhärte von ~15 °dH (insgesamt 140–147 Starts, entsprechend ~28–29 Wochen Haushaltswäsche). Das Heizelement mit LAGUR wies deutlich weniger verbleibenden Kalk auf, visuell und mikroskopisch an drei Messpunkten bestätigt. Ein Kratztest zeigte, dass der Kalk am unbehandelten Element 1,2–2,1-mal härter haftete (Teknologisk Institut, 2020; vgl. die Abbildung in Abschnitt 1).

RAMBØLL — FELDSTUDIE IN EINEM GESAMTEN VERSORGUNGSNETZ

Rambøll untersuchte LAGUR, installiert im Wasserwerk Grauballe, durch den Vergleich von Wasserproben bei vier Verbrauchern vor und nach der Installation. Nach der Installation wurde der Kalk von harten Calcitbelägen zu weichen, fein umgeformten Aragonitbelägen bei allen vier Verbrauchern umgewandelt — am stärksten bei jenen, die ursprünglich die meiste Kalkausfällung hatten. Eine Nachverfolgung zeigte, dass der Effekt noch mindestens 8 Tage nach der Probenahme und bis zu 6 km vom Wasserwerk entfernt messbar war (Rambøll, Wasserwerk Grauballe, Februar 2026). Der anhaltende Effekt über die Entfernung steht im Einklang mit dem dokumentierten memory-Effekt in der Literatur.



Unbehandelte Wasserprobe: zahlreiche einzelne, harte Kalkpartikel.



LAGUR-behandelte Wasserprobe: weicheres, fein umgeformtes Material.

Abbildung 4. Eingedampfte Wasserproben von Verbrauchern am Wasserwerk Grauballe, vor und nach LAGUR. Quelle: Rambøll, Februar 2026.

FORCE TECHNOLOGY — SYNCHROTRON-RÖNTGENDIFFRAKTION

FORCE Technology analysierte Kalkproben aus drei verschiedenen LAGUR-Produkten sowie Rohwasser mittels Transmissions-Röntgendiffraktion bei 35 keV. Alle vier Proben ließen sich als eine Kombination aus Aragonit und Calcit/Mg-haltigem Calcit beschreiben. Am meisten Calcit und am meisten amorphes Material fand sich im Rohwasser (FORCE Technology, Synchrotron-XRD, Juli 2026). Dies ist eine vorläufige Bewertung — eine gründlichere Analyse soll die genauen Phasenkonzentrationen festlegen —, doch sie bestätigt die Phasenumwandlung hin zu Aragonit auf einer unabhängigen, quantitativen Grundlage.

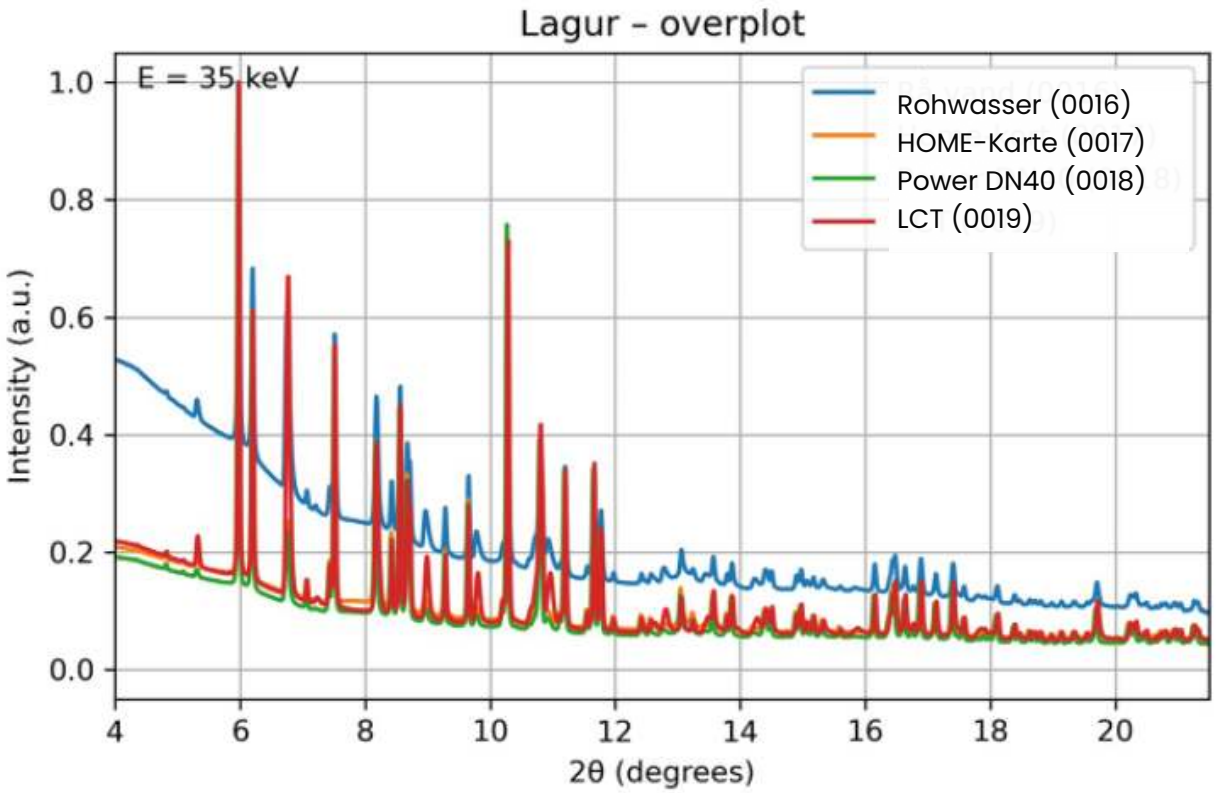


Abbildung 5. Synchrotron-XRD-Spektren (35 keV) für Rohwasser und drei LAGUR-behandelte Proben. Quelle: FORCE Technology, Juli 2026.

06 LAGUR: COEYS FORMEL IN DER PRAXIS

Der Unterschied zwischen einem wirkungslosen Magneten und einer wirksamen Behandlungseinheit liegt, wie Abschnitt 5.3 zeigte, im Coey-Kriterium $C = 2(L/v)\cdot f_p \cdot a \cdot \nabla B \geq 1$. Die Produkte LAGUR HOME und PRO sind bewusst genau nach diesem Kriterium konstruiert.

Die Konstruktion. Eine LAGUR-Einheit wird als aktiver Teil der Wasserversorgung montiert und enthält mindestens 1,5 kg Kupferwicklungen, die ein starkes und langgestrecktes Magnetfeld mit steilen Feldgradienten in den Wasserstrom selbst hinein erzeugen. Das Feld wechselt systematisch in einem patentierten Frequenzbereich von 300–3000 Hz („frequentierend magnetisch"). Dieser Frequenzsweep wird bis zu 20-mal pro Sekunde wiederholt, sodass jeder Volumenanteil des Wassers während der Passage tausende Male exponiert wird. Zusammen ergeben der Polwechsel und der Frequenzsweep eine starke zeitliche Feldänderung ($\partial B/\partial t$) — ein eigenständiger Beitrag zusätzlich zum räumlichen Feldgradienten selbst (∇B), der daraus resultiert, wie das Feld im Raum um die Wicklungen abnimmt.

06.01 SO BEEINFLUSST LAGUR DAS FELD: $\partial B/\partial T + V\cdot\nabla B$ — EINFACH ERKLÄRT

Was die Wirkung antreibt, ist nicht die Stärke des Felds, sondern wie stark sich das Feld ändert, während ein Wassertropfen die Einheit passiert. Ein LAGUR-Tropfen erfährt zwei Arten von Änderung zugleich, und die Wirkung addiert sich:

Gesamte Feldänderung $dB/dt = \partial B/\partial t + (v\cdot\nabla)B$

- $v\cdot\nabla B$ — Änderung, weil sich der Tropfen bewegt. Das Feld ist an der Spule stärker als weiter entfernt (das ist der Gradient, ∇B). Wenn der Tropfen mit der Geschwindigkeit v hindurchströmt, erfährt er eine Änderung, gerade weil er sich bewegt. Je stärker der Gradient und je schneller die Strömung, desto größer ist dieser Term.
- $\partial B/\partial t$ — Änderung, weil das Feld selbst sich zeitlich ändert. LAGUR wechselt die Pole (Nord/Süd) viele Male pro Sekunde und fährt gleichzeitig 300–3000 Hz — und die Steuerbox ist so gebaut, dass jeder Wechsel so schnell und steil wie möglich erfolgt. Das ergibt eine große zeitliche Feldänderung, völlig unabhängig davon, wie schnell das Wasser strömt.

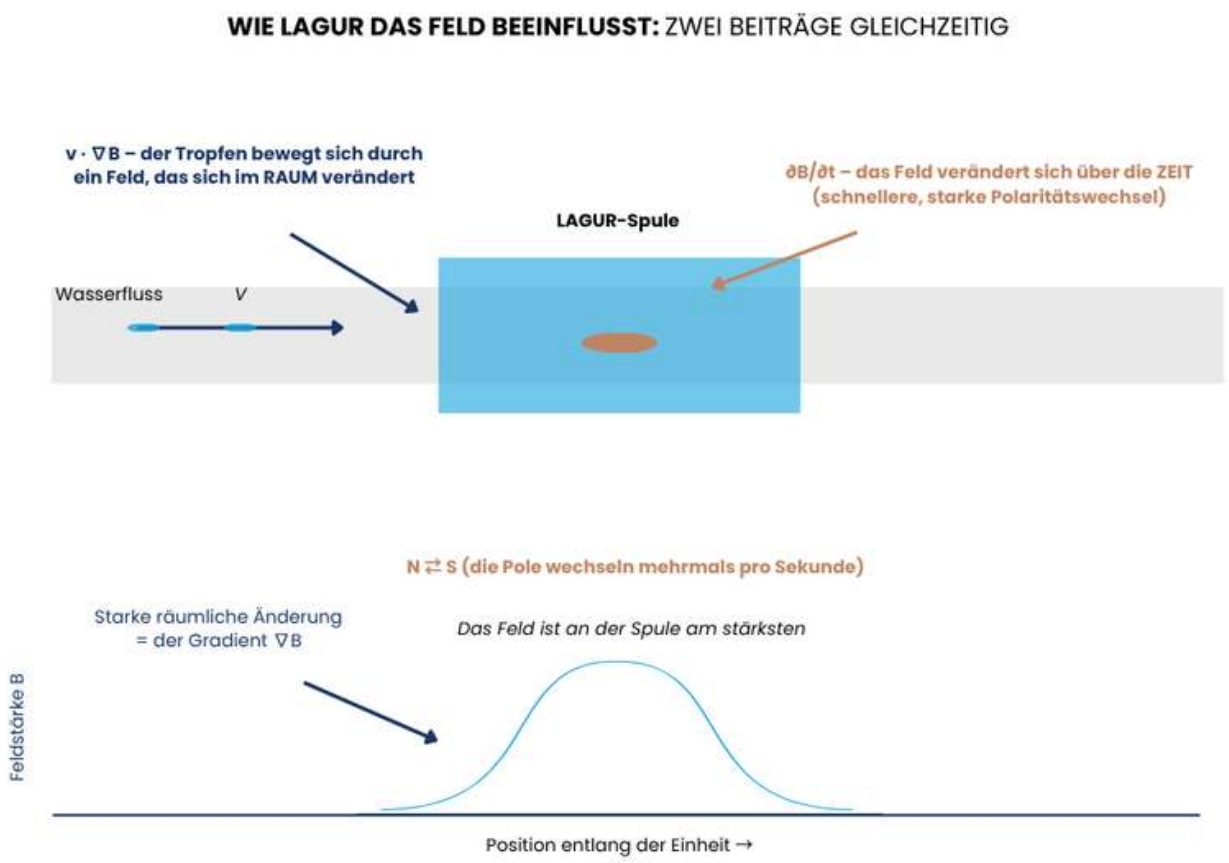


Abbildung 6. Die zwei Beiträge: der Tropfen bewegt sich durch den räumlichen Gradienten (v·∇B), während die Spule zugleich das Feld zeitlich wechselt (∂B/∂t).

Warum das wichtig ist. Die zwei Terme ergänzen einander. Bei hoher Strömung trägt die Bewegung (v·∇B) am meisten bei. Bei niedriger Strömung wird v·∇B klein, und dann ist es das schnelle Switching (∂B/∂t), das die Wirkung trägt. Weil LAGUR ∂B/∂t aktiv maximiert, wirkt das Produkt auch dann, wenn das Wasser langsam strömt.

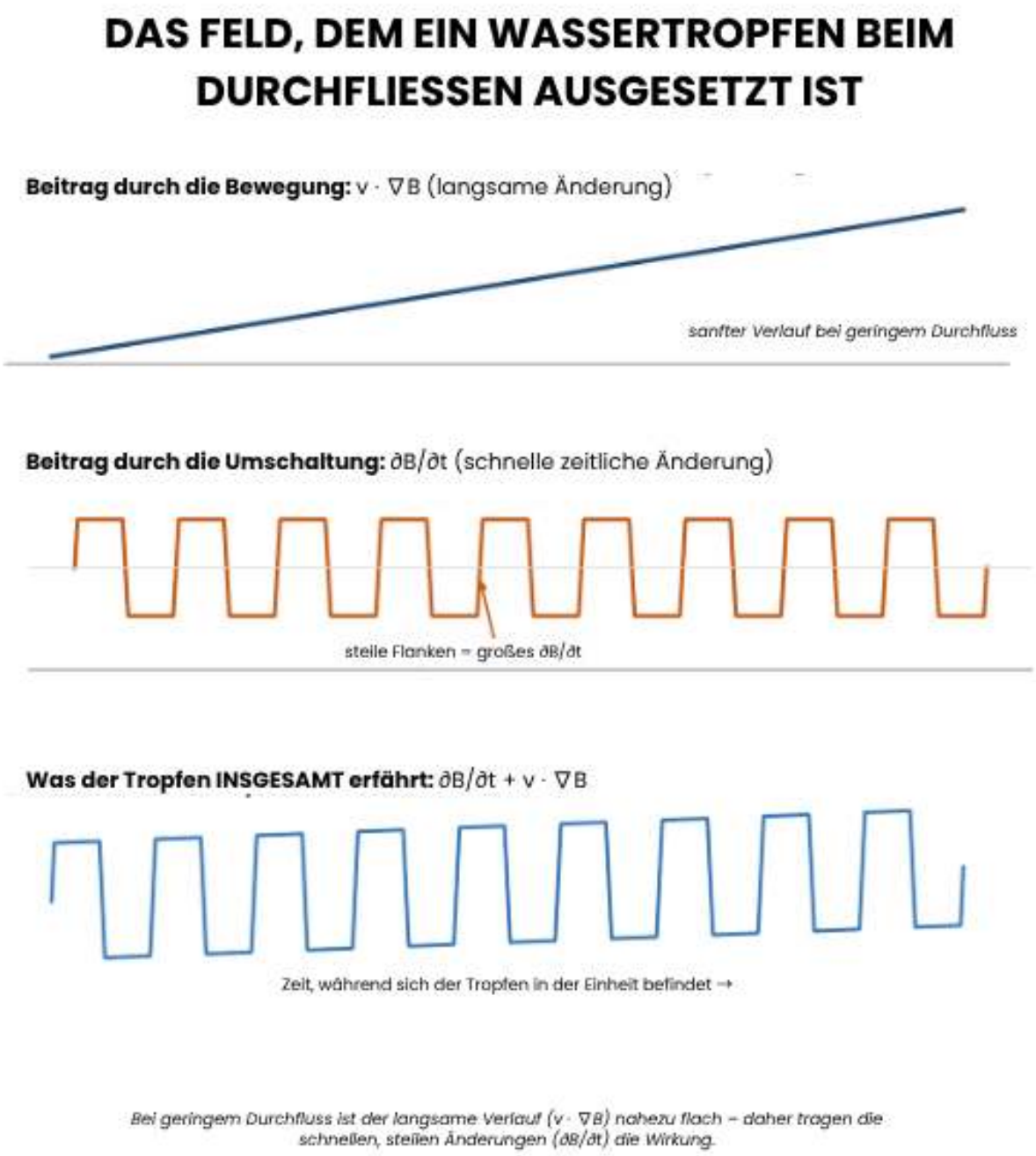


Abbildung 7. Das Feld, das ein Tropfen unterwegs erfährt: eine langsame Änderung aus der Bewegung (v·∇B) plus schnelle, steile Wechsel aus dem Switching (∂B/∂t), zusammengerechnet. Bei niedriger Strömung sind es die steilen Wechsel, die dominieren.

In Coeys ursprünglichem Kriterium ist nur der bewegungsgetragene Term enthalten (hergeleitet für einen statischen Magneten). LAGUR fügt mit seinem wechselnden Feld den zeitlichen Term hinzu.

Tabelle 2 LAGUR's Design abgebildet auf das Coey-Kriterium

Parameter in C	Was das Kriterium verlangt	LAGURs Designantwort
L (Länge)	Lange aktive Strecke erhöht C	Langgestreckte Spule, erhebliche aktive Länge
∇B (Gradient)	Ein starker Feldgradient ist der tragende Faktor	≥1,5 kg Kupferspule erzeugt hohe Feldgradienten
v (Geschwindigkeit)	Niedrigere Geschwindigkeit ergibt längere Exposition — und damit größere Wirkung (höheres C)	Ausgelegt auf lange Verweilzeit (L/v) im vorgesehenen Durchflussbereich
∂B/∂t (zeitliches Switching)	Zeitlich veränderliches Feld ergibt zusätzliche Expositionen — LAGURs Ergänzung über Coeys statisches Kriterium hinaus: trägt die Wirkung	300–3000 Hz Frequenzsweep + Polwechsel bis zu 20×/s = viele Expositionen pro Passage

Die Folge. Indem die Bildung von Clustern und Mikropartikeln im Wasserstrom selbst beschleunigt wird, findet ein größerer Teil der Ausfällung in der Wasserphase (homogene Nukleation) statt als an Rohr- und Heizflächen (heterogene Nukleation). Je nach Wasser kann das Ergebnis auf zwei Wegen entstehen, die einzeln oder gleichzeitig auftreten können: eine teilweise Phasenumwandlung hin zu weichem Aragonit, und/oder — wie Fox et al. (2014) in mäßig hartem Wasser fanden, wo über 90 % Calcit blieben — eine veränderte Kristallorientierung, bei der der Kalk überwiegend Calcit bleibt, aber eine zufällige Orientierung und variable Größe erhält. Beide Wege bilden einen weichen, lockeren Belag, der sich leicht abwischen oder abbürsten lässt — anstelle einer harten Calcitkruste. Genau das dokumentieren GEUS, Rambøll und FORCE an LAGUR-Proben, und genau das quantifiziert der Kratztest des Teknologisk Institut in der Praxis.

Skalierbarkeit. Dieselbe Physik gilt vom einzelnen Haushalt (HOME) über größere Installationen (PRO) bis hin zu einem ganzen Wasserwerk: Rambølls Feldstudie zeigte, dass der Effekt einer einzelnen Einheit im Wasserwerk Grauballe bei Verbrauchern bis zu 6 km entfernt messbar war. LAGUR wandelt den Kalk also dort um, wo das Wasser genutzt wird — ohne die Mineralien zu entfernen, die das Wasser gesund zu trinken machen.

07 FAZIT

Die magnetische Kalkbehandlung ist nicht länger ein Mechanismus ohne Erklärung. Die Entdeckung der prä-nuklearen Cluster gab dem Feld ein physikalisches Fundament, Coeys Kriterium machte es zur Ingenieurwissenschaft, und eine wachsende peer-reviewte Literatur — zusammen mit LAGURs dänischen Analysen — dokumentiert, dass ein richtig ausgelegtes Feld die Kristallstruktur des Kalks von hartem Calcit hin zu weichem Aragonit verändert.

LAGURs patentierte HOME und PRO sind so gebaut, dass sie genau dieses Kriterium erfüllen — und reduzieren die Kalkprobleme, ohne Chemikalien zuzusetzen und ohne die gesunden Mineralien des Wassers zu entfernen.

08 REFERENZEN

PEER-REVIEWTE FACHLITERATUR

Andritsos, N., & Karabelas, A. J. (2003). Calcium carbonate scaling in a plate heat exchanger in the presence of particles. International Journal of Heat and Mass Transfer, 46(24), 4613–4627.

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). Geochemistry, Groundwater and Pollution (2nd ed.). A. A. Balkema, Leiden.

Avaro, J., Moon, E. M., Schulz, K. G., & Rose, A. L. (2023). Calcium Carbonate Prenucleation Cluster Pathway Observed via In Situ Small-Angle X-ray Scattering. J. Phys. Chem. Lett., 14, 4517–4523.

Balodis, M., Rao, Y., Stevanato, G., Kellner, M., Meibom, J., Negroni, M., Chmelka, B. F., & Emsley, L. (2024). Observation of Transient Prenucleation Species of Calcium Carbonate by DNP-Enhanced NMR. J. Phys. Chem. Lett., 15, 7954–7961.

Ben Latifa, S., Cheap-Charpentier, H., Perrot, H., & Ben Amor, Y. (2023). Effects of Magnetic Field on Homogeneous and Heterogeneous Precipitation of Calcium Carbonate. ChemElectroChem, 10, e202300105.

Berner, R. A. (2003). The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. Nature, 426, 323–326.

Chen, T., Neville, A., & Yuan, M. (2006). Calcium carbonate scale formation — assessing the initial stages of precipitation and deposition. J. Petroleum Science and Engineering, 46(3), 185–194.

Coey, J. M. D. (2012). Magnetic water treatment – how might it work? Philosophical Magazine, 92(31), 3857–3865.

Coey, J. M. D., & Cass, S. (2000). Magnetic water treatment. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 209, 71–74.

Demichelis, R., Raiteri, P., Gale, J. D., Quigley, D., & Gebauer, D. (2011). Stable prenucleation mineral clusters are liquid-like ionic polymers. Nature Communications, 2, 590.

Elfil, H., & Roques, H. (2001). Role of hydrate phases of calcium carbonate on the scaling phenomenon. Desalination, 137(1–3), 177–186.

Fitzgerald, E., Kumar, A., Poulose, S., & Coey, J. M. D. (2024). Interaction and Stability of Nanobubbles and Prenucleation Calcium Clusters during Ultrasonic Treatment of Hard Water. ACS Omega, 9, 2547–2558.

Fox, P., Wiest, M., Thomure, T. M., & Lee, W. (2014). Evaluation of Alternatives to Domestic Ion Exchange Water Softeners. WateReuse Research Foundation (WRRF-08-06); U.S. Bureau of Reclamation.

Gabrielli, C., Maurin, G., Francy-Chausson, H., Thery, P., Tran, T. T. M., & Tlili, M. (2006). Electrochemical water softening: principle and application. Desalination, 201(1–3), 150–163.

Gebauer, D., Völkel, A., & Cölfen, H. (2008). Stable Prenucleation Calcium Carbonate Clusters. Science, 322, 1819–1822.

Gebauer, D., & Cölfen, H. (2011). Prenucleation clusters and non-classical nucleation. Nano Today, 6(6), 564–584.

Hansen, B., Thorling, L., Dalgaard, T., & Erlandsen, M. (2011). Trend reversal of nitrate in Danish groundwater. Environmental Science & Technology, 45(1), 228–234.

Kožić, V., Hamler, A., Ban, I., & Lipuš, L. Č. (2010). Magnetic water treatment for scale control in heating and alkaline conditions. Desalination and Water Treatment, 22, 65–71.

Lipuš, L. C., & Dobersek, D. (2007). Influence of magnetic field on the aragonite precipitation. Chemical Engineering Science, 62, 2089–2095.

MacAdam, J., & Parsons, S. A. (2004). Calcium carbonate scale formation and control. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 3(2), 159–169.

Markgraf, S. A., & Reeder, R. J. (1985). High-temperature structure refinements of calcite and magnesite. American Mineralogist, 70(5–6), 590–600.

Martínez Moya, S., & Boluda Botella, N. (2021). Review of Techniques to Reduce and Prevent Carbonate Scale. Prospecting in Water Treatment by Magnetism and Electromagnetism. Water, 13, 2365.

Morse, J. W., Arvidson, R. S., & Lüttge, A. (2007). Calcium carbonate formation and dissolution. Chemical Reviews, 107(2), 342–381.

Müller-Steinhagen, H., Malayeri, M. R., & Watkinson, A. P. (2011). Heat exchanger fouling: mitigation and cleaning strategies. Heat Transfer Engineering, 32(3–4), 189–196.

Muryanto, S., Bayuseno, A. P., Ma'mun, H., Usamah, M., & Jotho. (2014). Calcium carbonate scale formation in pipes. Procedia Chemistry, 9, 69–76.

Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (2013). Description of input and examples for PHREEQC version 3. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chap. A43.

Paulitsch-Fuchs, A. H., Stanulewicz, N., Pollner, B., Dyer, N., & Fuchs, E. C. (2021). Strong Gradients in Weak Magnetic Fields Affect the Long-Term Biological Activity of Tap Water. WATER, 12, 28–48.

Plummer, L. N., & Busenberg, E. (1982). The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO_2–H_2O solutions between 0 and 90 °C. Geochimica et Cosmochimica Acta, 46(6), 1011–1040.

Pouget, E. M., Bomans, P. H. H., Goos, J. A. C. M., Frederik, P. M., de With, G., & Sommerdijk, N. A. J. M. (2009). The Initial Stages of Template-Controlled $CaCO_3$ Formation Revealed by Cryo-TEM. Science, 323, 1455–1458.
Sammer, M., Kamp, C., Paulitsch-Fuchs, A. H., Wexler, A. D., Buisman, C. J. N., & Fuchs, E. C. (2016). Strong Gradients in Weak Magnetic Fields Induce DOLLOP Formation in Tap Water. Water, 8, 79.
Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters (3rd ed.). John Wiley & Sons.
Vaskina, I., Roi, I., Plyatsuk, L., Vaskin, R., & Yakhnenko, O. (2020). Study of the Magnetic Water Treatment Mechanism. Journal of Ecological Engineering, 21(2), 251–260.
van der Bruggen, B., Goossens, H., Everard, P. A., Stemgée, K., & Rogge, W. (2009). Cost-benefit analysis of central softening for production of drinking water. Journal of Environmental Management, 91(2), 541–549.
WHO (2009). Calcium and magnesium in drinking-water: Public health significance. World Health Organization, Geneva (ISBN 978 92 4 156355 0).
WHO (2011). Hardness in drinking-water (WHO/HSE/WSH/10.01/10/Rev/1). World Health Organization, Geneva.
Zarei, T., Colombo, M. B. A., Fuchs, E. C., Offerhaus, H. L., Gebauer, D., & Agostinho, L. L. F. (2024). Characterization of Nanoparticles in Drinking Water Using Field-Flow Fractionation with MALS and ICP-MS. Water, 16, 2419.

ANALYSEBERICHTE (LAGUR'S DOKUMENTATION)

FORCE Technology (2026). Synchrotron-XRD-Analyse von LAGUR-behandeltem Kalk — vorläufige Phasenbewertung. Juli 2026.
GEUS (2026). SEM-Analyse der Kalkstruktur: LAGUR-behandelt vs. unbehandeltes Trinkwasser. SEM-Testbericht, April 2026. Nationaler Geologischer Dienst für Dänemark und Grönland.
Rambøll (2026). Feldstudie zu LAGUR im Wasserwerk Grauballe — Kalkstruktur im Versorgungsnetz. Februar 2026.
Teknologisk Institut (2020). Untersuchung des Lagur-Wasserbehandlers (Auftragsnr. 923059; R. Pedersen). Installation und Kalibrierung, 9. Juni 2020.