

CLEAN Projekt CHALKGUSH

AMTech/Kalkbrecher: Analyse einer Kalkschutztechnologie



Michael Bache, M.Sc. Ph.D.

Isaac Appelquist Løge, M.Sc. Ph.D.

In Zusammenarbeit mit und unterstützt durch:



DEN EUROPÆISKE UNION



Den Europæiske Socialfond

Vi investerer i din fremtid



Vækstforum
Hovedstaden

Projektbeschreibung CLEAN AMTech (Deutsche Version 2023)

AMTech ApS stellt Geräte her, die Kalkablagerungen (Calcit) aus Wasserleitungen entfernen. Zweck des Projekts ist die Charakterisierung der Funktionalität der AMTech-Wasserbehandlungseinheit. Das Gerät arbeitet auf der Basis elektromagnetischer Impulse und Schallwellen, die Calcitablagerungen in leichter löslichen Aragonit umwandeln. Der Handlungsplan sieht Folgendes vor:

1. Alle Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit AMTech und Mejsegaarden durchgeführt, und es wurde eine Kooperationsvereinbarung zwischen DTU, AMTech und Mejsegaarden abgeschlossen.
2. Alle zwei Wochen finden regelmäßige Treffen zwischen DTU und AMTech zum Fortschritt der Experimente und Projekte statt.
3. Ein Versuchsdesign und ein Versuchsaufbau für das AMTech-Gerät werden in Zusammenarbeit mit der Geschäftsleitung von AMTech erstellt und basieren auf beobachteten Effekten in Wasserwerken und Kundensystemen.
4. Verschiedene physikalische Parameter des Wassers werden charakterisiert, mit dem Ziel zu identifizieren, welche Parameter durch das AMTech-Gerät am stärksten beeinflusst werden. Experimente mit unterschiedlichen Einstellungen am AMTech-Gerät.
5. 8–10 Warmwassertanks werden mit und ohne AMTech untersucht (mindestens 4 mit + 4 ohne). Dies kann an der DTU oder in Zusammenarbeit mit Mejsegaarden ApS erfolgen.
6. Pyrex-Glasgefäße mit 1 Liter und 250 ml Volumen werden für das AMTech-Gerät verwendet und dienen zur Untersuchung der Effekte des Geräts. Aus diesen Gefäßen werden Wasserproben entnommen und auf Partikelladung (Zeta-Potenzial), Spektroskopie (FT-IR und NIR), Leitfähigkeit, Redox-Potenzial und pH-Wert analysiert.
7. In Zusammenarbeit mit AMTech und Mejsegaarden erstellen Michael Bache und Isaac Appelquist Løge vom Department of Chemical Engineering der DTU einen Bericht über die beobachteten Effekte und Schlussfolgerungen mit Perspektiven für die zukünftige Anwendung für das AMTech-System und den Einsatz chemiefreier Wasserbehandlung in Dänemark.

Fazit

Das Wasserbehandlungssystem von AMTech zeigt feine, aber konsistente Einflüsse auf die Wasserstruktur, die Partikelladung und möglicherweise auf das Kristallisationsverhalten. Während sich die Standard-Chemieparameter des Wassers weitgehend unverändert zeigen, scheinen die vom Gerät erzeugten akustischen und elektromagnetischen Felder die Hydrathüllen sowie die Grenzflächenwasser-Eigenschaften zu beeinflussen. Diese Veränderungen können die Kalkbildung reduzieren und den Wasserfluss in chemiefreien Anwendungen verbessern.

Dieser Bericht liefert überzeugende Beweise, dass das AMTech-System messbare Effekte auf die Eigenschaften von Wasser erzeugt. Obwohl weitere quantitative und praxisorientierte Validierungen erforderlich sind, zeigt die Technologie ein hohes Potenzial für eine nachhaltige, nicht-chemische Wasseraufbereitung. Zukünftige Forschung sollte darauf abzielen, das Wirkprinzip besser zu verstehen und standardisierte Prüfprotokolle zu entwickeln, um eine breitere Anwendung zu ermöglichen.

Danksagung

Wir danken Clean Cluster, Dänemarks Wasser- und Umwelt-Cluster, für die finanzielle Unterstützung dieses Projekts. Ein besonderer Dank gilt außerdem AMTech / Kalkbrecher Poul Rasmussen und Nick Traulsen für ihre Finanzierung, Offenheit und ihr Interesse am Projekt.

Unser Dank gilt auch der CERE-Gruppe des Departments für Chemietechnik an der DTU für die Bereitstellung von Laborräumen und Messtechnik. Ebenso danken wir Mejsegaarden für die Kalkproben und die gute Zusammenarbeit.

Einleitung

The AMTech device is sold as a de-scaler device for water pipes and appliances in contact with hard water. The principle is mainly an acoustic actuator with a very weak electromagnetic impulse (see previous report on AMTech). However, the precise mode of action and effect on water is unknown, but there are 2 plausible hypotheses:

Das AMTech-Gerät wird als Kalkschutz für Wasserleitungen und Geräte vermarktet, die mit hartem Wasser in Kontakt kommen. Das Funktionsprinzip basiert im Wesentlichen auf einem akustischen Aktor (Schallgeber) mit einem sehr schwachen elektromagnetischen Impuls (siehe früheren Bericht zu AMTech). Die genaue Wirkungsweise und der Effekt auf das Wasser sind jedoch nicht bekannt, es existieren jedoch zwei plausible Hypothesen:

1. Die Hydratation von CaCO_3 -Kernpartikeln im Wasser wird durch einen akustischen/elektromagnetischen Impuls beeinflusst, der eine Ladungsübertragung auf die Partikel (Zeta-Potenzial) bewirkt. Wenn die Welle mit den CaCO_3 -Partikeln und der Hydrathülle interagiert, führt dies zu einer Vereinheitlichung der Ladungen aller Partikel. Ein einheitliches Zeta-Potenzial sollte in sogenannten „Kaffeeing-Effekten“ (Ringbildung bei der Trocknung von Tropfen) getrockneter Wassertropfen erkennbar sein, da die Ausfällung der Trockensubstanz in der Wasserprobe homogener verläuft.
2. Flüssige Wassermoleküle neigen zur Bildung von Clustern – jedoch nicht im Sinne stabiler Molekülcluster, da die Wasserstoffbrückenbindung nur etwa 10 Pikosekunden anhält. Dies entspricht rund 100 Milliarden Bindungen pro Sekunde mit einem Energieumsatz von etwa 21 kJ/mol oder 5,0 kcal/mol [1,2]. Möglicherweise brechen der Impuls oder die Obertöne des Schallfeldes diese Hydrate von Partikeln und Ionen auf. Wenn dies der Fall ist, kann eine Veränderung der Nahinfrarot-Absorption in reinem Wasser beobachtet werden.

Die aktuelle Fachliteratur darüber, wie Schall die Mechanismen der Kalkablagerung (Scaling) beeinflussen kann, ist überraschend spärlich [3–6]. Obwohl Schall in Wasser – etwa in Bezug auf Sonar oder die Kommunikation von Meerestieren – gut erforscht ist, mangelt es an Wissen über die chemischen Effekte von Schall. Es existiert deutlich mehr Literatur zu den Auswirkungen elektromagnetischer Pulse auf Lösungen in Wasser, die auf Veränderungen der Partikelladung hinweisen [7–9].

Wasser ist sehr empfindlich gegenüber elektrostatischen Einflüssen. Nach molekularen Vergleichen müsste das Wassermolekül H_2O eigentlich bei -40 bis -60 °C sieden, ähnlich wie H_2S und H_2Se . Aufgrund der energiereichen Wasserstoffbrückenbindungen siedet Wasser jedoch bei $+100$ °C und weist somit eine sehr hohe Wärmekapazität auf. Diese Wasserstoffbrückenbindungen sind extrem kurzlebig, mit einer Lebensdauer von etwa 0,1 bis 1 Pikosekunde, was etwa 100.000.000.000 Bindungen pro Sekunde oder 10^{36} Bindungen pro Sekunde für 18 Gramm Wasser (1 Mol) ergibt.

Diese „Bindungen“ sollten eher als elektrostatische Wechselwirkungen zwischen Molekülen denn als klassische chemische Bindungen betrachtet werden. Neben der polaren Natur des Wassermoleküls sind diese kurzlebigen Wasserstoffbrückenbindungen einer der Hauptgründe für die einzigartigen und anomalen Eigenschaften von Wasser [1,2].

Überarbeitete Laborexperimente CLEAN AMTech 2024

Basierend auf den Erfahrungen aus dem vorherigen AMTech-Projekt wird eine Reihe von Tests und Messungen durchgeführt, um festzustellen, welche Effekte in Wasserproben und den daraus resultierenden Ausfällungen auftreten. Diese umfassen:

- Akustische und magnetische Charakterisierung des AMTech 100-Emitters
- Tropfentrocknungsmorphologie (Kaffeering-Effekt) auf SiO₂ (Glas), einer Titanplatte und einer Stahlplatte
- NIR- und IR-Analyse von Wasserproben, sowohl Leitungswasser als auch Milli-Q-Ultrapure-Wasser
- DLS-Zeta-Potenzialanalyse von Leitungswasser zur Überwachung von Änderungen der Partikelladung
- Die Experimente wurden in 1-Liter-Flaschen und/oder 250-ml-Pyrex-Glasgefäßen durchgeführt. Entweder der AMTech 100- oder 700-Emitter wurde am Behälter angebracht.
- Die Expositionszeit variierte zwischen 30 Minuten, 1 Stunde und 24 Stunden.

Charakterisierung AMTech 100

Gerätebeschreibung

Das kleinere Modell AMTech 100 ist für den Haushaltsgebrauch vorgesehen. Es besteht aus einem einzelnen Emitter mit einer integrierten Elektronikbox, die über einen Standardtransformator mit Strom versorgt wird. Das Gerät wird an der Wasserleitung (vorzugsweise Stahl) montiert und mit zwei Kabelbindern befestigt.



Abb. 1: AMTech 100 Akustik-/Elektrogerät. Links: auf Wasserleitungen montiert; rechts: Einzelgerät

Schallemission von AMTech 100

Der ausgesendete Schall wird mit einem kalibrierten USB-C-Mikrofon vom Typ Dayton Audio IMM-6C gemessen und mithilfe einer Tonaufnahmesoftware auf einem Samsung-Android-Gerät aufgezeichnet. Der erfasste Frequenzbereich liegt zwischen 40 Hz und 20.000 Hz.

Die Schallaufnahme erfolgt durch Platzierung des Mikrofons direkt auf dem Emitter. Zusätzlich wird eine Aufnahme des Geräts in einer INOX-Stahlflasche und in einer Kupferflasche durchgeführt, um den Schall im Inneren einer Wasserleitung zu simulieren.

Die Kupfer- und Stahlflaschen unterscheiden sich in ihrer Größe, weisen jedoch eine vergleichbare Wandstärke auf. Es werden Aufnahmen sowohl in der Luft als auch in wassergefüllten Flaschen gemacht.

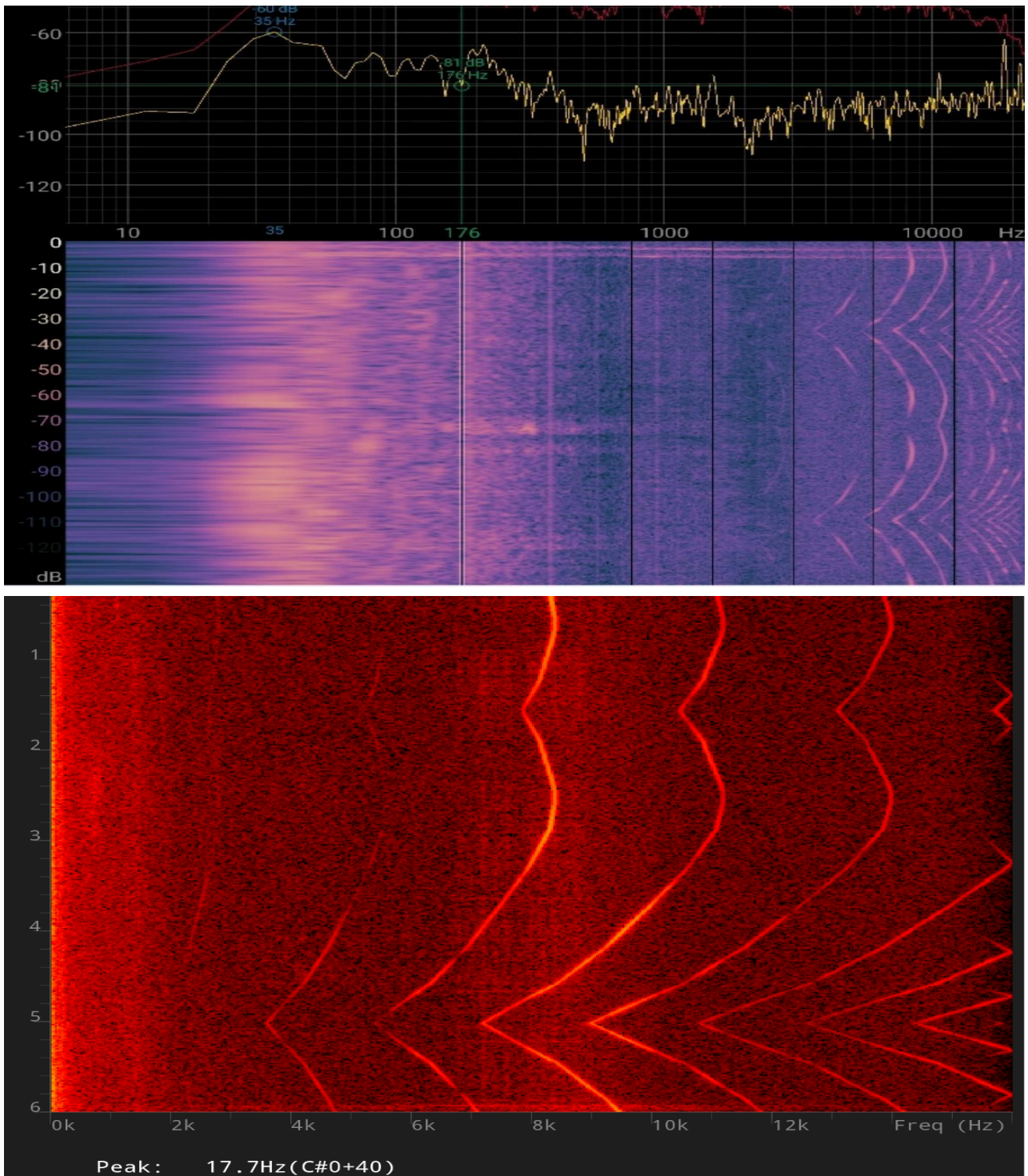


Abb. 2: Tonaufnahmen von AMTech 100 in Luft. Oben: das gesamte Frequenzspektrum einschließlich Hintergrundgeräusche. Mitte: Schallpegel (dB). Unten: Frequenz (0–20 kHz) über die Zeit (Sekunden). Ein Mehrfrequenzsignal unterschiedlicher Intensität und einer Wiederholungsperiode von etwa 8 Sekunden ist zu beobachten. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine schnellere zugrundeliegende Fluktuation vorhanden ist, da die Zeitauflösung begrenzt ist.

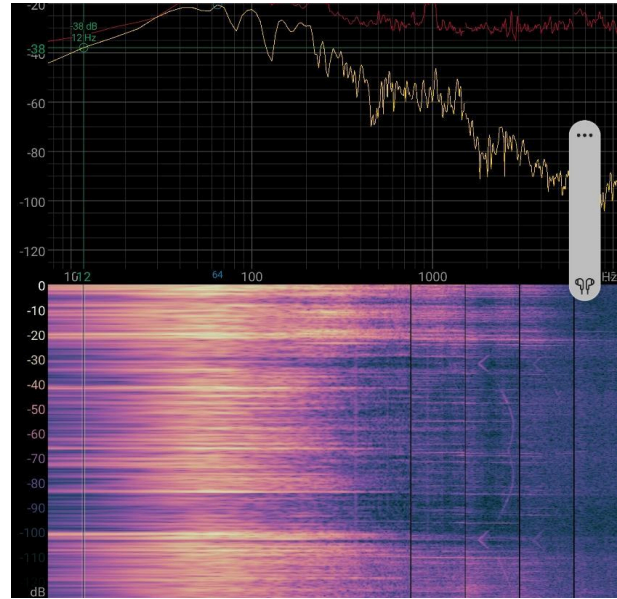
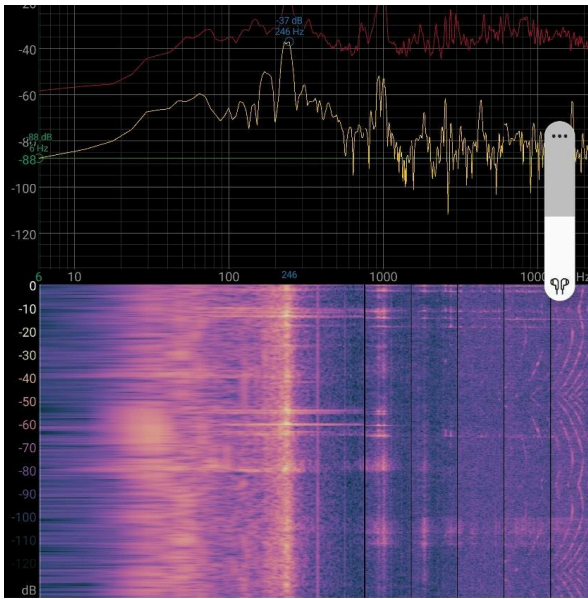


Abb. 3: links: AMTech 100 auf leerer 1-Liter-Stahlflasche, rechts: AMTech 100 auf wassergefüllter 1-Liter-Stahlflasche

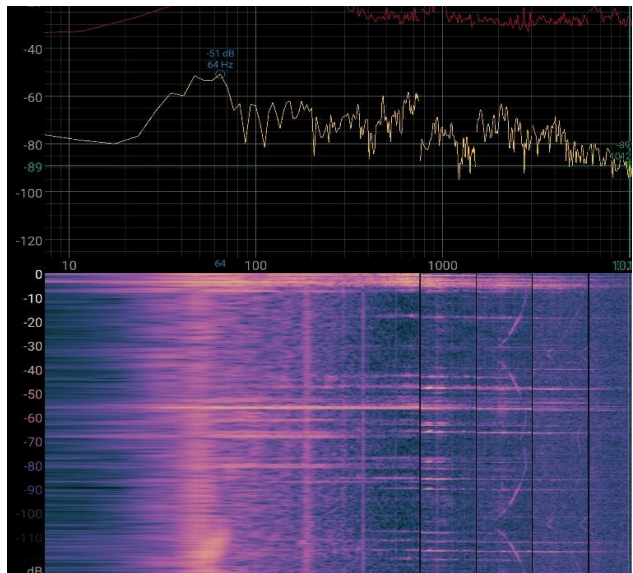
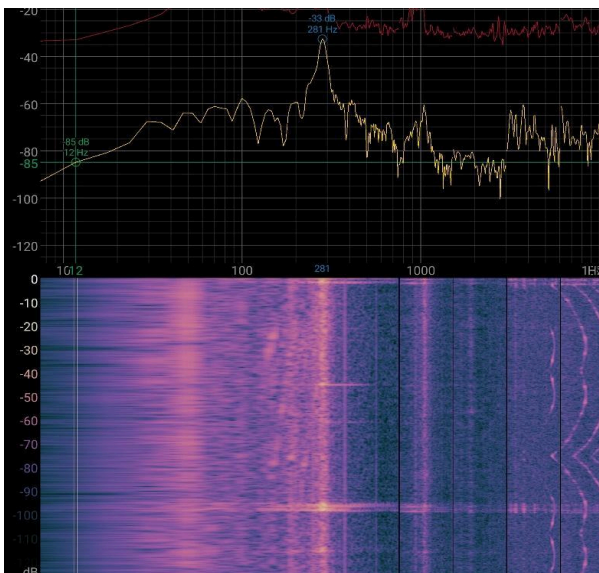


Abb. 4: links: AMTech 100 auf leerer 0,5-Liter-Kupferflasche, rechts: AMTech 100 auf wassergefüllter 0,5-Liter-Kupferflasche

Anmerkungen:

Direktmessung: Ein deutlich periodisches Tonsignal wird erkannt; die Zeitdauer beträgt etwa 5–6 Sekunden mit einem Einbruch nach ca. 3 Sekunden. Die Frequenz steigt von 2500 Hz auf über 15.000 Hz an. Es sind 7–8 harmonische Bänder mit einem Abstand von ca. 1000–1500 Hz sichtbar.

Leere Flaschen: Das periodische Signal ist bei der Direktmessung klar erkennbar, jedoch in den Flaschen weniger deutlich. Es gibt einen kleinen Unterschied zwischen Stahl und Kupfer, der aber auf unterschiedliche Flaschengrößen zurückzuführen sein könnte.

Wassergefüllte Flaschen: Das Wasser dämpft das Signal, aber die Periode bleibt sichtbar, wenn auch mit einer Verschiebung von 10.000 Hz auf etwa 2500 Hz. Die Ergebnisse könnten jedoch durch die mit Aluminiumfolie abgedeckte Mikrofonkapsel beeinflusst sein (das Mikrofon ist nicht wasserdicht), was das Signal möglicherweise abgeschwächt hat.

Fazit:

Das AMTech 100-Gerät erzeugt ein deutliches akustisches Signal, multifrequenz und mit Obertönen, das periodisch auftritt und in der Luft, leeren sowie wassergefüllten Metallflaschen messbare Variationen zeigt. Obwohl das Signal im Wasser gedämpft wird, bleibt das periodische Signal erhalten, was auf eine Übertragung durch verschiedene Medien hinweist. Das Gerät erzeugt wirksam akustische Felder, die möglicherweise die Wasserstruktur beeinflussen.

Elektromagnetische Emission von AMTech 100

Die elektromagnetische Emission wird mithilfe des Nahfeldsensors eines Android-Smartphones gemessen.

Die Emission wird dargestellt als X- (rot), Y- (grün), Z-Achse (blau) und Gesamtfeld (weiß), wobei die Y-Achse die Feldstärke in Mikrottesla (μT) und die X-Achse die Zeit in Sekunden zeigt.

Das elektromagnetische Feld schwankt zwischen 90 und 100 μT mit einer Periode von 6–7 Sekunden, ähnlich dem akustischen Signalverlauf.



Abbildung 5: Elektromagnetische Emission in x-, y- und z-Koordinaten. Periodisch wechselnde Emission mit einer maximalen Feldstärke von etwa 100 μTesla , wobei die z-Koordinate etwa 70 μT beträgt. Zum Vergleich: Das Erdmagnetfeld liegt bei etwa 40–50 μT .

Fazit:

Das Gerät emittiert ein schwaches, periodisches elektromagnetisches Feld mit einem Muster, das dem akustischen Ausgang ähnlich ist. Die Emission ist zwar schwach ausgeprägt, könnte jedoch einen Einfluss auf die Ausrichtung von Partikeln oder auf Hydrathüllen im Wasser haben.

Thermische Emission des AMTech 100-Ermitters (Wärme)

Die thermische Emission wird mit einer handelsüblichen FLIR ONE PRO Wärmebildkamera aufgezeichnet. Dies könnte Aufschluss über eventuelle Wärmeentwicklungen im System geben.

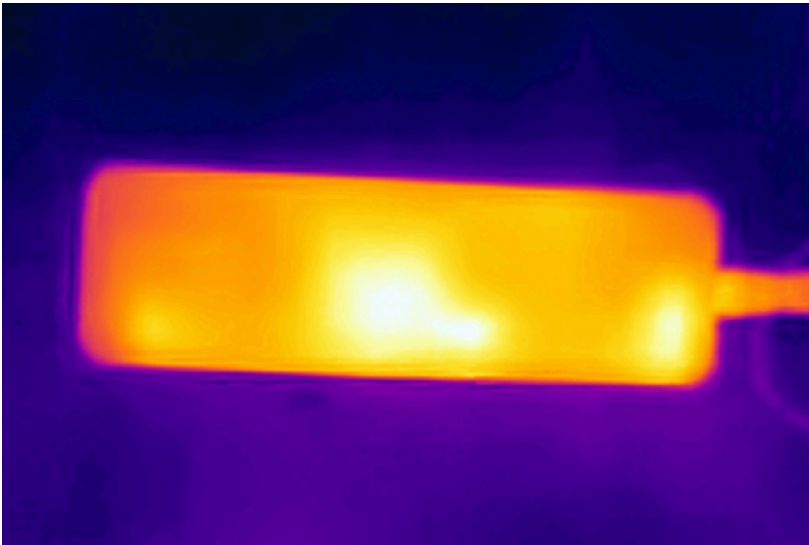


Abb. 6: Wärmebild von AMTech 100 im Betrieb (FLIR ONE PRO). Das Bild zeigt drei ausgeprägte Hotspots, also Wärmequellen.

Fazit:

Die Wärmebilder zeigen drei klar abgegrenzte Hotspots, was auf lokalisierte elektrische Aktivität im Inneren des AMTech-Geräts hindeutet. Allerdings ist die erzeugte Wärme sehr gering und stellt vermutlich nicht den Hauptwirkmechanismus des Geräts dar.

Charakterisierung von AMTech 700

Gerätebeschreibung:

Das größere AMTech 700-Gerät ist für die Industrie und größere Wasserwerke konzipiert. Sie besteht aus einer separaten Elektronikeinheit und ein oder zwei Emittierköpfen (Emitter Heads). Die Signalstärke ist erheblich stärker als bei den AMTech 100-Geräten. Unten ist ein montierter AMTech 700 mit Emittierköpfen zu sehen.



Abb. 7: AMTech 700 mit zwei Emittierköpfen und separater Elektronikeinheit. Dieses Modell stammt aus der Zeit vor AMTech 100. Das Elektronik-Steuergerät wurde nicht geöffnet, um das geistige Eigentum des Unternehmens zu schützen.

Schallemission von AMTech 700

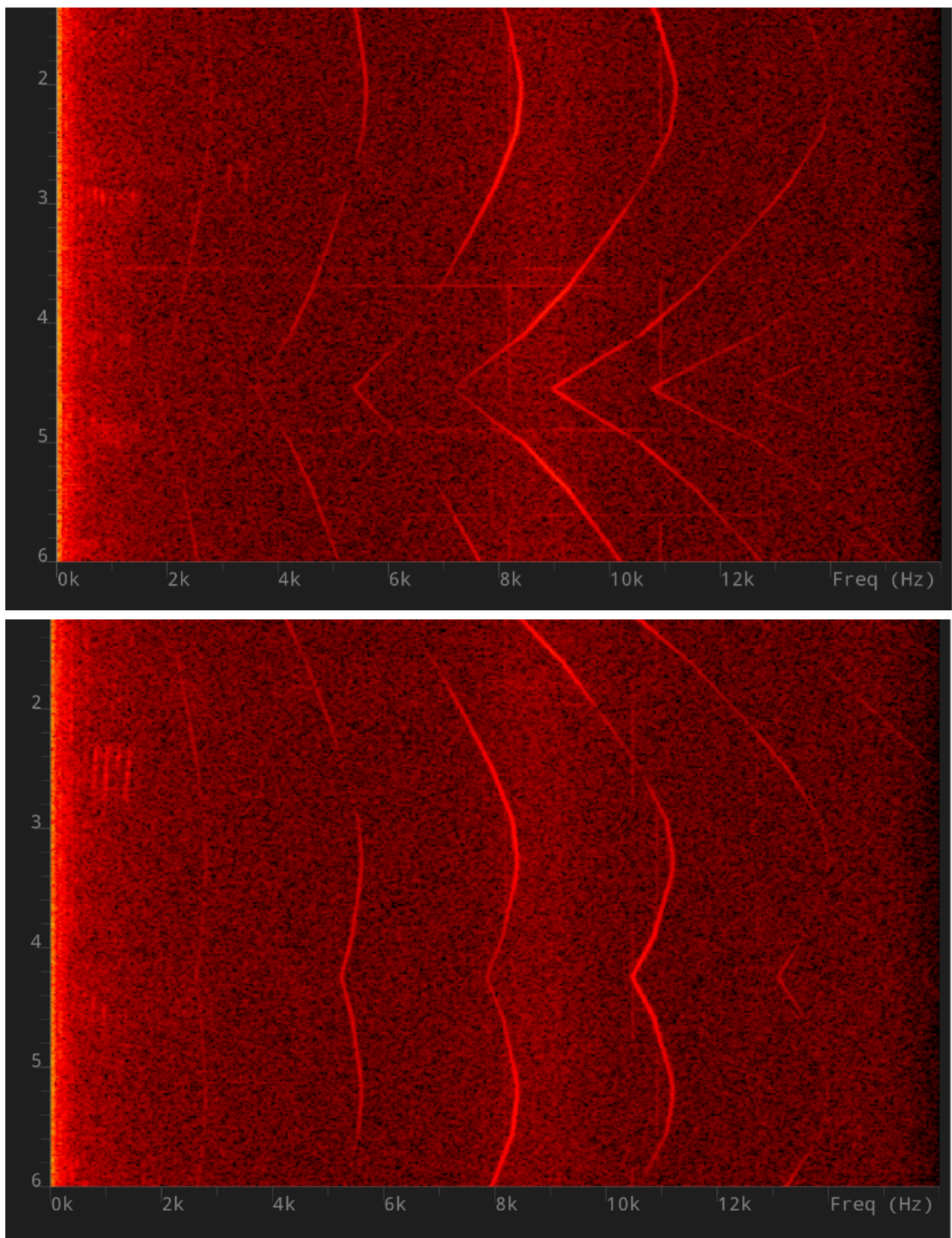


Abb. 8: Schallmessung in freier Luft durch Platzieren des Mikrofons direkt auf dem Emittierkopf. Wie beim AMTech 100 ist ein sehr ähnliches periodisches Signal zu erkennen, mit mehreren Obertönen im Abstand von jeweils 2000 Hz.

AMTech 700

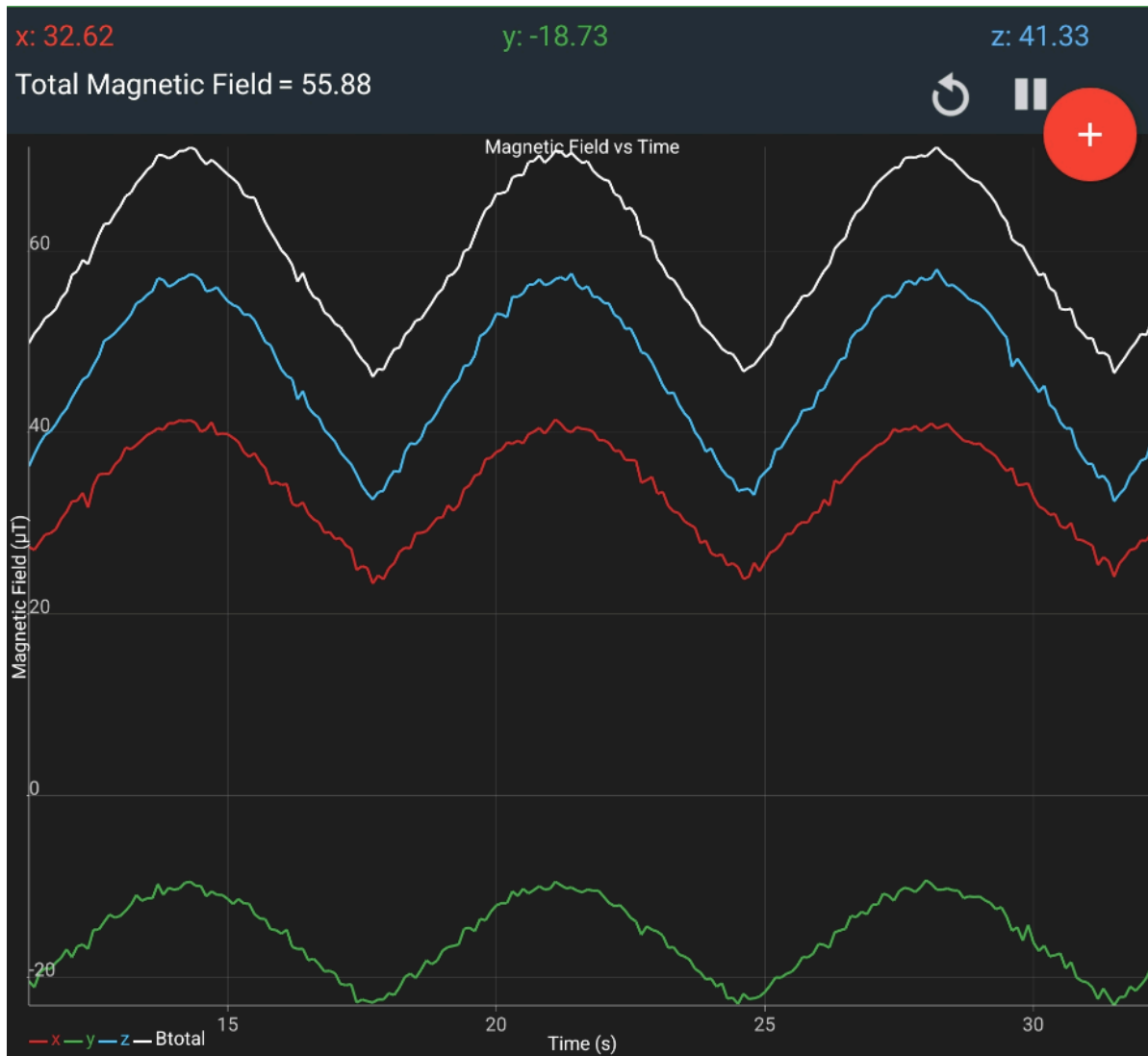


Abb. 9: Elektromagnetische Emission von AMTech 700. Es ist eine periodische, alternierende Emission zu sehen, mit einer maximalen Feldstärke von etwa $70 \mu\text{Tesla}$ und einem Durchschnitt von ca. $55 \mu\text{Tesla}$. Zum Vergleich: Das natürliche Erdmagnetfeld liegt bei etwa $40\text{--}50 \mu\text{Tesla}$.

Fazit:

Das AMTech 700-Gerät zeigt ein ähnliches Muster akustischer und elektromagnetischer Emission wie AMTech 100, jedoch mit höherer Intensität, was seine Eignung für industrielle Anwendungen untermauert.

pH-Wert, Leitfähigkeit, Gesamtsalzgehalt und Sauerstoffgehalt von Leitungswasser vor und nach AMTech-Behandlung

Beim Messen des pH-Werts von reinem Wasser ist es zwingend erforderlich, eine speziell dafür vorgesehene pH-Elektrode zu verwenden, da reine Wasserproben nur geringe Mengen an Salzen enthalten und somit eine sehr niedrige Pufferkapazität aufweisen, was bei einer normalen pH-Elektrode zu einem konstanten Drift führt.

pH-Wert, Leitfähigkeit, Gesamtsalzgehalt wurden mit einem digitalen UEOMUL-pH-Messgerät gemessen (5-in-1).

Der Sauerstoffgehalt wurde mit einem tragbaren digitalen Luqueeg-Messgerät für Sauerstoff im Wasser gemessen (Temperaturkompensation).

Probe	pH	Leitfähigkeit in mS/cm	Gesamtzahl gelöste Salze (ppm)	Sauerstoffgehalt stationär (mg/l)	Sauerstoffgehalt gerührt (mg/l)
Referenz-Leitungswasser	7,41	846	423	4,6	8,9
AMTech 100, 1 Std.	7,51	848	424	6,0	8,9

Abb. 10: pH-Wert, Leitfähigkeit, TDS (Gesamtzahl der gelösten Feststoffe inkl. Salze), Sauerstoffgehalt des Referenz-Leitungswassers und AMTech-100-behandeltes Wasser (1 Stunde).

Fazit:

Leichte Veränderungen im pH-Wert und im Sauerstoffgehalt wurden im behandelten Wasser festgestellt. Auch wenn diese nicht als chemisch transformierend gelten, stützen sie die Hypothese, dass die Wasserstruktur oder die Gaslöslichkeit beeinflusst wird.

Zeta-Potenzial und Leitfähigkeit von AMTech 700

Die Ladung von Partikeln in Flüssigproben wird durch das Lichtstreuerverhalten dieser Partikel mit Hilfe einer Elektrozelle gemessen. Während des Messvorgangs induzieren die Elektroden eine magnetische Ladung auf die Partikel in Lösung, wodurch diese zwischen den Elektroden hin- und herbewegt werden. Die seitliche Bewegung der Partikel beeinflusst die Lichtstreuung in der Lösung. Eine höhere Partikelladung führt zu einer stärkeren Bewegung und somit zu einer stärkeren Lichtstreuung in der Wasserprobe.

Kleinere Partikel streuen Licht anders als größere, weshalb auch Informationen über die Partikelgröße aus der Messung gewonnen werden können. Diese Messung ist jedoch nur sinnvoll, wenn genügend Partikel in Lösung verbleiben, um die dynamische Lichtstreuung zu beeinflussen. Sehr klare Lösungen oder solche mit ausfallenden Partikeln enthalten nicht genügend Verunreinigungen, um die Lichtstreuung zu beeinflussen, und liefern daher keine aussagekräftigen Ergebnisse.

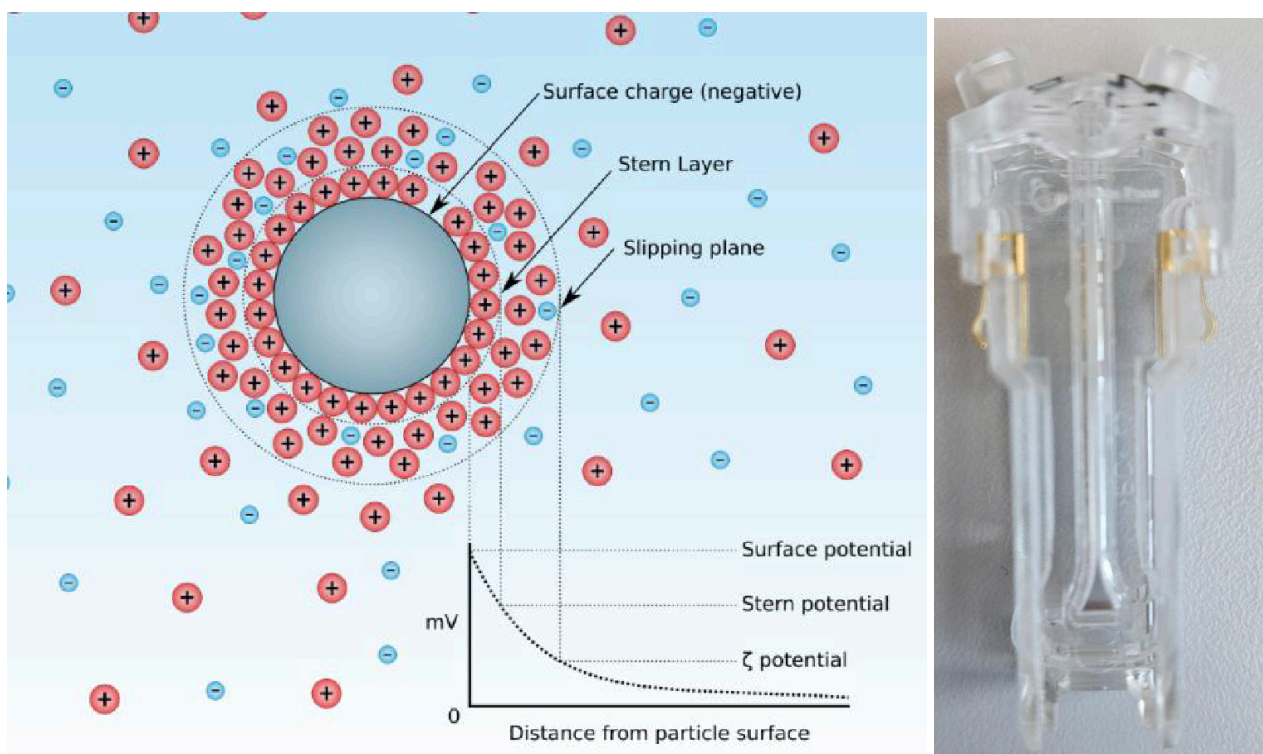


Abbildung 11: Links: Schematische Darstellung des Zeta-Potenzials eines Partikels. Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Zeta_potential; Rechts: Cuvette mit Elektroden auf beiden Seiten zur Bewegung der Partikel von Malvern Panalytical.

Die Leitungswasserprobe wurde in Einweg-Glasvials (20 ml) gefüllt. Die Wasserprobe mit AMTech 700 wurde 1 Stunde vor der Messung behandelt. Um zu überprüfen, ob die Messungen bei höherer Partikeldichte aussagekräftiger sind, wurde eine zweite Reihe von Proben mit ca. 1 mg Calcit-Kristallen versetzt („gespiked“).

Jede Messung dauerte 10 Minuten. Alle Messungen wurden mit einem Anton Paar Litesizer 500 bei 23 °C und einem Probenvolumen von 2 ml durchgeführt. Jeder Messwert stellt einen Durchschnitt von 200 Einzelmessungen dar.

Probe	Zeta-Potenzial [mV]	Standardabweichung [mV]	Elektrophoretische Mobilität [$\mu\text{m}^*\text{cm}/\text{Vs}$]	Leitfähigkeit [mS/cm]
Leitungswasser	-12,3	1,2	-0,9599	0,749
Leitungswasser mit Calcit	-15,0	0,7	-1,1678	0,750
AMTech 700	-10,1	0,8	-0,7861	0,751
AMTech 700 mit Calcit	-13,8	0,8	-1,0718	0,750

Abb. 12: Zeta-Potenzial von Leitungswasser nach 1-stündiger Behandlung mit AMTech 700. Man beachte die Veränderung in Ladung und elektrophoretischer Mobilität, jedoch nicht in der Leitfähigkeit.

Fazit:

Ein moderater Rückgang des Zeta-Potenzials im AMTech-behandelten Wasser deutet auf eine Reduktion der Partikeloberflächenladung hin. Dies könnte zu einer verminderten Partikelaggregation und damit zu weniger Kalkablagerungen führen, was die zentrale Entkalkungshypothese unterstützt.

Tropfen-Trocknungsmorphologie (Kaffeering-Effekt)

Wenn ein Wassertropfen verdunstet, fällt die in ihm enthaltenen Ionen und gelösten Stoffe aus und bilden Kristallisierungsringe, während das Wasser zurückgeht. Das Muster hängt von den Kristallisationsdynamiken ab – und Änderungen der Teilchenladung können in diesen Trocknungsmustern erkannt werden. Dieses Phänomen ist als Kaffeering-Effekt bekannt.

Die Methode liefert qualitative Einblicke und kann als Feldstudie mit einfacher Ausrüstung durchgeführt werden: einem USB-Mikroskop, zwei Objektträgern und einer 10 µl Pipette.

Der Effekt hängt auch von der Oberfläche ab, auf der die Tropfen platziert werden – elektrostatische Eigenschaften, hydrophile/hydrophobe Eigenschaften und Leitfähigkeit spielen dabei eine wichtige Rolle.

10-µl-Wassertropfen AMTech 100-behandeltes Wasser (1 Stunde) auf einer Titanplatte

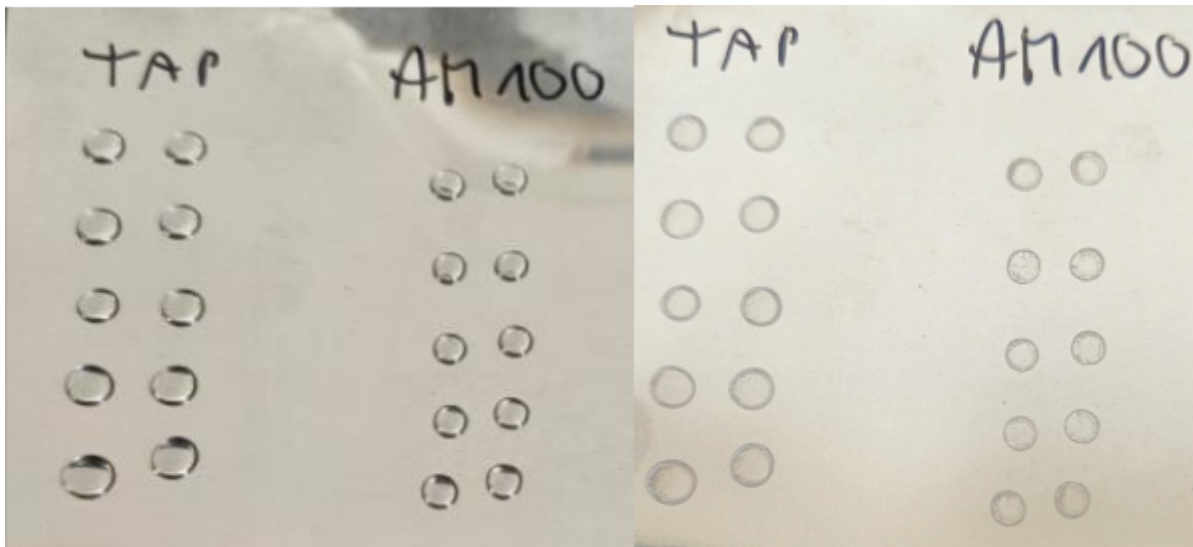


Abbildung 13: 10 µL Wassertropfen von AMTech 100-behandeltem und unbehandeltem Wasser auf einer Titanplatte. Links: Wassertropfen. Rechts: dieselben Tropfen nach dem Trocknen.

Es ist zu erkennen, dass der AMTech-behandelte Tropfen einen kleineren Durchmesser hat als die Kontrollprobe, was auf eine veränderte Oberflächenspannung gegenüber der Titanplatte hinweist.

10- μ L-Wassertropfen AMTech 100-behandeltes Wasser (1 Stunde) auf Objektträgern

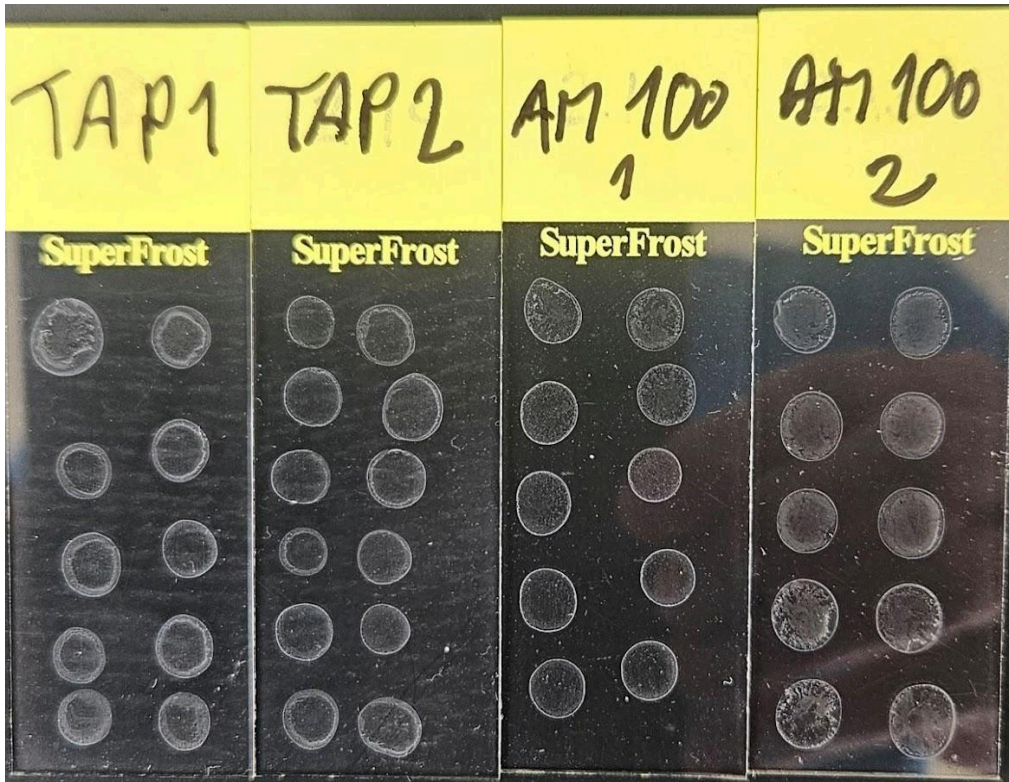


Abbildung 14: 10 μ L Wassertropfen von Referenzwasser (linke zwei Reihen) und AMTech 100-behandeltem Wasser (rechte zwei Reihen). Die Unterschiede sind mit bloßem Auge schwer zu erkennen.

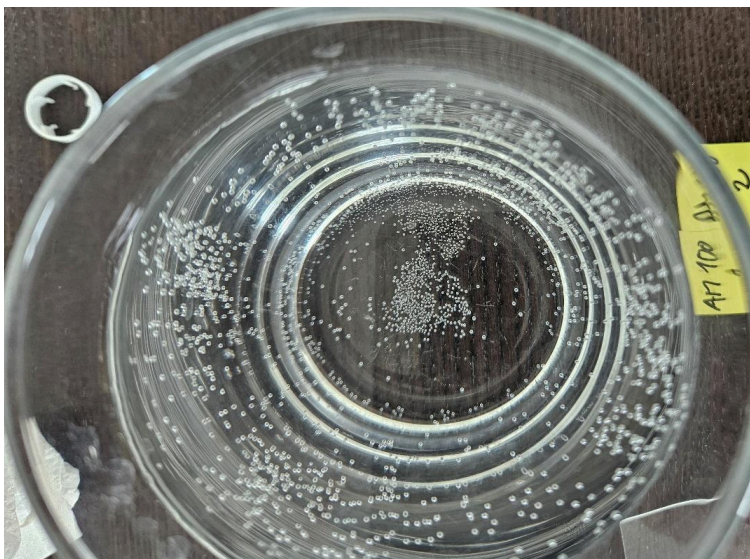


Abb.15: Beobachtung eines Abdrucks des AMTech 100-Emitters auf der Innenseite eines Glases (Heimexperiment). Die Blasen an der Innenseite bildeten die Kontur des Emitters ab, der außen am Glas positioniert war.

Mikroskopaufnahmen einzelner Tropfen auf Objektträgern

Beim Betrachten des getrockneten Tropfens mit einem 200-fach DinoLite USB-Mikroskop lassen sich einige Hinweise auf Veränderungen in der Trocknungsmorphologie erkennen, wenn auch nicht so deutliche Unterschiede wie bei der Betrachtung ganzer Tropfen. Unten sind zwei Bilderserien zu sehen: oben Referenzwasser, unten AMTech-behandeltes Wasser.

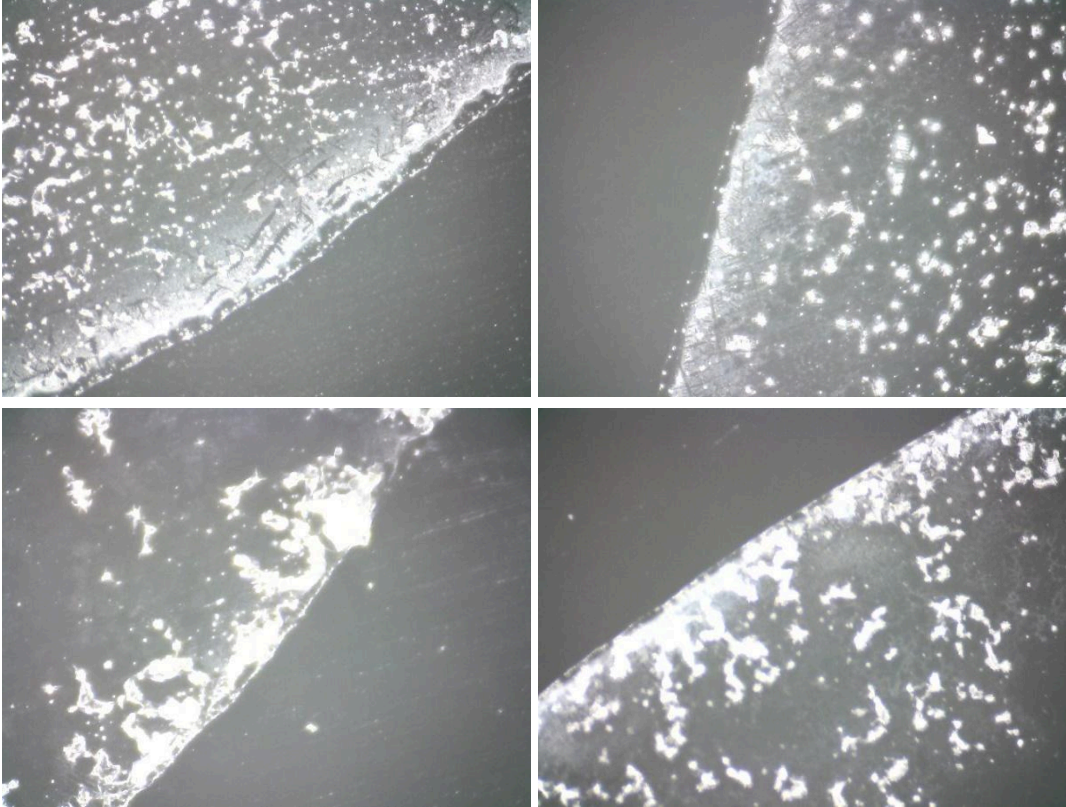


Abbildung 16: Oben: Getrockneter 10 μ l Tropfen von Referenzwasser. Unten: Getrockneter 10 μ l Tropfen nach 1 Stunde Behandlung mit AMTech 100.

2 Liter Verdunstungswasser - Trockenrückstand

Eine weitere Methode besteht darin, 2 Liter AMTech-behandeltes Wasser und 2 Liter unbehandeltes Referenz-Leitungswasser zu verdunsten und die Veränderungen im Trockenrückstandsbild zu beobachten. Dabei zeigte sich nach der Verdunstung im Topf ein deutlicher Unterschied in der Textur und Körnung des Trockenrückstands zwischen behandeltem und unbehandeltem Wasser:



Abb. 17: Links: Trockenrückstand in einem Stahltopf von 2 Litern unbehandeltem Leitungswasser. Rechts: Trockenrückstand im Topf von 24 Stunden AMTech 700-behandeltem Leitungswasser. Die Gleichmäßigkeit des Trockenrückstands bei AMTech-behandeltem Wasser fällt deutlich auf.

Fazit:

Kleine Unterschiede in den Trocknungsmustern deuten auf Veränderungen in der Oberflächeninteraktion oder der Verteilung der Partikelladung hin. Eine Veränderung der Morphologie ist beim Trockenrückstand der größeren 2-Liter-Wasserprobe sichtbar. Es ist ebenfalls erkennbar, dass Unterschiede in den Ausfällungseigenschaften durch die Oberfläche beeinflusst werden, auf der die Wasserprobe ausfällt. So kann die elektrische Leitfähigkeit der Titanscheibe im Vergleich zu den isolierenden Eigenschaften von Glas eine Rolle spielen. Blasenmuster am Boden des Glases, die Abdrücke des Geräts bilden, könnten ebenfalls auf eine Feldstrukturierung oder einen lokalen Ladungseinfluss hinweisen.

Obwohl die Methode qualitativ ist, deutet der Kaffeeringeneffekt auf eine allgemein veränderte Ausfällungsmorphologie nach der Behandlung hin.

NIR-Spektroskopie von ultraschallbehandeltem Wasser

Einige kommerzielle Entkalkungsgeräte basieren auf Schallabstrahlung, jedoch ist der Wirkmechanismus dieser Geräte noch nicht vollständig verstanden. Ihre Wirkung auf gelöstes CO₂ und die daraus resultierenden pH-Änderungen kann eine Schlüsselrolle spielen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist ihre mögliche Wirkung auf die Wassermoleküle selbst. Wir schlagen diese NIR-Methode als Werkzeug vor, um grundlegende Veränderungen im Wasser zu untersuchen und als Ergänzung zu Analyseverfahren für Entkalkungstechnologien. Diese Methode wird in der Lebensmittelindustrie zur Qualitätsbestimmung von z. B. Milchprodukten, Bier, Wein usw. eingesetzt.

Im IR-Spektrum entspricht diese Schwingung den Vibrationen der atomaren O-H-Bindung innerhalb einzelner Wassermoleküle und ist im Bereich von 3000 bis 3400 cm⁻¹ zu sehen. Durch die Verwendung der zweiten Ordnung der Vibration im NIR-Bereich werden harmonische Oszillationen zwischen Molekülen beobachtet, die Informationen über die Wechselwirkung des Wassers mit seiner Umgebung enthalten – z. B. sekundäre Clusterbildung um Gase und Ionen wie Ca²⁺ und Mg²⁺.

Ziel des Experiments war es, mit Hilfe der Nahinfrarotspektroskopie (NIR) die Eigenschaften von Leitungswasser zu vergleichen, das folgenden Behandlungen unterzogen wurde:

1. Ultraschallbecken entgast (blau)
2. Vakuum-entgast (schwarz)
3. AMTech-Gerät basierend auf Schall (grün)
4. Referenz-Leitungswasser (rot)

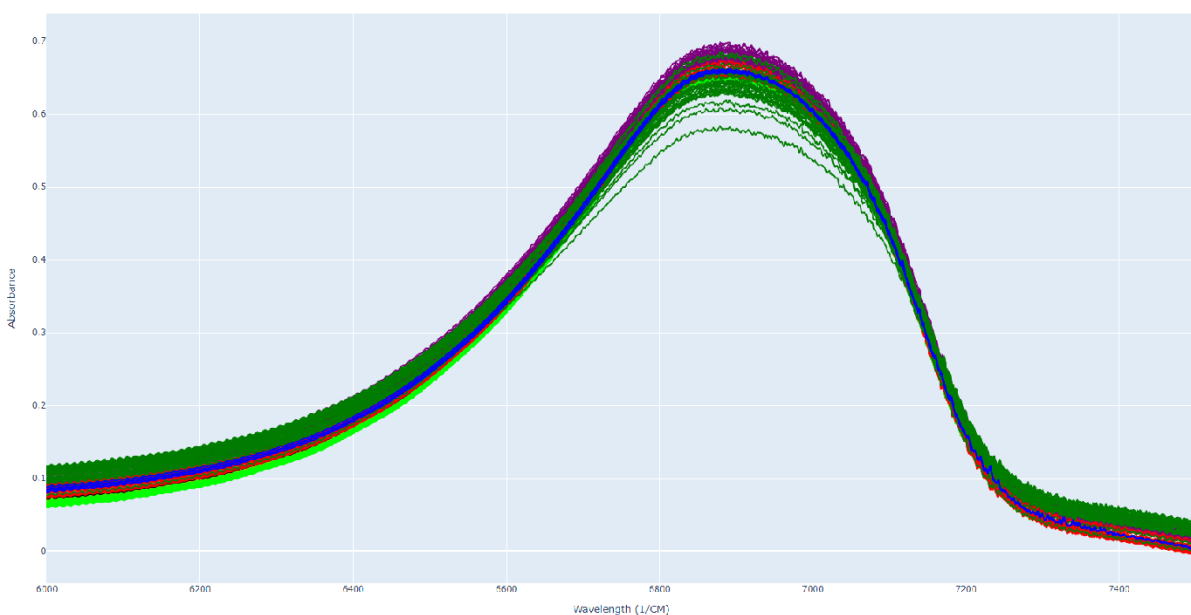
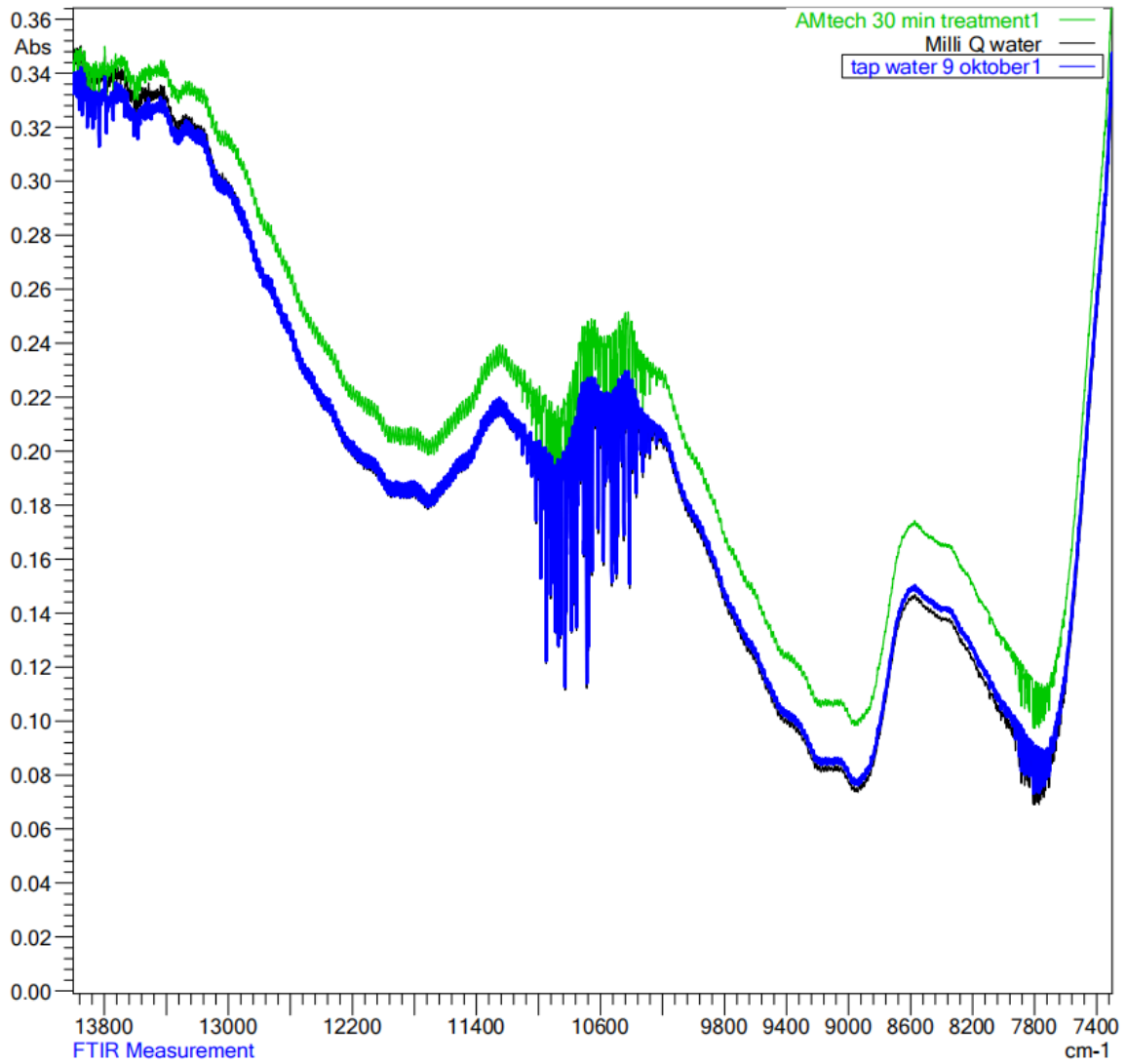


Abb. 18: Rohdaten des Spektrums (6000 bis 7400 cm⁻¹) – der Bereich enthält die zweite Harmonische der O-H-Bindungsschwingung. Rot: Leitungswasser, Blau: Leitungswasser im

Ultraschallbad, Grün: Leitungswasser mit AMTech-Behandlung, Schwarz: vakuum-entgastetes Referenzwasser (schwer zu erkennen, da es unter den anderen blauen Linien liegt).

Mehrere wiederholte Experimente lieferten überraschende Ergebnisse und zeigten eine deutliche Veränderung der zweiten Harmonischen der O-H-Bindung. Fast alle mit AMTech behandelten Wasserproben wiesen eine geringere Absorption auf, sogar noch niedriger als die entgasten Proben. Im Folgenden werden mehrere Messreihen an verschiedenen Wasserproben (Leitungswasser und Milli-Q Ultra-Reinwasser) dargestellt, die der AMTech-Schallbehandlung ausgesetzt wurden.



C:\LabSolutions\LabSolutions\IR\Data\Data27.ispd
C:\LabSolutions\LabSolutions\IR\Data\AMtech 30 min treatment1.ispd
C:\LabSolutions\LabSolutions\IR\Data\tap water 9 oktober1.ispd

FTIR Measurement

Abb. 19: Einfluss der akustischen/elektrischen Pulse von AMTech 700 auf NIR-Schwingungsbanden in Leitungswasser vs. Milli-Q-Wasser vs. AMTech-behandeltem Leitungswasser (Runde 2, Juli 2024)

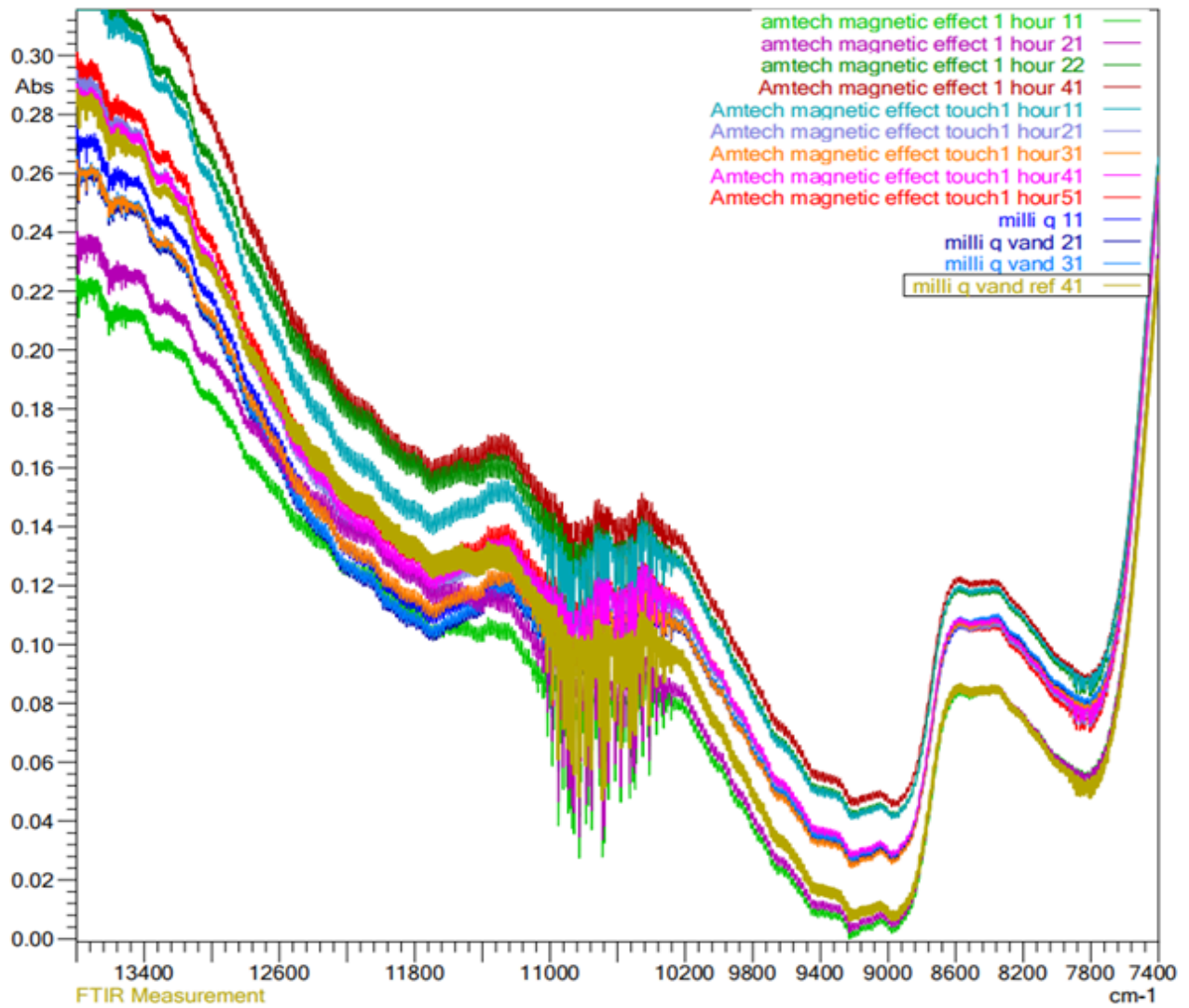


Abb. 20: NIR-Spektroskopie von ultrapurem Milli-Q-Wasser, behandelt mit AMTech 700 – Durchgang 3, November 2024. Nach der AMTech-Behandlung zeigt sich eine größere Messstreuung, während die unbehandelte Milli-Q-Wasserprobe weniger Variation aufweist.

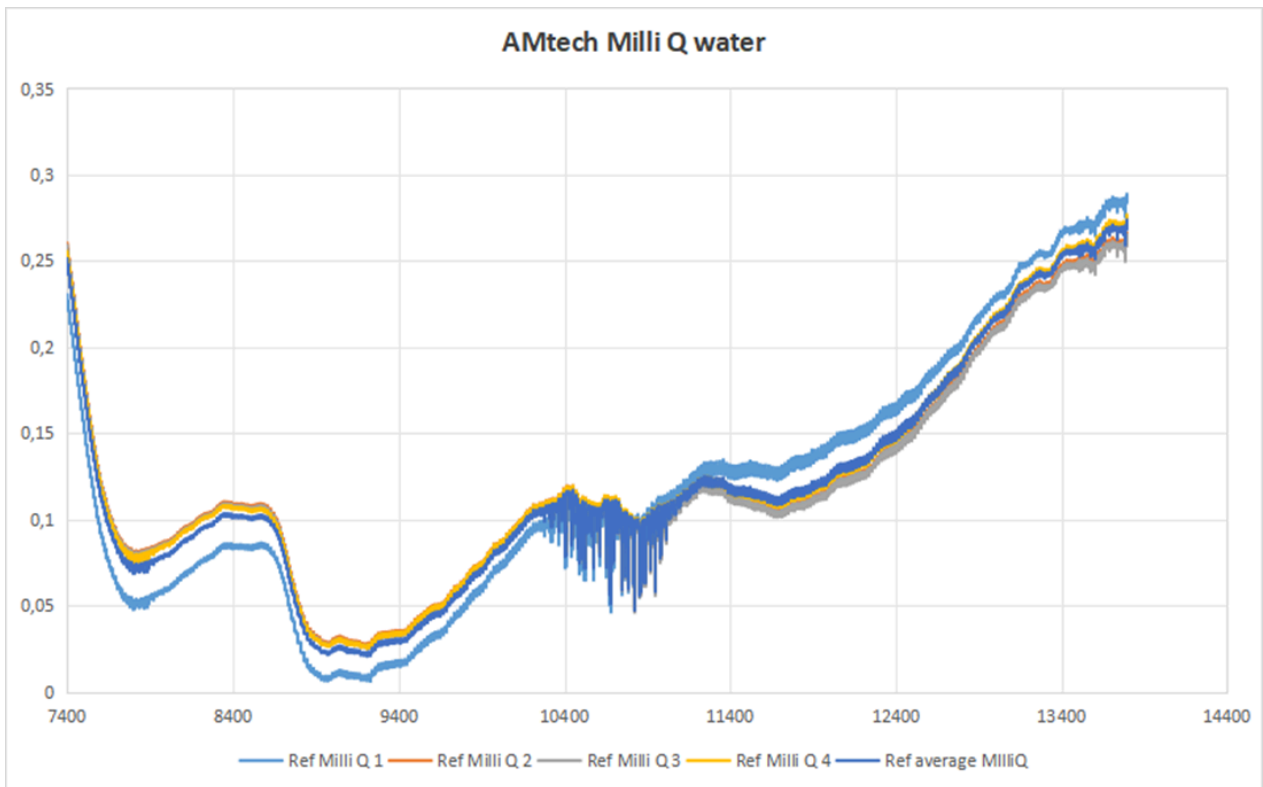
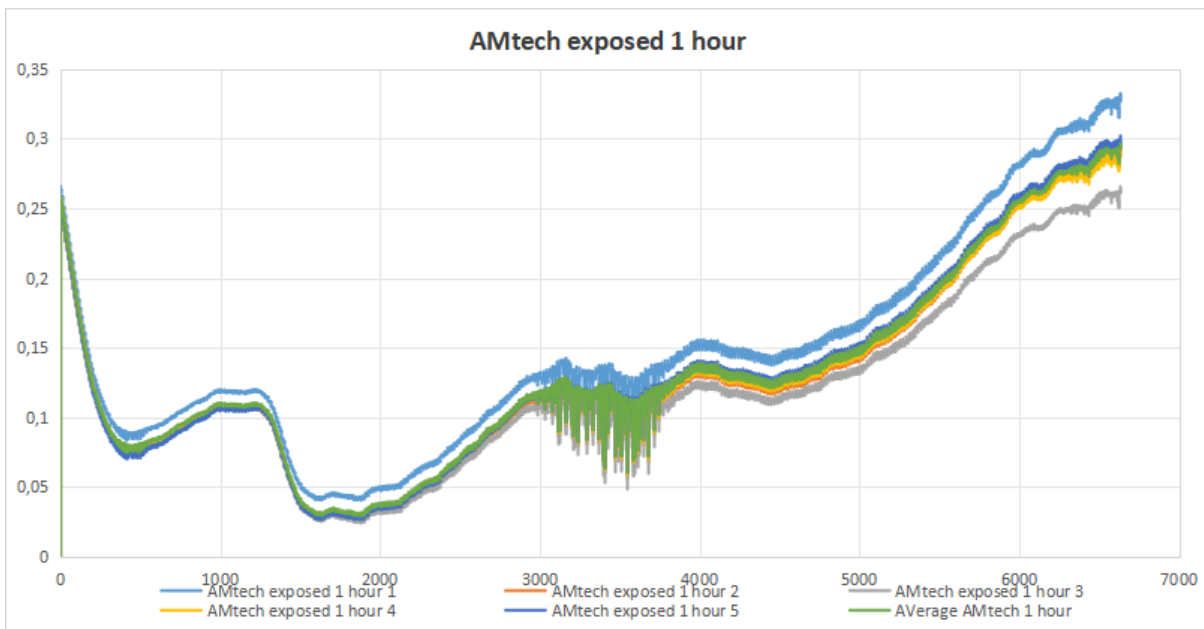


Abb. 21: Schwankungen der Nahinfrarot-Schwingungsbanden im Milli-Q-Wasser (4 Referenzmessungen)



Fig

Abb. 22: NIR-Absorption von AMTech 700 – 1 Stunde Exposition, Emitter in direktem Kontakt mit dem Wassertank – 5 Messungen

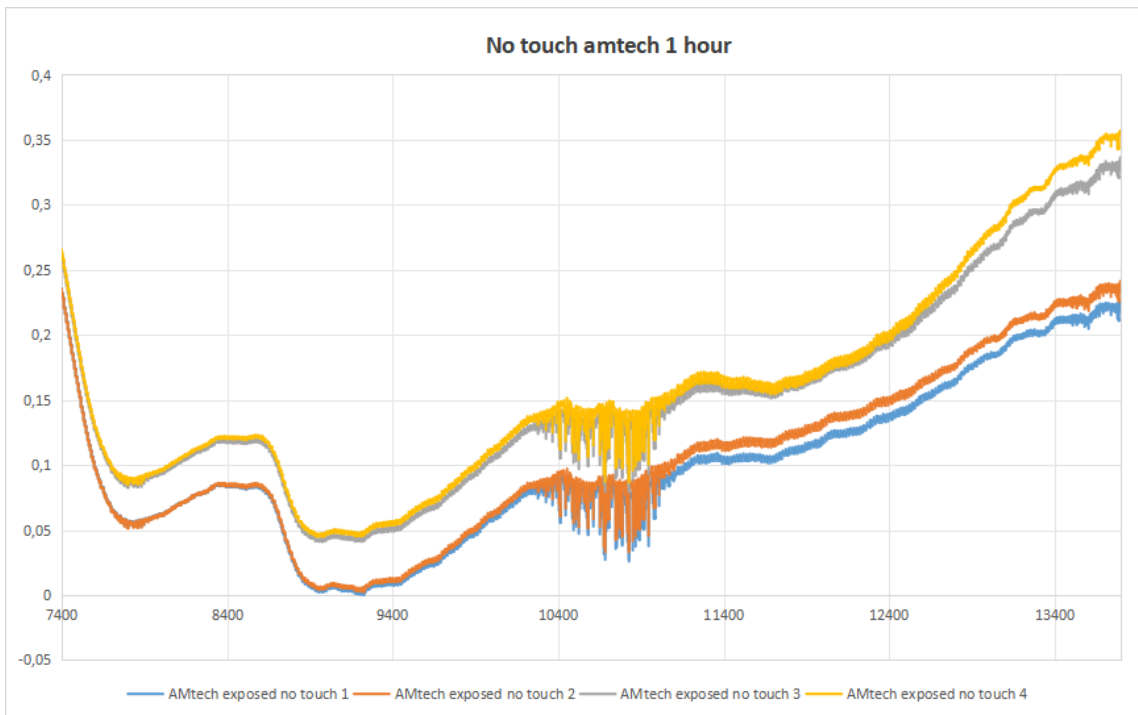


Abb. 23: Nahinfrarot-Absorption bei 1-stündiger Exposition ohne direkten Kontakt zum Wasserbehälter (Abstand 2 cm, 4 Messungen)

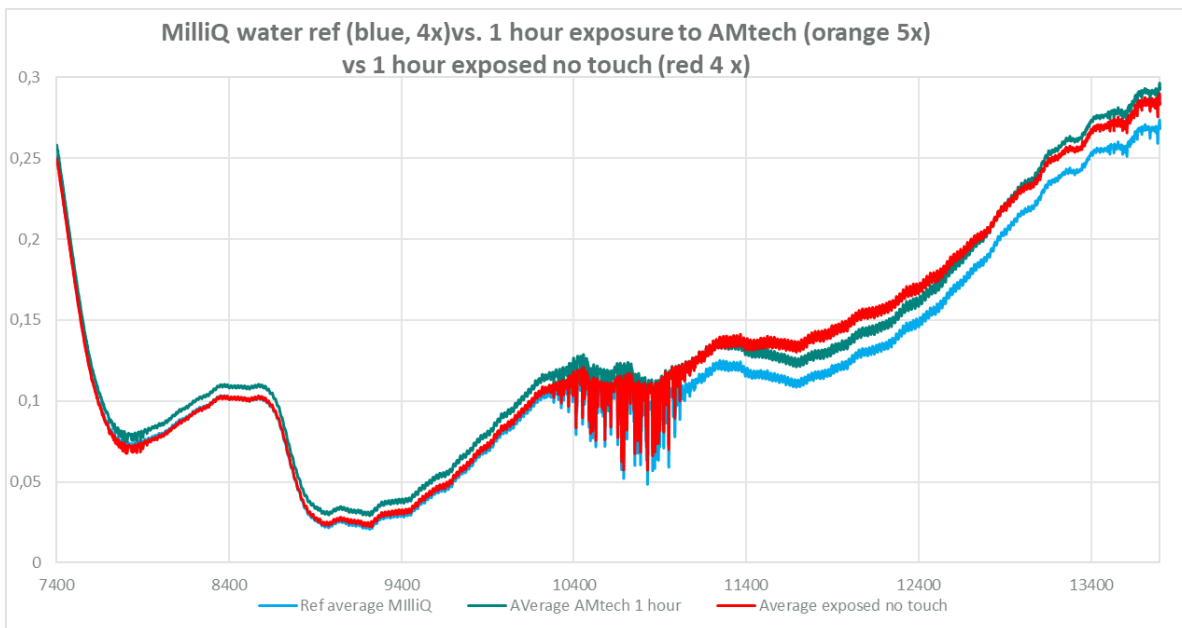


Abb. 24: Nahinfrarot-Absorption bei 1-stündiger Exposition ohne direkten Kontakt zum Wasserbehälter (Abstand 2 cm, 4 Messungen)

Fazit:

NIR-Daten zeigen Verschiebungen in den harmonischen Schwingungen der OH-Bindung, was auf Veränderungen in den Wechselwirkungen zwischen Wassermolekülen hindeutet. Diese spektralen Verschiebungen deuten auf eine strukturelle Umorganisation im Wasser hin, die möglicherweise mit dem Entkalkungseffekt in Zusammenhang steht. Bei dieser Messmethode besteht immer eine gewisse Unsicherheit, doch selbst unter Berücksichtigung dessen muss die Schlussfolgerung

gezogen werden, dass ein sich wiederholendes Muster erkennbar ist, das die Wirkung des AMTech-Schallsystems auf das Wasser zeigt.

Schlussfolgerung im Überblick:

Diese experimentelle Untersuchung des AMTech-Wasserbehandlungssystems hatte das Ziel, dessen Wirkmechanismus sowie die Auswirkungen auf Wasserstruktur, Kalkbildung und physikalisch-chemische Eigenschaften aufzuklären. Es wurden mehrere Analysemethoden eingesetzt, darunter Spektroskopie (NIR, FTIR), Mikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie (SEM), pH-/Leitfähigkeitsmessungen und Zeta-Potenzial-Analysen.

Die wichtigsten Ergebnisse lauten wie folgt:

Akustische und elektromagnetische Charakterisierung:

Sowohl das AMTech 100-Gerät als auch 700 zeigten ein konstantes, periodisches Mehrfrequenz-Schallsignal auf.

Messungen der elektromagnetischen Felder zeigten moderate Wechselspannungsfeldstärken, insbesondere beim AMTech 700.

Veränderungen in Wasserchemie und physikalischen Eigenschaften:

Bei den behandelten Proben wurde eine leichte Erhöhung des pH-Werts und des gelösten Sauerstoffs beobachtet. Wahrscheinlich ist dies auf eine verstärkte CO₂-Ausgasung zurückzuführen.

Die elektrische Leitfähigkeit und die gesamtgelösten Stoffe blieben weitgehend unverändert, was auf eine minimale Ionenauslösung oder -auslaugung hinweist.

Zeta-Potenzial-Messungen zeigten eine Verringerung der Nettoladung der Partikel im AMTech-behandelten Wasser, was potenziell das Kalkfällungsverhalten beeinflussen könnte.

Mikroskopie und Tropfentrocknungsmorphologie (Kaffeering-Effekt):

Unterschiede im Trocknungsmuster von Wassertropfen deuten auf verändertes Partikelverhalten oder eine veränderte Oberflächenspannung hin.

Die mit AMTech behandelten Tropfen zeigten eine größere Ausbreitung auf Titan- und Glasoberflächen, was auf veränderte Wechselwirkungen an den Grenzflächen hindeutet.

NIR-Spektroskopie:

Die NIR-Ergebnisse zeigten Verschiebungen in der zweiten Harmonischen der O-H-Streckschwingung, was auf mögliche strukturelle Veränderungen in Wasserclustern nach der Behandlung hinweist.

Dies unterstützt die Hypothese, dass das AMTech-Gerät möglicherweise das Wasserstoffbrückennetzwerk des Wassers stört, was die Löslichkeit und Kalkbildung beeinflussen könnte.

Weitere Schlussfolgerungen und abschließende Bemerkungen:

Das AMTech-Wasseraufbereitungssystem zeigt subtile, aber konsistente Einflüsse auf die Wasserstruktur, die Partikelladung und möglicherweise das Kristallisationsverhalten. Obwohl sich die standardmäßigen chemischen Eigenschaften weitgehend nicht verändern, scheint es, dass die akustischen Harmonischen, die das Gerät erzeugt, die Hydrathüllen und Grenzflächeneigenschaften im Wasser beeinflussen. Diese Veränderungen können Kalkablagerungen reduzieren und den Wasserfluss in chemiefreien Anwendungen verbessern.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass von den AMTech-Emitter auch Schall oberhalb von 20 kHz im Ultraschallbereich ausgeht, da diese Frequenzen nicht gemessen wurden. Höhere Frequenzen dürften wahrscheinlich zusätzlich beitragen, da sie energiereicher sind.

Abschließende Bemerkungen: Dieser Bericht liefert überzeugende Belege dafür, dass das AMTech-System messbare Veränderungen der Wassereigenschaften verursacht. Obwohl weitere quantitative und praxisnahe Validierungen erforderlich sind, zeigt die Technologie ein großes Potenzial als nachhaltige Lösung für die chemiefreie Wasserbehandlung. Zukünftige Forschung sollte das mechanistische Verständnis vertiefen und standardisierte Testprotokolle entwickeln, um eine breitere Anwendung zu unterstützen.

Perspektiven und weitere Experimente zur AMTech-Technologie:

Obwohl das AMTech-Gerät die grundlegende Wasserchemie nicht unmittelbar, sondern nur subtil verändert, ist der Einfluss harmonischer Schwingungen auf die Mikrostruktur und die Grenzflächeneigenschaften bemerkenswert und sollte weiter untersucht werden.

- Tests zur Oberflächenspannung (Kontaktwinkelmessungen) könnten durchgeführt werden, um mögliche Veränderungen in der Wechselwirkung des Wassers mit Oberflächen – etwa von Filtern oder Wasserleitungen aus unterschiedlichen Materialien – nachzuweisen.
- Beobachtung der elektrostatischen Reaktion von Wasser auf Hochspannungs-Elektrofelder: Verändert sich diese durch die AMTech-Behandlung? Dies ließe sich möglicherweise durch die Ablenkung eines Wasserstrahls messen, da Wasser aufgrund seiner polaren Molekülstruktur elektrostatisch empfindlich ist.
- Raman-spektroskopische Untersuchungen (SERS) von verdampften Rückständen aus Wasserproben könnten helfen, die zugrunde liegenden Mechanismen der beobachteten Veränderungen in der Ausfällung besser zu verstehen.
- Langzeit-Feldtests in realen Rohrleitungssystemen von Gebäuden sollten durchgeführt werden, um die Laborergebnisse mit tatsächlicher Entkalkungspraxis zu vergleichen.

Diese Studien können helfen, das wissenschaftliche Verständnis der AMTech-Wirkweise zu vertiefen und eine mögliche Zertifizierung des Systems zu unterstützen – was wiederum eine breitere Anwendung in der chemiefreien Wasserbehandlung fördern könnte.

Ein kurzer Fachartikel wurde bereits teilweise auf Grundlage dieser Projektarbeit veröffentlicht [11].

Danksagung:

Wir danken Clean Cluster (Dänemarks Cluster für Wasser und Umwelt) für die Finanzierung dieses Projekts.

Ein besonderer Dank geht an AMTech / Kalkbrecher Poul Rasmussen und Nick Traulsen für finanzielle Unterstützung, Offenheit und Interesse am Projekt.

Vielen Dank an die CERE-Gruppe des Fachbereichs Chemieingenieurwesen der DTU sowie an Professor Georgios Kontogeorgis für die Bereitstellung von Labor- und Messtechnik.

Quellenangabe:

1. Martin Chaplin water website; hydrogen bonds
https://water.lsbu.ac.uk/water/water_hydrogen_bonding.html
2. Vasily Artemov (2021). The Electrodynamics of Water and Ice.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-72424-5>
3. A critical review of the application of electromagnetic fields for scaling control in water systems: mechanisms, characterization, and operation. Lin, L., Jiang, W., Xu, X., & Xu, P. (2020). *Npj Clean Water*, 3(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s41545-020-0071-9>
4. Does Magnetic Treatment of Water Change Its Properties? Ichiro Otsuka and Sumio Ozeki; Department of Chemistry, Faculty of Science, Shinshu University, 3-1-1 Asahi, Matsumoto, Nagano 390-8621, Japan Received: October 27, 2005 *J. Phys. Chem. B*, Vol. 110, No. 4, 2006
5. Ultrasound Technology Integration into Drinking Water Treatment Train. 7. Al-juboori, Raed & Bowtell, Leslie. (2019). [10.5772/intechopen.88124](https://doi.org/10.5772/intechopen.88124).
6. Physical water treatment - this is how it works.. Dr.-Ing. Hartmut Jünke. Booklet
http://cwt-vulcan.co.uk/wp-content/uploads/2020/03/EN_Water_Treatment_Dr_Juhnke.pdf
7. Influence of magnetic field on the precipitation of some inorganic salts. Lundager Madsen, H.E., 1995. *J. Cryst. Growth* 152, 94-100.
8. Magnetically augmented water treatment. S. A. Parsons, S. J. Judd, T. Stephenson, S. Udol, and B. L. Wang. *Process Safety and Environmental Protection*, 75(2):98–104, 1997.
9. A critical review of the application of electromagnetic fields for scaling control in water systems: mechanisms, characterization, and operation. Lu Lin, Wenbin Jiang, Xuesong Xu, and Pei Xu. *Npj Clean Water*, 3(1):25, 2020
10. Water structure, properties and some applications – A review, Georgios M. Kontogeorgis, Andrew Holster, Nomiki Kottaki, Evangelos Tsochantaris, Frederik Topsøe, Jesper Poulsen, Michael Bache, Xiaodong Liang, Nikolaj Sorgenfrei Blom, Johan Kronholm, *Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis*, Volume 6, 2022, 100053, ISSN 2667 3126, <https://doi.org/10.1016/j.ctta.2022.100053>.
11. Can sound stop scaling: a NIR spectroscopy study of ultrasound treated water. Bache, Michael & Appelquist Løge, Isaac. (2024). November 2024 Conference: Heat Exchanger Fouling & Cleaning Conference.