TEKO Schweizerische Fachschule

Diplomarbeit

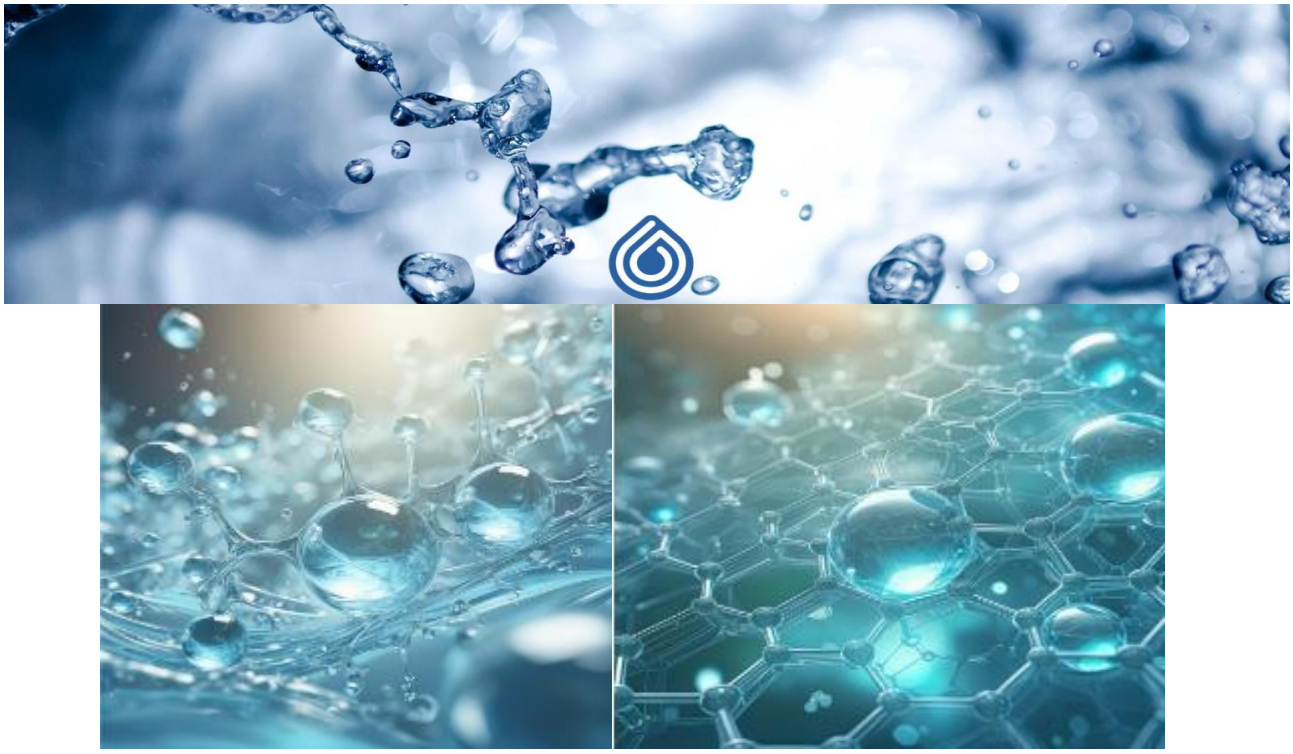


Abbildung 1: Titelblatt

Wasser und elektromagnetische Felder

Experimentelle Untersuchung der elektromagnetischen Wasserbehandlung und ihres Potenzials zur Steigerung der Energieeffizienz

Diplomand: Jaroslav Fabian
Schule: TEKO Bern
Klasse: B-TEU-25-T-a
Ausbildung: Dipl. Energie- und Umwelttechniker/in HF
Jahr: 2026

TEKO Schweizerische Fachschule

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis 2
2. Management Summary 4
2.1 Lebenslauf und Qualifikationsprofil 5
2.2 Wahl des Diplomthemas 6
3. Projektinitialisierung 7
3.1 Pflichtenheft 7
3.2 Aufgabenstellung 10
4. Projektplanung 12
4.1 Vorgehensmodell 12
4.2 Projektstrukturplanung 13
4.3 Projektablaufplanung 14
4.4 Meilensteine 15
4.5 Kommunikationsplanung 15
4.6 Risikoanalyse 16
5. Projektrealisierung - Theoretische Grundlagen 17
5.1 Wasser 17
5.2 Physikalische Eigenschaften von Wasser 19
5.3 Wasserhärte, Calcium und Magnesium 21
5.4 Gefrieren und Kristallisation 22
5.5 Grundlagen des Magnetismus 24
5.6 Grundlagen des Elektromagnetismus 25
5.7 Physikalische Wasserbehandlung mit magnetischen und elektromagnetischen Feldern 27
5.7.1 Magnetische Wasserbehandlung 27
5.7.2 Elektromagnetische Wasserbehandlung 28
5.7.3 Abgrenzung der Statischen magnetischen und elektromagnetischen Wasserbehandlung 30
6. Stand der Forschung 31
6.1 Einleitung 31
6.2 Untersuchungen zu physikalischen Eigenschaften von Wasser 31
6.3 Untersuchungen zur Kristallisation von Calciumcarbonat 33
6.4 Untersuchungen an technischen Wasseranlagen 36
6.5 Ergänzende Untersuchungen von Boson Distribution 37
6.6 Vergleich der Forschungsergebnisse 39

6.7 Zusammenfassung des Forschungsstandes 39
7. Anwendungsmöglichkeiten der elektromagnetischen Wasserbehandlung 40
7.1 Eisflächen und Kältetechnik 40
7.2 HIPPOTRON ICE 42
7.3 Industrielle Wasserkreisläufe HIPPOTRON 46
7.4 Wärmetauscher und Kühlanlagen 49
8. Eigene Untersuchungen und Berechnungen 51
8.1 Zielsetzung und Untersuchungsmethode 51
8.2 Technische Besichtigung der Eisanlage Martigny 52
8.3 Versuchsaufbau und Material für die Wasseruntersuchungen 56
8.4 Durchführung und Messprotokolle in Chur 58
8.5 Eigene thermodynamische Berechnungen 65
9. Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse 67
10. Diskussion 68
11. Wirtschaftlichkeit und Ökologie 69
12. Fazit und Ausblick 71
12.1 Beantwortung der Forschungsfrage 71
12.2 Persönliches Fazit 71
12.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf 72
12.4 Lessons Learned 72
12.5 Reflexion – Weg zum Ziel 72
12.6 Verdankungen 73
13. Eigenständigkeitserklärung 73
14. Verzeichnisse 74
14.1 Literaturverzeichnis 74
14.2 Abbildungsverzeichnis 75
14.3 Tabellenverzeichnis 76
14.4 Quellenverzeichnis 77
14.5 Glossar – Erklärung der Fachbegriffe 78
15. Anhang 80
15.1 Auswertung Energie Quader 24_25 Vergleich 25_26 80
15.2 VUT Protokol 85
15.3 Messprotokoll – Eisfläche Chur 91

2. Management Summary

Diese Diplomarbeit untersucht die elektromagnetische Wasserbehandlung und ihr mögliches Potenzial zur Verbesserung der Energieeffizienz. Im Mittelpunkt steht die Technologie HIPPOTRON beziehungsweise HIPPOTRON ICE, die bei künstlichen Eisflächen sowie in industriellen Wasser- und Kühlkreisläufen eingesetzt wird.
Die Forschungsfrage lautet:

Kann die elektromagnetische Wasserbehandlung messbare Veränderungen bewirken und daraus ein technisch relevantes Potenzial zur Energieeinsparung entstehen?

Zur Beantwortung dieser Frage wurden die physikalischen Eigenschaften des Wassers, die Grundlagen des Elektromagnetismus und verschiedene wissenschaftliche Studien untersucht. Ergänzend wurden bestehende Betriebsdaten aus Eisstadien und industriellen Anlagen ausgewertet sowie eigene praktische Untersuchungen durchgeführt.
Ein wichtiger Teil der Arbeit waren die Besichtigung der Kälteanlage in Martigny und die Messungen im Eisstadion Chur. Zusätzlich wurden unbehandelte und HIPPOTRON-behandelte Wasserproben hinsichtlich ihrer Wasserqualität sowie ihres Gefrier- und Schmelzverhaltens verglichen. Eigene thermodynamische Berechnungen dienten dazu, mögliche Veränderungen des Energiebedarfs beim Gefrieren von Wasser abzuschätzen.
Bei den Wasseruntersuchungen wurden einzelne Unterschiede der Messwerte und des sichtbaren Verhaltens festgestellt. Besonders interessant waren die praktischen Erfahrungen des Eismeisters in Chur. Er berichtete von einer schnelleren Verfestigung des Wassers bei der Eisaufbereitung, einer härter wahrgenommenen Eisoberfläche, weniger Eisabrieb und einem geringeren Pflegeaufwand.
Die ausgewerteten Betriebsdaten und industriellen Fallbeispiele zeigen ebenfalls Hinweise auf mögliche energetische Vorteile. Allerdings wurden teilweise gleichzeitig weitere technische und betriebliche Optimierungen vorgenommen. Deshalb konnten die beobachteten Energieeinsparungen nicht eindeutig der elektromagnetischen Wasserbehandlung zugeordnet werden.
Die Arbeit kommt zum Ergebnis, dass die elektromagnetische Wasserbehandlung ein interessantes technisches Potenzial aufweisen könnte. Die bisherigen Ergebnisse reichen jedoch nicht aus, um einen eindeutigen Wirkmechanismus oder eine bestimmte elektrische Energieeinsparung wissenschaftlich nachzuweisen.
Besonders die Wechselwirkungen zwischen elektromagnetischen Feldern und den molekularen Eigenschaften des Wassers bieten aus meiner Sicht Möglichkeiten für weitere Forschung. Kontrollierte und wiederholbare Labor- und Betriebsmessungen könnten dazu beitragen, dieses Potenzial besser zu verstehen und seine Bedeutung für die Energie- und Umwelttechnik zu beurteilen.

TEKO Schweizerische Fachschule

2.1 Lebenslauf und Qualifikationsprofil

Personalien



Name	Fabian
Vorname	Jaroslav
Adresse	Route de Châtaignier 26 1926 Fully
Tel. :	+4176 620 22 35 +420736443655
E-Mail:	lionni@seznam.cz fabianjaroslav1982@gmail.com
Geburtsdatum	31. 5. 1982
Nationalität	Tschechisch

Berufliche Tätigkeiten

2021–2026 – Verantwortlicher Metallbau
Sébastien Cheseaux SA, Spezialarbeiten
Verantwortung für Arbeiten und Projekte im Bereich Metallbau sowie praktische Umsetzung technischer Konstruktionen. Verantwortung für Arbeiten im Bereich Energie und Umwelt beim Bau einer neuen Werkstatt.
2018–2021 – Mechaniker und Schweisser
ASTAG Revisionen / General Electric
Tätigkeiten im Bereich Kraftwerksanlagen, unter anderem im Pumpspeicherkraftwerk Nant de Drance sowie in den Kernkraftwerken Leibstadt und Beznau.
2016–2017 – Anlagen- und Apparatebauer / Schweisser
Hoval AG / Kelag Systems AG
2013–2015 – Schlosser / Schweisser
Bürgin AG / Schneider Stahlbau AG / PM Personal GmbH
2003–2013 – Schlosser / Schweisser / Monteur
Tätigkeiten unter anderem für M.U.T. Spiegelau, Caterpillar und Siemens.

Weiterbildung

2015	**Soudeur Technolog,IWS**
2016	**Sichtprüfung 2**

Schweisskurse

- MMA
- TIG (WIG)
- CO2

Schulbildung

2024-2026	Tekofachhochschule Bern, Energie und Umwelt
2021–2023	BFO Visp Metallbauer
2000 – 2003	Hotelfachschule
1993 – 2000	Gymnasium, Tschechien

1988 – 1993	Primarschule, Tschechien

PC

MS Office, Internet	Gut

Langues

Deutsch	B2
Tschechisch	Muttersprache
Englisch	B2
Französisch	B2

2.2 Wahl des Diplomthemas

Die Wahl des Diplomthemas entstand durch einen persönlichen Kontakt zu einer Person aus dem Umfeld der Firma Boson Distribution in Tschechien. Im Rahmen eines anschliessenden Treffens wurde mir die Technologie HIPPOTRON vorgestellt und deren Funktionsweise sowie mögliche Anwendungsbereiche erläutert.
Besonders interessant war für mich die Anwendung der Technologie bei künstlichen Eisflächen. Nach Angaben des Unternehmens wird HIPPOTRON ICE bereits in mehreren Eisstadien eingesetzt, darunter auch Anlagen in der Schweiz. Durch die elektromagnetische Behandlung des Wassers sollen dessen Eigenschaften so beeinflusst werden, dass sich Vorteile bei der Eisproduktion und beim Betrieb der Kälteanlage ergeben können.
Gleichzeitig bestand seitens des Unternehmens Interesse an einer Verbindung zwischen Tschechien und der Schweiz, insbesondere für die Bereiche HIPPOTRON ICE und industrielle Anwendungen der HIPPOTRON -Technologie. Dadurch erhielt ich die Möglichkeit, mich intensiver mit der Technologie und ihren möglichen Einsatzgebieten auseinanderzusetzen.
Da ich im Rahmen meines Studiums an der TEKO Fachhochschule Bern den Schwerpunkt Energie und Umwelt gewählt habe und durch meine berufliche Tätigkeit bereits Erfahrungen mit technischen Anlagen und Energiesystemen sammeln konnte, weckte insbesondere die mögliche energetische Wirkung mein Interesse.
Aus den ersten Gesprächen entstanden verschiedene technische und wissenschaftliche Fragen. Kann eine elektromagnetische Behandlung tatsächlich messbare Veränderungen im Wasser hervorrufen? Lassen sich Auswirkungen auf den Gefrierprozess nachweisen? Können dadurch bei der Herstellung und Erhaltung von Eisflächen Energieeinsparungen erzielt werden? Und lassen sich mögliche Effekte auch auf industrielle Wasserkreisläufe, Kühlanlagen oder Wärmetauschersysteme übertragen?
Diese Fragen bildeten die Grundlage für die Wahl meines Diplomthemas. Besonders ausschlaggebend war die Möglichkeit, die Technologie nicht nur theoretisch zu beschreiben, sondern deren Wirkung anhand eigener Untersuchungen und Messungen kritisch zu überprüfen. Die Diplomarbeit verbindet dadurch mehrere Bereiche der Ausbildung Energie und Umwelt: Wasserphysik, Elektromagnetismus, Kälte- und Energietechnik, industrielle Prozesse, Energieeffizienz und experimentelle Messtechnik.
Ziel ist es, die Technologie ergebnisoffen zu untersuchen. Herstellerangaben werden dabei nicht als wissenschaftlich nachgewiesene Tatsachen vorausgesetzt, sondern mit dem aktuellen Forschungsstand sowie mit eigenen experimentellen Ergebnissen verglichen.

3. Projektinitialisierung

3.1 Pflichtenheft

Das Pflichtenheft bildet die inhaltliche und organisatorische Grundlage der vorliegenden Diplomarbeit. Es definiert die Ausgangslage, die Problemstellung sowie die Zielsetzung und grenzt den Untersuchungsumfang klar ab. Dadurch wird festgelegt, welche Fragestellungen im Rahmen der Arbeit bearbeitet und welche Bereiche bewusst nicht untersucht werden.
Das Pflichtenheft schafft damit einen verbindlichen Rahmen für die Planung, Durchführung und spätere Bewertung der Diplomarbeit.

3.1.1 Vorstellung der Firmen

BOSON DISTRIBUTION SE

Boson Distribution SE ist ein Unternehmen mit Sitz in Prag, Tschechien. Das Unternehmen beschäftigt sich mit Technologien zur physikalischen Behandlung von Wasser und deren Anwendung in energie- und umwelttechnischen Systemen.

Ein Schwerpunkt des Unternehmens liegt auf der Technologie HIPPOTRON®. Diese wird für verschiedene wasserführende technische Systeme angeboten. Zu den genannten Anwendungsbereichen gehören Heiz- und Kühlkreisläufe, Systeme zur Energieerzeugung und Energieverteilung, industrielle Produktionsanlagen sowie weitere Anlagen mit Prozesswasser.

Nach Angaben des Unternehmens wird bei der HIPPOTRON®-Technologie strömendes Wasser elektromagnetischen Impulsen beziehungsweise elektromagnetischen Feldern im nichtionisierenden Bereich ausgesetzt. Die Behandlung erfolgt dabei ohne direkte Zugabe chemischer Stoffe.

Als mögliche technische Anwendungsbereiche nennt der Anbieter unter anderem die Reduktion mineralischer Ablagerungen, die Verbesserung des Wärmeübergangs in Wärmetauschern und die energetische Optimierung wasserführender Systeme.

Im industriellen Bereich bestehen verschiedene Referenzanwendungen. Dazu gehören unter anderem Kühlkreisläufe und wärmetechnische Anlagen. Die vom Unternehmen veröffentlichten Ergebnisse dieser Anlagen werden im weiteren Verlauf der Diplomarbeit separat untersucht und kritisch bewertet.

HIPPOTRON® ICE

HIPPOTRON® ICE ist eine von Boson Distribution SE entwickelte Anwendung der HIPPOTRON®-Technologie für künstliche Eisflächen.

Das System behandelt das für den Aufbau und die Pflege der Eisfläche verwendete Wasser vor dessen Aufbringung auf die Eisfläche. Nach Angaben des Herstellers basiert das Verfahren auf kontrollierten elektromagnetischen Impulsen, die auf das strömende Wasser einwirken.

Ziel der Technologie ist es, den Prozess der Eisbildung zu beeinflussen und dadurch sowohl die Eigenschaften der Eisfläche als auch den Energiebedarf der Kälteanlage zu optimieren.

Nach Angaben des Herstellers befindet sich HIPPOTRON® ICE seit 2013 auf dem Markt und wurde schrittweise auf verschiedenen Eisflächen in Tschechien, Slowakei und in der Schweiz

eingesetzt. Die Technologie wurde seither weiterentwickelt und wird vom Anbieter aktuell als vierte Entwicklungsgeneration bezeichnet.

Als mögliche Vorteile nennt der Hersteller unter anderem ein schnelleres Gefrieren des behandelten Wassers, eine widerstandsfähigere und gleichmässigere Eisfläche sowie die Möglichkeit, die Temperatur der gekühlten Betonplatte bei vergleichbarer Eisoberflächentemperatur anzuheben. Eine höhere Betriebstemperatur der Kälteanlage könnte zu einer Reduktion des elektrischen Energiebedarfs führen.

Eine für diese Diplomarbeit besonders interessante Referenz befindet sich in Chur in der Schweiz. HIPPOTRON® ICE wurde dort Anfang 2025 installiert. Nach Angaben des Betreibers konnte die Solltemperatur der Betonplatte nach Inbetriebnahme des Systems um 2 °C angehoben werden. Gleichzeitig wurden unter anderem ein schnelleres Gefrieren des aufgetragenen Wassers und eine geringere Schnee- beziehungsweise Abriebbildung auf der Eisfläche beobachtet.

3.1.2 Ausgangslage

Die Steigerung der Energieeffizienz technischer Anlagen gewinnt aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht zunehmend an Bedeutung. Besonders Kälteanlagen, Eisstadien und industrielle Kühlkreisläufe benötigen erhebliche Mengen elektrischer Energie. Technologien, die den Energiebedarf solcher Systeme reduzieren können, sind deshalb für den Bereich Energie und Umwelt von besonderem Interesse.

Ein möglicher Ansatz ist die elektromagnetische Behandlung von Wasser. Die Technologien HIPPOTRON und HIPPOTRON ICE werden für unterschiedliche wasserführende Systeme eingesetzt. HIPPOTRON ICE konzentriert sich auf die Herstellung und Pflege künstlicher Eisflächen, während weitere Anwendungen insbesondere in industriellen Heiz- und Kühlkreisläufen sowie bei Wärmetauschern zu finden sind.

Nach Angaben des Technologieanbieters soll die elektromagnetische Behandlung bestimmte Eigenschaften und das Verhalten des Wassers beeinflussen. Bei Eisflächen sollen dadurch unter anderem der Gefrierprozess und die Eisqualität beeinflusst sowie eine energetische Optimierung der Kälteanlage ermöglicht werden.

Für die vorliegende Diplomarbeit stehen bereits verschiedene Informationen und Messdaten zur Verfügung. Dazu gehören Laboruntersuchungen zu thermophysikalischen Eigenschaften von behandeltem und unbehandeltem Wasser sowie Betriebs- und Energieverbrauchsdaten einer Schweizer Eisfeldanlage. Die Laboruntersuchung betrachtet unter anderem Dichte, Schmelzenthalpie, Verdampfungsenthalpie und Wärmekapazität. (VUT protokol 2018 Blue Boson, siehe Anhang 15.1) Die vorhandenen Betriebsdaten ermöglichen zusätzlich einen Vergleich des Energieverbrauchs verschiedener Betriebsperioden. (Auswertung Energie Quader 24_2, siehe Anhang 15.2)

Diese Ausgangslage bildet die Grundlage, um die elektromagnetische Wasserbehandlung und ihr mögliches Potenzial zur Energieeinsparung im weiteren Verlauf der Diplomarbeit wissenschaftlich zu untersuchen und kritisch zu bewerten.

3.1.3 Problemstellung

Für die elektromagnetische Wasserbehandlung werden verschiedene positive Auswirkungen auf die Eigenschaften des Wassers und auf technische Prozesse beschrieben. Im Bereich der Eisproduktion stehen insbesondere ein verändertes Gefrierverhalten, eine Verbesserung der Eisqualität sowie eine mögliche Reduktion des Energieverbrauchs im Vordergrund.

Vorhandene Laboruntersuchungen zeigen Unterschiede zwischen behandeltem und unbehandeltem Wasser, beispielsweise bei der Schmelzenthalpie, Dichte und spezifischen Wärmekapazität. VUT protokol 2018 Blue Boson Gleichzeitig liegen Betriebsdaten einer Eisfeldanlage vor, bei denen zwischen zwei untersuchten Perioden ein geringerer elektrischer Energieverbrauch festgestellt wurde. Auswertung Energie Quader 24_25…

Die zentrale Problematik besteht darin, dass aus diesen Beobachtungen noch nicht eindeutig hervorgeht, welcher Anteil tatsächlich auf die elektromagnetische Wasserbehandlung zurückzuführen ist. Bei realen Anlagen beeinflussen zahlreiche weitere Faktoren den Energieverbrauch, beispielsweise Aussentemperatur, Eisdicke, Wassertemperatur, Betriebsweise und technische Einstellungen der Kälteanlage.

Zudem ist zu untersuchen, inwieweit die beschriebenen physikalischen Veränderungen wissenschaftlich nachvollziehbar und reproduzierbar sind. Daraus ergibt sich die zentrale Fragestellung dieser Diplomarbeit: Kann die elektromagnetische Wasserbehandlung messbare Veränderungen bewirken und daraus ein technisch relevantes Potenzial zur Energieeinsparung entstehen?

3.1.4 Zielsetzung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die elektromagnetische Wasserbehandlung wissenschaftlich zu untersuchen und deren mögliche Auswirkungen auf physikalische Eigenschaften des Wassers sowie auf die Energieeffizienz technischer Anlagen zu beurteilen.

Dazu werden zunächst die relevanten Grundlagen zu Wasser, Gefrier- und Kristallisationsprozessen sowie zum Elektromagnetismus erarbeitet. Anschliessend wird der aktuelle wissenschaftliche Forschungsstand zur elektromagnetischen Wasserbehandlung untersucht und mit den verfügbaren Herstellerangaben und bestehenden Messungen verglichen.

Ein Schwerpunkt liegt auf der Anwendung bei künstlichen Eisflächen. Anhand vorhandener Labor- und Betriebsdaten soll untersucht werden, ob messbare Veränderungen des Wassers beziehungsweise des Gefrierprozesses erkennbar sind und in welchem Umfang daraus ein energetischer Vorteil entstehen könnte. Die vorhandenen Betriebsdaten sollen dabei unter Berücksichtigung relevanter Einflussgrössen kritisch ausgewertet werden.

Ein weiterer Schwerpunkt betrifft industrielle Anwendungen, insbesondere Kühlkreisläufe und Wärmetauscher. Dabei werden mögliche Auswirkungen auf Wasserhärte, mineralische Ablagerungen und die Energieeffizienz betrachtet.

Sofern geeignete Geräte und Messmöglichkeiten zur Verfügung stehen, sollen die Untersuchungen durch eigene Versuche ergänzt werden. Abschliessend werden die gewonnenen Erkenntnisse technisch, energetisch, wirtschaftlich und ökologisch bewertet.

3.1.5 Projektabgrenzung

Die Diplomarbeit konzentriert sich auf die elektromagnetische Behandlung von Wasser und deren mögliche Auswirkungen auf ausgewählte physikalische Eigenschaften sowie auf die Energieeffizienz technischer Anwendungen. Im Mittelpunkt stehen die Anwendung bei künstlichen Eisflächen sowie ausgewählte industrielle wasserführende Systeme.

Untersucht werden die wissenschaftlichen Grundlagen, bestehende Labor- und Betriebsdaten sowie der aktuelle Forschungsstand. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf dem Gefrierverhalten von Wasser und dem Energiebedarf bei der Eisproduktion. Im industriellen Bereich werden insbesondere Kühlkreisläufe, Wärmetauscher, Wasserhärte und mineralische Ablagerungen betrachtet.

Nicht Bestandteil der Arbeit ist ein vollständiger Nachweis möglicher Veränderungen auf molekularer Ebene. Ebenso werden keine gesundheitlichen oder medizinischen Wirkungen von elektromagnetisch behandeltem Wasser untersucht. Eine vollständige Untersuchung aller am Markt verfügbaren Wasserbehandlungstechnologien ist ebenfalls nicht vorgesehen.

Eigene experimentelle Untersuchungen werden durchgeführt, sofern geeignete Geräte, Proben und Messmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse der Arbeit beziehen sich daher auf die untersuchten Technologien, verfügbaren Daten und definierten Randbedingungen. Eine allgemeine Übertragbarkeit auf sämtliche Wasserarten und technischen Anlagen kann daraus nicht abgeleitet werden.

3.2 Aufgabenstellung

3.2.1 Theoretische Grundlagen erarbeiten

Die relevanten Eigenschaften von Wasser sowie die Grundlagen der Gefrier- und Kristallisationsprozesse werden untersucht. Zusätzlich werden die für das Verständnis der Technologie notwendigen Grundlagen des Elektromagnetismus erarbeitet.

3.2.2 Wissenschaftlichen Forschungsstand untersuchen

Bestehende wissenschaftliche Veröffentlichungen und Untersuchungen zur elektromagnetischen Wasserbehandlung werden recherchiert und ausgewertet. Dabei sollen insbesondere mögliche physikalische Wirkungen und deren wissenschaftliche Nachweisbarkeit betrachtet werden.

3.2.3 HIPPOTRON-Technologie und Eisflächen untersuchen

Das Funktionsprinzip von HIPPOTRON und HIPPOTRON ICE wird beschrieben. Vorhandene Labor- und Betriebsdaten werden analysiert, um mögliche Auswirkungen auf das Gefrierverhalten, die Eisqualität und den Energieverbrauch zu beurteilen.

3.2.4 Industrielle Anwendungen analysieren

Mögliche Anwendungen in Kühlkreisläufen und Wärmetauschern werden untersucht. Dabei werden insbesondere Wasserhärte, mineralische Ablagerungen sowie mögliche Auswirkungen auf Wärmeübertragung und Energieeffizienz betrachtet.

3.2.5 Experimentelle Untersuchungen und Datenauswertung

Sofern geeignete Geräte und Messmöglichkeiten zur Verfügung stehen, werden eigene Versuche mit behandeltem und unbehandeltem Wasser durchgeführt. Unabhängig davon werden vorhandene Labor- und Betriebsdaten ausgewertet und relevante Einflussgrössen berücksichtigt.

3.2.6 Gesamtbewertung der Ergebnisse

Die gewonnenen Erkenntnisse werden mit wissenschaftlicher Literatur und Herstellerangaben verglichen. Abschliessend erfolgt eine technische, energetische, wirtschaftliche und ökologische Bewertung der elektromagnetischen Wasserbehandlung. Dabei werden auch die Grenzen der Untersuchung und der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

4. Projektplanung

Eine strukturierte Projektplanung bildet die Grundlage für die erfolgreiche Durchführung der Diplomarbeit. Sie dient dazu, die einzelnen Arbeitsschritte zu definieren, zeitlich zu koordinieren und den Fortschritt während der Bearbeitung zu kontrollieren.
Die Projektplanung umfasst sowohl die theoretische Recherche als auch die Analyse vorhandener Mess- und Betriebsdaten sowie mögliche eigene experimentelle Untersuchungen. Da insbesondere die Durchführung eigener Versuche von der Verfügbarkeit geeigneter Geräte und Messmöglichkeiten abhängig ist, muss die Planung eine gewisse Flexibilität ermöglichen.
Die Projektplanung umfasst folgende Bereiche:

1. Vorgehensmodell
2. Projektstrukturplanung
3. Projektablaufplanung
4. Meilensteine
5. Kommunikationsplanung
6. Risikoanalyse

4.1 Vorgehensmodell

Für die Bearbeitung der Diplomarbeit wird ein 4-Phasen-Modell verwendet. Die einzelnen Phasen bauen aufeinander auf, können sich während der Bearbeitung teilweise überschneiden.

Phase 1 – Projektinitialisierung
In der ersten Phase werden die Ausgangslage, Problemstellung, Zielsetzung und Projektabgrenzung definiert. Das Pflichtenheft legt den inhaltlichen Rahmen der Diplomarbeit fest und bildet die Grundlage für die weitere Bearbeitung.
Phase 2 – Projektplanung
Die notwendigen Arbeitsschritte werden strukturiert und zeitlich geplant. Dazu gehören der Projektstruktur- und Projektablaufplan, die Festlegung der Meilensteine sowie die Kommunikations- und Risikoanalyse.
Phase 3 – Projektrealisierung
Diese Phase bildet den fachlichen Hauptteil der Diplomarbeit. Zunächst werden die theoretischen Grundlagen und der aktuelle Forschungsstand erarbeitet. Anschliessend werden vorhandene Labor- und Betriebsdaten sowie die Anwendungen bei Eisflächen und in industriellen Anlagen untersucht. Sofern geeignete Möglichkeiten bestehen, werden zusätzlich eigene experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die gewonnenen Daten und Erkenntnisse werden anschliessend ausgewertet und miteinander verglichen.
Phase 4 – Projektabschluss
In der letzten Phase werden die Ergebnisse zusammengeführt und die definierten Ziele überprüft. Die elektromagnetische Wasserbehandlung wird hinsichtlich ihrer technischen, energetischen, wirtschaftlichen und ökologischen Bedeutung bewertet. Abschliessend werden die wichtigsten Erkenntnisse, Grenzen der Untersuchung und mögliche weiterführende Forschungsansätze festgehalten.

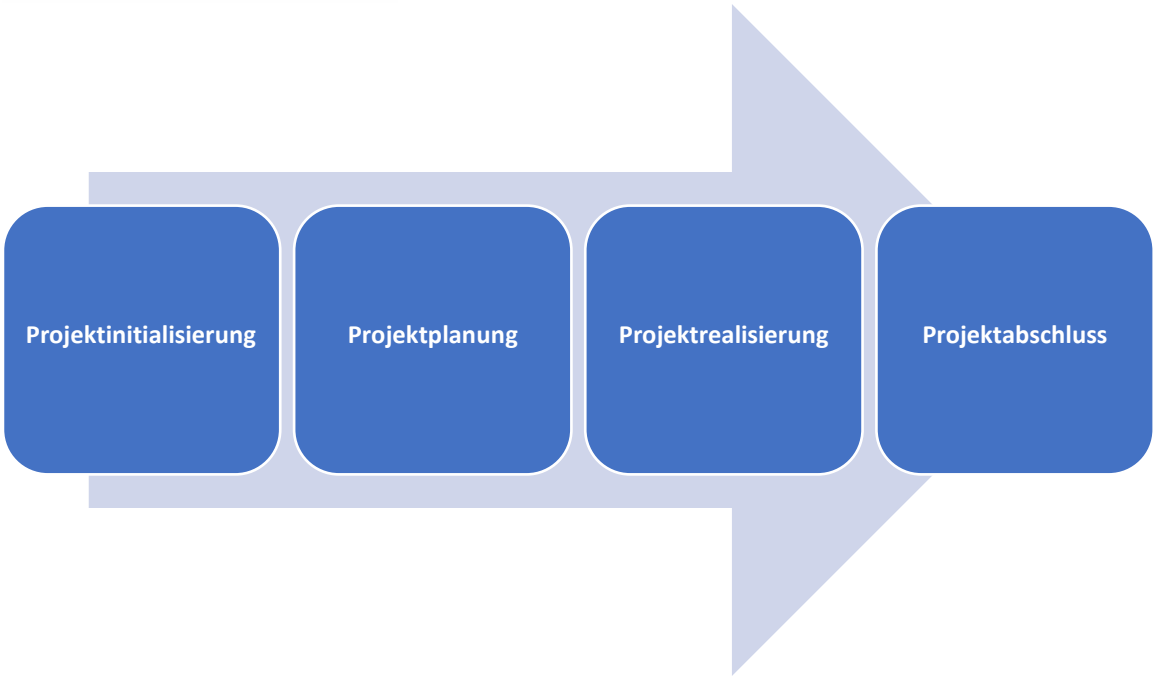


Tabelle 1: Vorgehensmodell

4.2 Projektstrukturplanung

Der Projektstrukturplan gliedert die Diplomarbeit in einzelne Arbeitspakete und schafft damit eine übersichtliche Struktur für die Bearbeitung. Die Arbeitspakete orientieren sich am gewählten 4-Phasen-Modell.



Abbildung 2:Projektstrukturplanung

4.3 Projektablaufplanung

Die Bearbeitungszeit der Diplomarbeit erstreckt sich vom 04. September 2026 bis zum 02. November 2026. Für die Durchführung stehen damit rund acht Wochen zur Verfügung. Die Abschlusspräsentation findet am 13. oder 14. November 2026 statt.
Die Arbeiten werden zeitlich so organisiert, dass zunächst die Projektgrundlagen und die wissenschaftliche Recherche durchgeführt werden. Anschliessend folgen die Analyse der Technologie, die Auswertung der vorhandenen Daten sowie mögliche eigene Untersuchungen. Die letzten Wochen dienen der Bewertung der Ergebnisse und der Fertigstellung der Diplomarbeit.

Zeitraum	Geplante Arbeiten
04.–13. September	Projektinitialisierung, Pflichtenheft und Projektplanung
14.–27. September	Theoretische Grundlagen und wissenschaftliche Literaturrecherche
28. Sept.–11. Oktober	Forschungsstand, HIPPOTRON-Technologie, Eisflächen und industrielle Anwendungen
05.–18. Oktober	Analyse der Labor- und Betriebsdaten, mögliche eigene Versuche
12.–25. Oktober	Datenauswertung, Diskussion sowie energetische, wirtschaftliche und ökologische Bewertung
26. Okt.–01. November	Fazit, Ausblick, Korrektur und Fertigstellung
02. November, 17.00 Uhr	Abgabe der Diplomarbeit
03.–12. November	Vorbereitung der Abschlusspräsentation
13./14. November	Abschlusspräsentation

Tabelle 2: Projektablaufplanung



Abbildung 3: Projektablaufplanung

4.4 Meilensteine

Die Meilensteine kennzeichnen wichtige Zwischenziele und Termine innerhalb der Diplomarbeit. Sie ermöglichen eine regelmässige Kontrolle des Projektfortschritts und helfen, mögliche Verzögerungen frühzeitig zu erkennen.

Meilenstein	Termin
M1 – Projektplanung abgeschlossen	27.09.2026
M2 – Grundlagen und Forschungsstand erarbeitet	04.10.2026
M3 – Technologie und Anwendungen analysiert	18.10.2026
M4 – Datenanalyse und Auswertung abgeschlossen	25.10.2026
M5 – Diplomarbeit fertiggestellt	01.11.2026
M6 – Abgabe der Diplomarbeit	02.11.2026, 17.00 Uhr
M7 – Abschlusspräsentation	13./14.11.2026

Tabelle 3: Meilensteine

4.5 Kommunikationsplanung

Eine klare Kommunikation ist während der Bearbeitung der Diplomarbeit wichtig, um fachliche Fragen, den Projektfortschritt und mögliche Änderungen rechtzeitig abzustimmen. Da die Arbeit weitgehend selbstständig durchgeführt wird, erfolgt die Kommunikation hauptsächlich mit dem Diplomlehrer sowie bei Bedarf mit externen Ansprechpartnern.

Kommunikationspartner	Inhalt	Kommunikationsform	Häufigkeit
Diplomlehrer / Betreuung	Projektstand, fachliche und methodische Fragen	Persönlich, E-Mail	Gemäss Terminplan / bei Bedarf
Boson Distribution	Technische Informationen, vorhandene Messdaten, mögliche Versuche	E-Mail, Telefon	Bei Bedarf
Betreiber von Eisflächen	Betriebsdaten, Erfahrungen und technische Randbedingungen	E-Mail, Telefon, persönlich	Bei Bedarf
Externe Fachpersonen / Labore	Messmethoden und fachliche Fragen	E-Mail, persönlich	Bei Bedarf

Tabelle 4: Kommunikationsplanung

Wichtige Informationen und erhaltene Unterlagen werden laufend dokumentiert und auf ihre Verwendbarkeit für die Diplomarbeit geprüft. Falls externe Ansprechpartner nicht verfügbar sind, wird die Bearbeitung auf Grundlage der vorhandenen Messdaten und Fachliteratur weitergeführt.

4.6 Risikoanalyse

Im Rahmen der Projektplanung werden mögliche Risiken betrachtet, welche die Durchführung oder die Aussagekraft der Diplomarbeit beeinflussen können. Besonders relevant sind die Verfügbarkeit von Messdaten und Versuchsmöglichkeiten sowie die Abhängigkeit von externen Ansprechpartnern.Die Risiken werden anhand der Eintrittswahrscheinlichkeit (E) und der Auswirkung (A) auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet. Der Risikowert ergibt sich aus:
Risikowert = Eintrittswahrscheinlichkeit (E) x Auswirkung (A)

Nr.	Risiko	E	A	Risikowert	Massnahme
R1	Fehlende oder verspätete Rückmeldungen externer Ansprechpartner	4	4	16	Arbeit so planen, dass sie unabhängig von externen Rückmeldungen fortgesetzt werden kann
R2	Eigene Versuche können nicht durchgeführt werden	3	4	12	Schwerpunkt auf vorhandene Labor- und Betriebsdaten sowie Literatur legen
R3	Vorhandene Mess- und Betriebsdaten sind nur eingeschränkt vergleichbar	4	4	16	Einflussgrössen und Randbedingungen getrennt betrachten und transparent dokumentieren
R4	Messergebnisse zeigen keine eindeutigen Veränderungen	3	3	9	Ergebnisse objektiv darstellen; auch ein Nullresultat ist wissenschaftlich relevant
R5	Wissenschaftliche Quellen liefern widersprüchliche Ergebnisse	4	3	12	Studien nach Messmethode, Feldart und Versuchsbedingungen vergleichen
R6	Verzögerungen bei der Bearbeitung	3	4	12	Meilensteine kontrollieren und ausreichend Zeit für Korrektur und Fertigstellung reservieren

Tabelle 5: Risikoanalyse

Die grössten Risiken liegen insbesondere in der Abhängigkeit von externen Informationen und in der Vergleichbarkeit vorhandener Daten. Durch die Kombination aus wissenschaftlicher Literatur, vorhandenen Labor- und Betriebsdaten sowie möglichen eigenen Untersuchungen soll verhindert werden, dass einzelne fehlende Informationen den gesamten Projektfortschritt gefährden.

5. Projektrealisierung - Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen bilden die wissenschaftliche Basis für die Untersuchung der elektromagnetischen Wasserbehandlung. Um mögliche Auswirkungen einer solchen Behandlung beurteilen zu können, müssen zunächst die Eigenschaften von Wasser sowie die relevanten thermischen und physikalischen Prozesse verstanden werden.
Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf dem Aufbau des Wassermoleküls, den Wasserstoffbrückenbindungen und den besonderen physikalischen Eigenschaften von Wasser. Für die Anwendung bei Eisflächen sind insbesondere der Gefrierprozess, die Kristallisation, die Schmelz- beziehungsweise Erstarrungsenthalpie und die Wärmeübertragung von Bedeutung.
Für industrielle Anwendungen sind zusätzlich die Wasserhärte, Calcium- und Magnesiumionen sowie die Bildung mineralischer Ablagerungen sehr wichtig. Solche Ablagerungen können beispielsweise die Wärmeübertragung in Wärmetauschern beeinflussen und dadurch energetische Auswirkungen haben.
Anschliessend werden die Grundlagen des Elektromagnetismus betrachtet. Dabei wird zwischen statischen Magnetfeldern und zeitlich veränderlichen elektromagnetischen Feldern unterschieden. Dies ist für die weitere Arbeit wichtig, da die untersuchte Technologie mit elektromagnetischen Feldern beziehungsweise Impulsen arbeitet und daher nicht mit einer rein statischen magnetischen Wasserbehandlung gleichgesetzt werden sollte.

5.1 Wasser

Wasser ist eine der wichtigsten chemischen Verbindungen auf der Erde und besitzt eine Reihe besonderer physikalischer Eigenschaften. Für diese Diplomarbeit ist das Verständnis des molekularen Aufbaus von Wasser sehr wichtig, da sowohl das Gefrierverhalten als auch mögliche Wechselwirkungen mit elektromagnetischen Feldern mit den Eigenschaften der Wassermoleküle und ihrer Wechselwirkungen zusammenhängen.
Ein Wassermolekül besteht aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom und besitzt die chemische Formel H_2O. Die Atome sind nicht linear angeordnet. Der Winkel zwischen den beiden O–H-Bindungen beträgt ungefähr **104,5**°, während der Abstand zwischen Sauerstoff- und Wasserstoffatom etwa 0,0957 nm beträgt.

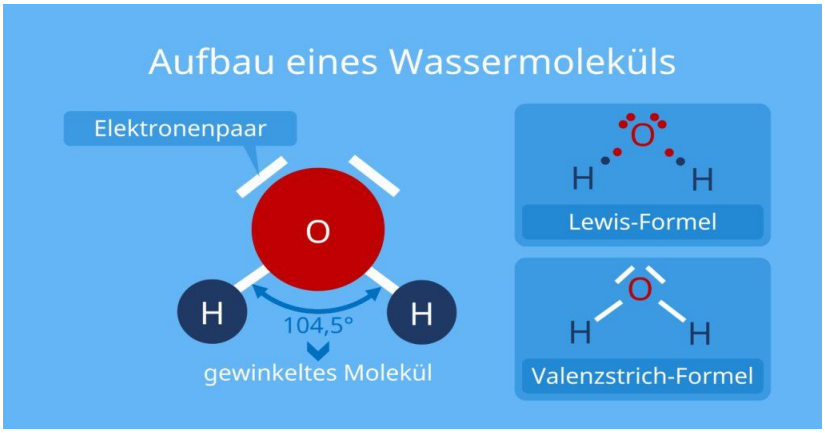


Abbildung 4: Wassermolekül

Sauerstoff besitzt eine höhere Elektronegativität als Wasserstoff und zieht deshalb die gemeinsamen Bindungselektronen stärker an. Dadurch entsteht innerhalb des Moleküls eine ungleichmässige Ladungsverteilung: Der Sauerstoffbereich trägt eine negative Partialladung, während die Wasserstoffbereiche positive Partialladungen aufweisen. Das Wassermolekül besitzt deshalb ein permanentes **elektrisches Dipolmoment**.
Zwischen benachbarten Wassermolekülen können aufgrund dieser Polarität Wasserstoffbrückenbindungen entstehen. Dabei wird der positiv polarisierte Wasserstoffbereich eines Moleküls vom negativ polarisierten Sauerstoffbereich eines benachbarten Moleküls angezogen. Es entsteht ein räumliches Netzwerk aus wechselwirkenden Wassermolekülen. Diese Wechselwirkungen sind eine wesentliche Ursache für verschiedene aussergewöhnliche Eigenschaften von Wasser.

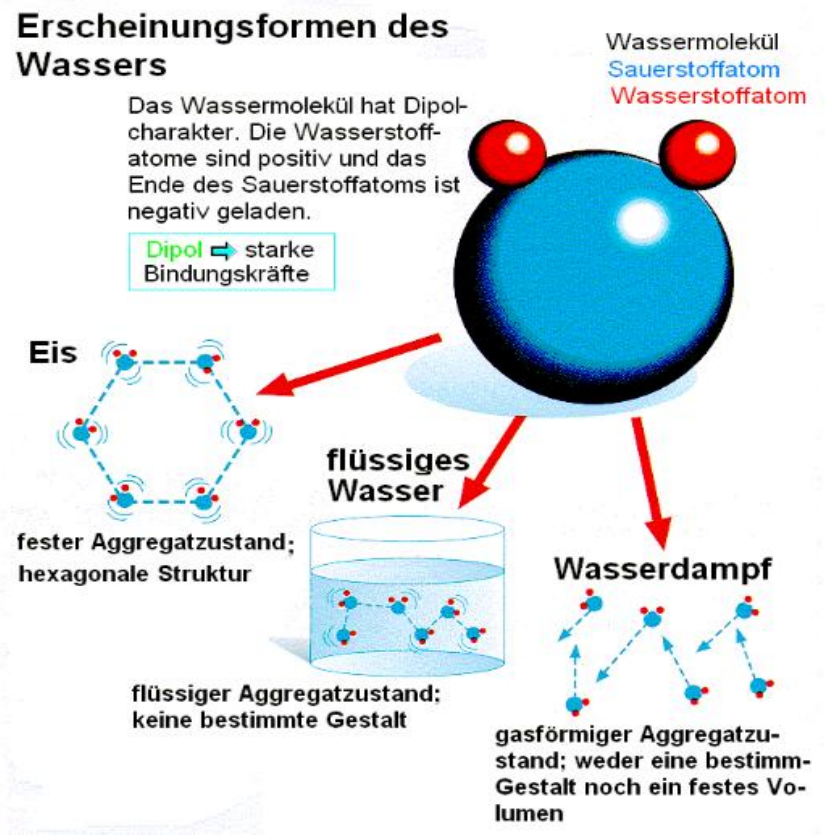


Abbildung 5: Erscheinungsformen des Wassers

Im festen Zustand des Wassers sind alle Wassermoleküle durch Wasserstoffbrücken miteinander verbunden, im flüssigen Aggregatzustand werden sie ständig neu gebildet und wieder zerstört, und im gasförmigen Zustand (Wasserdampf) sind alle Wasserstoffbrücken gelöst.
Beim Gefrieren bildet sich eine stärker geordnete Kristallstruktur. Diese besitzt eine offenere räumliche Anordnung als flüssiges Wasser. Deshalb nimmt das Volumen beim Gefrieren zu; nach Angaben der IAPWS beträgt diese Volumenzunahme ungefähr **9 %**. Gleichzeitig weist flüssiges Wasser bei atmosphärischem Druck sein Dichtemaximum bei ungefähr **4 °C** auf.

Hexagonales Wasser

Hexagonales Wasser ist Wasser, dessen Moleküle sich zu Sechsecken ordnen. Im Eis ist diese Ordnung vollständig und gemessen. Im flüssigen Wasser bilden sich eisähnliche Bereiche von rund einem Nanometer, die sich ständig umbauen.
An wasserliebenden Oberflächen beschreibt Prof. Dr. Gerald H. Pollack sechseckige Wabenschichten, das EZ-Wasser. In seinem Buch beschreibt Gerald H. Pollack seine Experimente mit Wasser und stellt die Theorie eines vierten Aggregatzustands vor. Er geht davon aus, dass Wasser **Lichtenergie speichern kann** und dadurch neue Anwendungsmöglichkeiten in Wissenschaft, Technik und Medizin entstehen könnten. Seine Erkenntnisse eröffnen eine neue Perspektive auf die besonderen Eigenschaften des Wassers.

5.2 Physikalische Eigenschaften von Wasser

Wasser besitzt mehrere physikalische Eigenschaften, die für Wärmeübertragung, Kühlung und Gefrierprozesse wichtig sind. Dazu gehören insbesondere **Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Viskosität und Oberflächenspannung**. Diese Eigenschaften sind nicht konstant, sondern hängen unter anderem von Temperatur und Druck ab.
Für technische Berechnungen werden deshalb definierte Referenzzustände verwendet. Eine international anerkannte Grundlage stellt die IAPWS-95-Formulierung dar. Sie dient als internationaler Standard zur Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von gewöhnlichem Wasser.

Dichte und Dichteanomalie

Die Dichte von Wasser ändert sich in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Druck - wie bei anderen Stoffen auch.

Temperatur	Dichte [g/cm³]	Zustand
0 °C	0,9998	Flüssig
4 °C	0,999975	Maximale Dichte
20 °C	0,9982	Zimmertemperatur
100 °C	0,9584	Siedend
0 °C	0,917	Eis

Tabelle 6: Wasserdichte

Eine besonders auffällige Eigenschaft von Wasser ist seine **Dichteanomalie**. Im Gegensatz zu den meisten Flüssigkeiten nimmt die Dichte beim Abkühlen nicht kontinuierlich zu. Wasser erreicht bei atmosphärischem Druck seine maximale Dichte bei ungefähr **4 °C**. Bei weiterer Abkühlung nimmt die Dichte wieder ab.
Beim Gefrieren bildet sich eine offenere Kristallstruktur. Dadurch besitzt Eis eine geringere Dichte als flüssiges Wasser und schwimmt auf dessen Oberfläche. Für die Eisproduktion ist diese Strukturänderung von besonderer Bedeutung, da sie unmittelbar mit dem Phasenübergang von flüssigem Wasser zu festem Eis zusammenhängt.

Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität (c_p) beschreibt, wie viel Wärmeenergie benötigt wird, um die Temperatur einer bestimmten Masse eines Stoffes zu erhöhen. Flüssiges Wasser besitzt eine hohe Wärmekapazität. Bei ungefähr 25 °C beträgt die molare Wärmekapazität etwa **75,4 J/(mol·K)**, entsprechend rund **4,18 kJ/(kg·K)**.
Für die Kühlung von Wasser die benötigte Wärmemenge:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Wärmeleitfähigkeit und Viskosität

Die **Wärmeleitfähigkeit** beschreibt die Fähigkeit eines Stoffes, Wärme durch Wärmeleitung zu transportieren. Sie ist insbesondere für Wärmetauscher, Kühlkreisläufe und den Wärmeübergang während der Eisbildung relevant. Für die Wärmeleitfähigkeit von Wasser existiert ebenfalls eine international standardisierte IAPWS-Formulierung.

Die **dynamische Viskosität** beschreibt dagegen den inneren Widerstand einer Flüssigkeit gegen das Fliessen. Sie beeinflusst unter anderem Strömungsverhältnisse, Druckverluste und damit den Pumpenenergiebedarf in wasserführenden Systemen. Auch die Viskosität ist stark temperaturabhängig. IAPWS stellt hierfür eine eigene Referenzformulierung zur Verfügung.

Übersicht wichtiger Eigenschaften

Die folgende Tabelle zeigt typische Grössenordnungen für flüssiges Wasser nahe Raumtemperatur.

Eigenschaft	Typischer Wert	Einheit	Bedeutung für diese Arbeit
Dichte ρ	ca. 997	kg/m³	Volumen, Masse und Gefrierverhalten
pezifische Wärmekapazität c_p	ca. 4,18	kJ/(kg·K)	Energiebedarf beim Abkühlen
Wärmeleitfähigkeit λ	ca. 0,6	W/(m·K)	Wärmeübertragung
Dynamische Viskosität μ	ca. 0,9	mPa·s	Strömung und Pumpenleistung
Schmelzenthalpie	ca. 334	kJ/kg	Energie beim Phasenübergang

Tabelle 7: Übersicht Wasser Eigenschaften

Gerade **Wärmekapazität und Schmelzenthalpie** sind für die energetische Betrachtung der Eisproduktion entscheidend. Die Kälteanlage muss zunächst die Temperatur des Wassers bis zum Gefrierpunkt reduzieren und anschliessend zusätzlich die für den Phasenübergang erforderliche Wärme entziehen. Deshalb werden diese Grössen später bei der Analyse der vorhandenen Labormessungen und der möglichen Energieeinsparungen erneut aufgegriffen.

5.3 Wasserhärte, Calcium und Magnesium

Die Wasserhärte wird hauptsächlich durch gelöste Calciumionen (Ca^{2+}) und Magnesiumionen (Mg^{2+}) verursacht. Calcium- und Magnesiumverbindungen sind für Bildung von mineralischen Ablagerungen in Rohrleitungen, Wärmetauschern und anderen wasserführenden Komponenten verantwortlich. Solche Ablagerungen können technische Prozesse beeinflussen und sind deshalb auch für die spätere Untersuchung wichtig.

Entstehung der Wasserhärte

Wasser nimmt während seines natürlichen Kreislaufs Mineralstoffe aus Boden und Gestein auf. Besonders beim Durchströmen von kalkhaltigen Gesteinsschichten können Calcium- und Magnesiumverbindungen gelöst werden. Die dabei im Wasser vorhandenen Ca^{2+}- und Mg^{2+}-Ionen bestimmen einen wesentlichen Teil der Gesamthärte des Wassers.
Grundsätzlich wird zwischen **Carbonathärte und Nichtcarbonathärte** unterschieden. Bei der Carbonathärte stehen Calcium und Magnesium mit dem Carbonat-/Hydrogencarbonatsystem in Zusammenhang.

Art der Wasserhärte	Typische Verbindungen	Bedeutung
Carbonathärte	$Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$	kann bei Erwärmung zur Bildung von Ablagerungen beitragen
Nichtcarbonathärte	$CaSO_4$, $MgSO_4$, $CaCl_2$, $MgCl_2$	bleibt beim einfachen Erhitzen weitgehend bestehen
Gesamthärte	Summe der relevanten Ca^{2+}- und Mg^{2+}-Anteile	beschreibt die gesamte Wasserhärte

Tabelle 8: Entstehung der Wasserhärte

Calcium und Magnesium

Calcium und Magnesium liegen im Wasser hauptsächlich als gelöste Ionen vor. Für technische Systeme ist nicht nur ihre Konzentration wichtig, sondern auch die chemische Zusammensetzung des Wassers, beispielsweise pH-Wert, Temperatur, Hydrogencarbonatkonzentration und weitere gelöste Stoffe.
Die Wasserhärte wird häufig als Calciumcarbonat-Äquivalent ($CaCO_3$) angegeben. Es handelt sich um eine gemeinsame Bezugsgrösse, mit der die Härte ausgedrückt werden kann.

Bedeutung für technische Anlagen

Mineralische Ablagerungen werden im technischen Bereich häufig als Scaling bezeichnet. Bilden sich solche Schichten beispielsweise auf den Wärmeübertragungsflächen eines Wärmetauschers, entsteht eine zusätzliche Schicht zwischen dem Wasser und der wärmeübertragenden Oberfläche. Dies ist energetisch relevant, da Ablagerungen den Wärmeübergang beeinträchtigen können. Um trotzdem die gewünschte Heiz- oder Kühlleistung zu erreichen, können ungünstigere Betriebsbedingungen erforderlich werden.



Abbildung 6: Mineralanlagerungen, Quelle: Bundesverband Geothermie

5.4 Gefrieren und Kristallisation

Um mögliche Einflüsse einer elektromagnetischen Wasserbehandlung später beurteilen zu können, müssen zunächst der natürliche Gefrierprozess, die Kristallbildung und der damit verbundene Energiebedarf betrachtet werden.

Phasenübergang von Wasser zu Eis

Beim Gefrieren geht Wasser vom flüssigen in den festen Aggregatzustand über. Bei Normaldruck liegt der Gleichgewichtspunkt zwischen flüssigem Wasser ujhnd Eis nahe 0 °C. Der genaue Gleichgewichtszustand ist vom Druck abhängig; die IAPWS beschreibt die Schmelzkurven verschiedener Eisphasen als Funktion von Temperatur und Druck.

Während der Erstarrung ordnen sich die Wassermoleküle zunehmend in einer kristallinen Struktur an. Unter üblichen Bedingungen entsteht überwiegend hexagonales Eis. Aufgrund seiner relativ offenen Kristallstruktur besitzt Eis eine geringere Dichte als flüssiges Wasser.

Für eine technische Eisfläche reicht es deshalb nicht aus, das Wasser lediglich bis auf ungefähr 0 °C abzukühlen. Zusätzlich muss während des Phasenübergangs eine erhebliche Wärmemenge abgeführt werden.

Keimbildung und Kristallwachstum

Die Eisbildung beginnt mit der sogenannten Keimbildung oder Nukleation. Dabei entsteht zunächst ein kleiner stabiler Kristallkeim, an den sich weitere Wassermoleküle anlagern können. Anschliessend wächst dieser Keim weiter und es bildet sich eine feste Eisstruktur.

Grundsätzlich wird zwischen **homogener** und **heterogener Nukleation** unterschieden:

Homogene Nukleation: Bildung eines Eiskeims im Wasservolumen ohne fremde Oberfläche als Ausgangspunkt

Heterogene Nukleation: Keimbildung wird durch Grenzflächen, Partikel, Verunreinigungen oder andere Oberflächen begünstigt

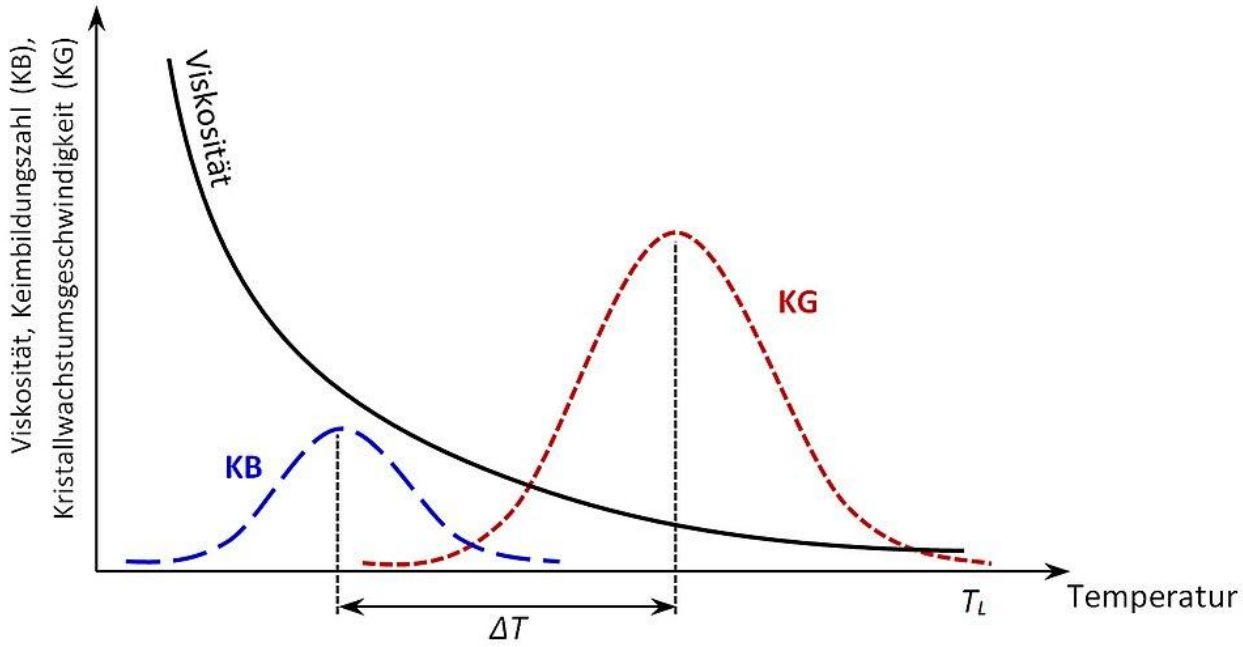


Abbildung 6: Keimbildung und Kristallwachstum, Quelle: Wikipedia

Die Eisnukleation wird unter anderem von Temperatur, Druck, gelösten Stoffen und vorhandenen Grenzflächen beeinflusst. Nach der Bildung eines stabilen Keims folgt das Kristallwachstum. Dabei lagern sich weitere Wassermoleküle an die bestehende Kristallstruktur an. Nukleation und Kristallwachstum sind somit unterschiedliche, aber miteinander verbundene Schritte des Gefrierprozesses.

Unterkühlung

Wasser muss nicht zwangsläufig sofort gefrieren, sobald seine Temperatur unter 0 °C sinkt. Unter geeigneten Bedingungen kann es zunächst flüssig bleiben. Dieser metastabile Zustand wird als Unterkühlung bezeichnet.

Erst wenn eine geeignete Keimbildung einsetzt, beginnt die Kristallisation. Sehr reines Wasser ohne geeignete Keimbildungsstellen kann deutlich unter den normalen Gefrierpunkt abgekühlt werden. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass die homogene Nukleation von Wasser erst bei wesentlich tieferen Temperaturen einsetzt; experimentell wurde unterkühltes Wasser bis in die Nähe von etwa 232 K (−41 °C) untersucht.

Erstarrungs- und Schmelzenthalpie

Beim Gefrieren muss zusätzlich zur Abkühlung des Wassers die sogenannte latente Wärme abgeführt werden. Die damit verbundene Energie wird als Erstarrungsenthalpie bezeichnet. Beim umgekehrten Vorgang, dem Schmelzen, muss die entsprechende Schmelzenthalpie zugeführt werden.

Für eine Masse (m) kann die Energie des Phasenübergangs vereinfacht beschrieben werden durch:

$$Q = m \cdot \Delta h$$

Dabei ist Q die Wärmeenergie, m die Masse des Wassers und Δh die spezifische Erstarrungs- beziehungsweise Schmelzenthalpie.

Für Wasser liegt die Schmelzenthalpie in der Nähe des Gefrierpunktes bei ungefähr **334 kJ/kg**. Dieser Wert zeigt, dass für den eigentlichen Phasenübergang eine beträchtliche Energiemenge abgeführt werden muss.

Bedeutung für die Eisproduktion

Bei der Herstellung einer künstlichen Eisfläche kann der thermische Prozess vereinfacht in mehrere Schritte unterteilt werden:

1. Abkühlen des Wassers bis in den Bereich des Gefrierpunktes.
2. Beginn der Nukleation und Bildung erster Eiskristalle.
3. Abführen der Erstarrungswärme während des Phasenübergangs.
4. Kristallwachstum und vollständige Erstarrung der aufgebrachten Wasserschicht.
5. Weitere Abkühlung des Eises auf die gewünschte Betriebstemperatur.

Diese Unterscheidung wird später für die energetische Bewertung wichtig. Eine mögliche Veränderung der Wärmekapazität, Erstarrungsenthalpie, Nukleationstemperatur oder des Kristallwachstums hätte jeweils eine andere physikalische Bedeutung und müsste deshalb separat nachgewiesen werden.

5.5 Grundlagen des Magnetismus

Magnetismus ist ein physikalisches Phänomen, das durch magnetische Felder beschrieben wird. Ein Magnet besitzt einen Nord- und einen Südpol. Gleichnamige Pole stossen sich ab, während sich ungleichnamige Pole anziehen. Magnetische Feldlinien bilden dabei geschlossene Linien; isolierte magnetische Einzelpole wurden bisher nicht beobachtet.
Magnetische Felder entstehen jedoch nicht nur durch Permanentmagnete. Auch bewegte elektrische Ladungen beziehungsweise elektrische Ströme erzeugen ein Magnetfeld.

Magnetisches Feld

Das magnetische Feld wird häufig durch die magnetische Flussdichte B beschrieben. Ihre SI-Einheit ist Tesla (T).
Die magnetische Flussdichte beschreibt vereinfacht die Stärke und Richtung eines magnetischen Feldes an einem bestimmten Ort. Bei einem langen geraden stromdurchflossenen Leiter kann die magnetische Flussdichte beispielsweise beschrieben werden durch:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

B = magnetische Flussdichte [T]

μ_0 = magnetische Feldkonstante

I = elektrische Stromstärke [A]

r = Abstand zum Leiter [m]

Die Gleichung zeigt einen für diese Arbeit wichtigen Zusammenhang: Ein elektrischer Strom kann ein Magnetfeld erzeugen. Mit zunehmender Stromstärke steigt die magnetische Flussdichte, während sie mit zunehmendem Abstand vom Leiter abnimmt.

Statische und veränderliche Magnetfelder

Ein statisches Magnetfeld verändert sich zeitlich nicht und besitzt somit eine Frequenz von 0 Hz. Ein typisches Beispiel ist das Feld eines Permanentmagneten.

Ein zeitlich veränderliches Magnetfeld dagegen verändert seine Feldstärke beziehungsweise Richtung mit der Zeit. Diese zeitliche Veränderung führt direkt zum Elektromagnetismus und zur elektromagnetischen Induktion.

5.6 Grundlagen des Elektromagnetismus

Elektrizität und Magnetismus sind physikalisch eng miteinander verbunden. Elektrische Ladungen erzeugen elektrische Felder, während bewegte elektrische Ladungen beziehungsweise elektrische Ströme magnetische Felder erzeugen. Umgekehrt kann ein zeitlich veränderliches Magnetfeld ein elektrisches Feld hervorrufen. Diese Zusammenhänge werden durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben und bilden die Grundlage des klassischen Elektromagnetismus.

Elektrische und magnetische Felder

Ein elektrisches Feld entsteht durch elektrische Ladungen. Es übt auf andere elektrische Ladungen eine Kraft aus. Ein magnetisches Feld entsteht unter anderem durch bewegte Ladungen beziehungsweise elektrische Ströme.

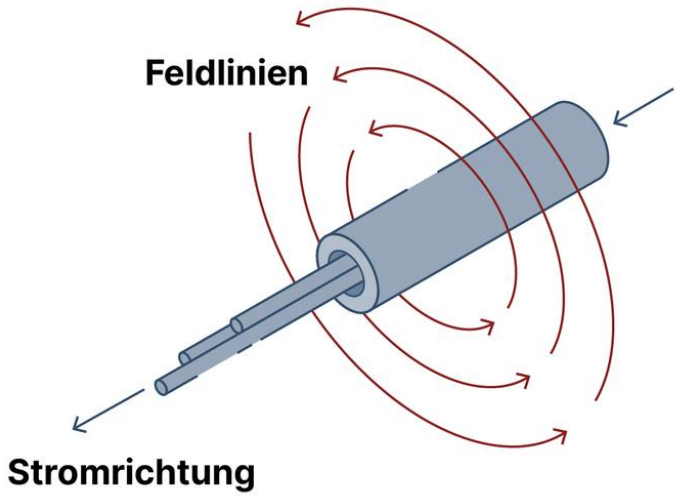


Abbildung 7:Durch Strom hervorgerufenes magnetisches Feld

Besonders wichtig ist die gegenseitige Kopplung: Ein sich zeitlich veränderndes Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Feld. Ebenso kann ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld zur Entstehung eines Magnetfeldes beitragen. Elektrische und magnetische Erscheinungen sind daher nicht vollständig voneinander getrennt, sondern Bestandteile des Elektromagnetismus.

Frequenz und elektromagnetische Felder

Bei zeitlich periodisch veränderlichen Feldern ist die Frequenz f eine wichtige physikalische

Grösse. Sie beschreibt die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde und wird in Hertz (Hz) angegeben.
Für elektromagnetische Wellen besteht zwischen Frequenz und Wellenlänge im Vakuum der Zusammenhang:

$$c = f \cdot \lambda$$

c = Lichtgeschwindigkeit
f = Frequenz
λ = Wellenlänge

Mit zunehmender Frequenz wird die Wellenlänge entsprechend kleiner. Elektromagnetische Wellen bestehen aus zeitlich veränderlichen elektrischen und magnetischen Feldern.

Elektromagnetisches Spektrum

Elektromagnetische Felder können anhand ihrer Frequenz in verschiedene Bereiche eingeteilt werden. Das Spektrum reicht von statischen Feldern über niederfrequente und hochfrequente Felder bis hin zu elektromagnetischer Strahlung sehr hoher Frequenz.

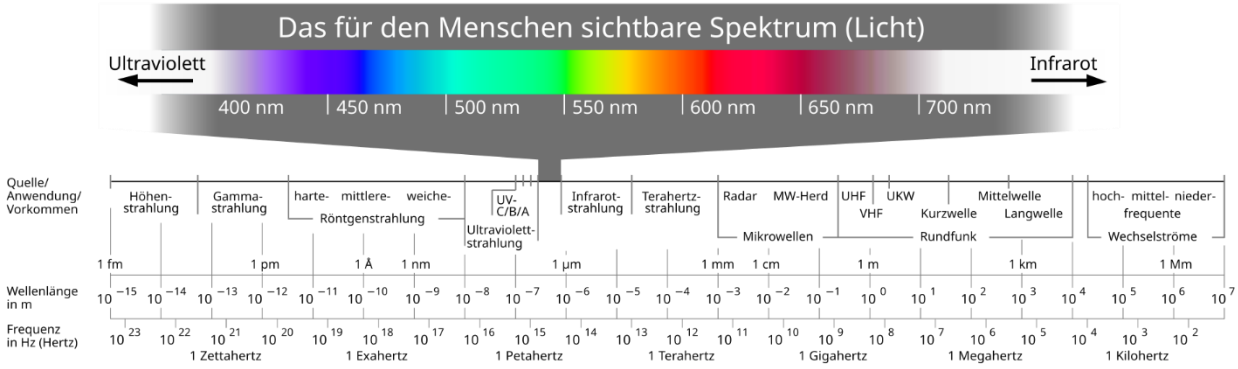


Abbildung 8:Übersicht des elektromagnetischen Spektrums, Quelle: Wikipedia

Als physikalische Grundkräfte existieren neben dem Elektromagnetismus und den damit verbundenen Kräften nur noch die Gravitation und Kernkräfte. Alle Erscheinungen in unserer Welt können durch diese Kräfte erklärt werden. Es ist dabei bemerkenswert, dass fast alle Kräfte und Erscheinungen, die wir im Alltag beobachten, elektromagnetischer Natur sind. (Elektromagnetismus**,** Dr. Franz-Josef Schmitt**)**

Fazit

Eine Wasserbehandlung mit Permanentmagneten arbeitet mit einem statischen Magnetfeld. Eine Anlage, die dagegen aktiv erzeugte und zeitlich veränderliche elektromagnetische Signale beziehungsweise Impulse verwendet, muss physikalisch anders eingeordnet werden.

Untersuchungen über Wasser, das durch ein statisches Magnetfeld eines Permanentmagneten geführt wurde, können nicht ohne Weiteres auf ein System mit aktiv erzeugten elektromagnetischen Feldern oder Impulsen übertragen werden.

5.7 Physikalische Wasserbehandlung mit magnetischen und elektromagnetischen Feldern

5.7.1 Magnetische Wasserbehandlung

Unter magnetischer Wasserbehandlung wird eine physikalische Behandlung verstanden, bei der Wasser beziehungsweise eine wässrige Lösung einem Magnetfeld ausgesetzt wird. Häufig werden dafür Permanentmagnete an oder um eine Rohrleitung angeordnet, sodass das strömende Wasser den magnetischen Feldbereich durchläuft. Im Gegensatz zu einer klassischen chemischen Wasserenthärtung werden dabei dem Wasser grundsätzlich keine Enthärtungschemikalien zugesetzt und Calcium- oder Magnesiumionen nicht gezielt durch Ionenaustausch entfernt. Verschiedene magnetische, elektromagnetische und elektrostatische Geräte, die angeblich die Kalkbildung kontrollieren, werden weltweit für private und industrielle Anwendungen verkauft. Der Glaube an die positive Wirkung von Magnetfeldern auf Wasser hat in China zum Verkauf von Millionen von Magnetbechern geführt.
Ein wesentliches Anwendungsgebiet ist die mögliche Beeinflussung der Calciumcarbonatbildung ($CaCO_3$). Ziel solcher Systeme ist daher häufig nicht die Entfernung der Härtebildner aus dem Wasser, sondern eine mögliche Veränderung des Kristallisations- und Ablagerungsverhaltens.

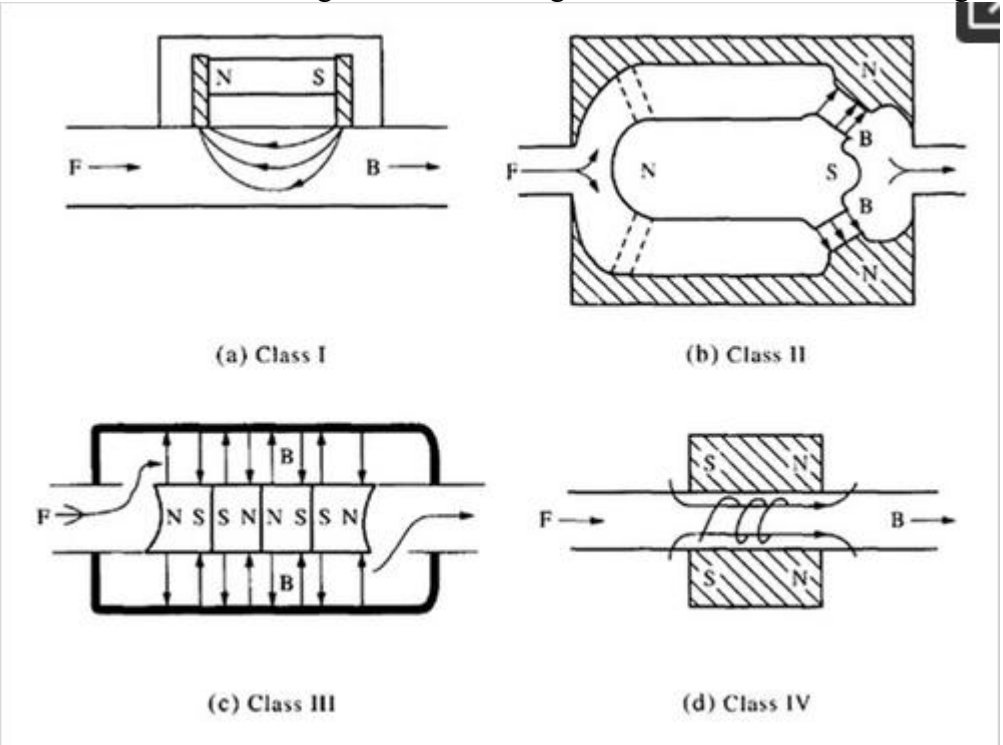


Abbildung 9: Konfigurationen magnetischer Baugruppen, Quelle: www.mdpi.com

Einflussgrössen
Die Wirkung einer magnetischen Behandlung kann nicht allein anhand der magnetischen Flussdichte beurteilt werden. In wissenschaftlichen Untersuchungen werden verschiedene Einflussgrössen diskutiert:

- magnetische Flussdichte und Feldgradient,
- Strömungsgeschwindigkeit des Wassers,
- Dauer und Anzahl der Feldpassagen,

- Temperatur und chemische Zusammensetzung des Wassers,
- Konzentration der gelösten Ionen,
- Rohrmaterial und Geometrie des Systems.

In der Literatur werden unterschiedliche Erklärungsansätze für beobachtete Effekte diskutiert. Dazu gehören mögliche Einflüsse auf die Keimbildung und Kristallisation von Calciumcarbonat, auf die Bildung unterschiedlicher $CaCO_3$-Kristallformen sowie auf Wechselwirkungen zwischen gelösten Ionen, Wasser und Oberflächen.
Diese Mechanismen sind jedoch nicht abschliessend geklärt. Die wissenschaftliche Literatur zur magnetischen Wasserbehandlung zeigt teilweise unterschiedliche oder widersprüchliche Ergebnisse. Eine wesentliche Ursache dafür sind die stark unterschiedlichen Versuchsbedingungen hinsichtlich Wasserzusammensetzung, Magnetfeld, Strömung, Rohrmaterial und Messverfahren.

Fazit

Die magnetische Wasserbehandlung wird bereits seit vielen Jahrzehnten untersucht. Dennoch besteht bis heute kein allgemeiner wissenschaftlicher Konsens über einen einheitlichen Wirkmechanismus oder eine unter allen Bedingungen reproduzierbare Wirkung. Die Review-Arbeit von Chibowski und Szcześ bezeichnet die beobachteten Magnetfeldeffekte auf Wasser und wässrige Lösungen ausdrücklich als weiterhin kontrovers und fordert weitere experimentelle Untersuchungen. Eine weitere umfassende Review zu Anti-Scaling-Anwendungen weist ebenfalls auf widersprüchliche Resultate und Probleme bei der Reproduzierbarkeit hin.

5.7.2 Elektromagnetische Wasserbehandlung

Bei der elektromagnetischen Wasserbehandlung wird Wasser einem aktiv erzeugten, zeitlich veränderlichen elektromagnetischen Feld beziehungsweise elektromagnetischen Signal ausgesetzt. Im Unterschied zur Behandlung mit Permanentmagneten wird das Feld durch elektrische Komponenten erzeugt. Je nach Verfahren kommen beispielsweise Spulen, Elektroden oder Antennen zum Einsatz. Die in wissenschaftlichen Untersuchungen verwendeten Systeme unterscheiden sich allerdings erheblich hinsichtlich Frequenz, Feldstärke, Signalform, Durchfluss und Behandlungsdauer.

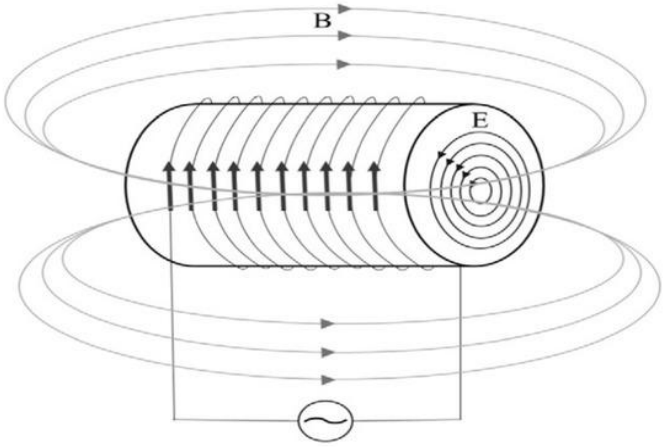


Abbildung 10:Elektromagnetisches Feldgeneratorsystem, Quelle: www.mdpi.com

Mögliche Wirkungen auf Calciumcarbonat

In der Fachliteratur werden verschiedene mögliche Mechanismen diskutiert. Dazu gehört insbesondere eine Veränderung der Bildung von Calcit und Aragonit, zwei unterschiedlichen Kristallformen von Calciumcarbonat. Weiter wird untersucht, ob die Kristallisation verstärkt im Wasservolumen statt direkt auf einer technischen Oberfläche stattfindet. Dadurch könnten entstandene Partikel mit der Strömung weitertransportiert werden, anstatt eine feste Ablagerung auf der Oberfläche eines Wärmetauschers zu bilden.

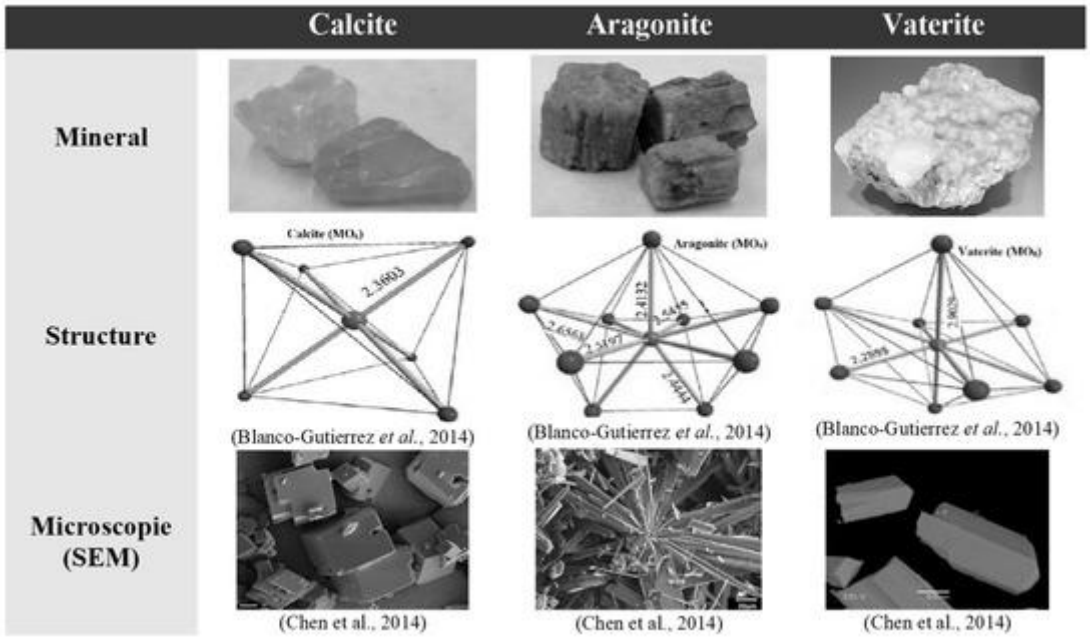


Abbildung 11: Hauptmineralformen von Calciumcarbonat

Auf der Mohs-Härteskala liegt Calcit bei 3, Aragonit hingegen zwischen 3,5 und 4. Aragonit besitzt eine höhere Dichte als Calcit und neigt weniger zur Zunderbildung. Ein Faktor für die weniger kompakte Zunderbildung bei Aragonit könnte die nadelförmige Morphologie seiner Kristalle sein.

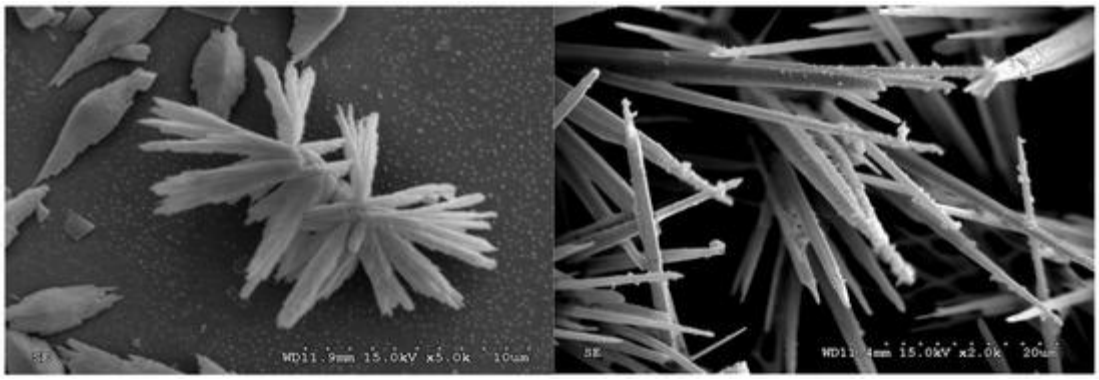


Abbildung 12:SEM-Bild von Aragonitkristallen mit und ohne elektromagnetische Behandlung

Aus den Ergebnissen der mit den Geräten TK3K und Antical RF durchgeführten Untersuchungen ging hervor, dass die elektromagnetische Behandlung offenbar kleine Kristalle mit einer Orientierung und Agglomeration erzeugt, die ohne die Behandlung nicht auftritt, wie in den REM-Analysen (Abbildung 12) zu sehen ist. Dies könnte auf den Einfluss des elektromagnetischen Feldes zurückzuführen sein, das die Bildung von Kristallen mit einer bestimmten Orientierung und Agglomeration bewirkt.

5.7.3 Abgrenzung der Statischen magnetischen und elektromagnetischen Wasserbehandlung

Obwohl die Begriffe magnetische und elektromagnetische Wasserbehandlung in der Fachliteratur teilweise gemeinsam verwendet werden, bestehen wichtige technische Unterschiede. Diese betreffen insbesondere die Erzeugung der Felder, deren zeitliches Verhalten und die eingesetzten Komponenten.
Die folgende Tabelle stellt die wesentlichen Unterschiede gegenüber.

Merkmal	Statische Magnetische Wasserbehandlung	Elektromagnetische Wasserbehandlung
Felderzeugung	Häufig Permanentmagnete	Elektrisch betriebene Feld- oder Signalerzeugung
Feldart	Meist statisches Magnetfeld	Zeitlich veränderliches elektrisches und/oder magnetisches Feld
Frequenz	0 Hz bei statischem Feld	Abhängig vom Verfahren
Technische Komponenten	Permanentmagnete, Magnethalterungen	Generatoren, Spulen, Elektroden oder Antennen
Elektrische Energieversorgung	Bei Permanentmagneten nicht erforderlich	Erforderlich
Mögliche Anwendungen	Beeinflussung von Kalkablagerungen	Beeinflussung von Kristallisations- und Ablagerungsprozessen
Entfernung von Ca^{2+} und Mg^{2+}	Nicht automatisch	Nicht automatisch
Wissenschaftliche Bewertung	Ergebnisse teilweise widersprüchlich	Ergebnisse abhängig vom Verfahren und den Versuchsbedingungen

Tabelle 9: Vergleich der magnetischen und elektromagnetischen Wasserbehandlung

Die Tabelle verdeutlicht, dass sich die beiden Verfahren insbesondere hinsichtlich der Felderzeugung und der zeitlichen Veränderung der Felder unterscheiden. Bei einer Behandlung mit Permanentmagneten liegt in der Regel ein statisches Magnetfeld vor. Elektromagnetische Behandlungssysteme können dagegen unterschiedliche Frequenzen und Signalformen einsetzen.

6. Stand der Forschung

Magnetostatische und elektromagnetische Wasserbehandlung: Wissenschaftliche Untersuchungen und kritische Bewertung

6.1 Einleitung

Die magnetostatische und elektromagnetische Wasserbehandlung wird seit mehreren Jahrzehnten wissenschaftlich untersucht. Im Mittelpunkt stehen mögliche Veränderungen der physikalischen Eigenschaften von Wasser, der Kristallisation von Calciumcarbonat sowie der Bildung von Kalkablagerungen in technischen Anlagen.
Die untersuchten Verfahren unterscheiden sich erheblich. Einige Forschende verwenden Permanentmagnete mit statischen Magnetfeldern. Andere setzen zeitlich veränderliche Magnetfelder oder elektromagnetische Behandlungssysteme ein. Auch die Wasserzusammensetzung, die Strömungsgeschwindigkeit, die Behandlungsdauer und die Messmethoden unterscheiden sich.
Diese Unterschiede erschweren den direkten Vergleich der Forschungsergebnisse. Deshalb werden die Studien in diesem Kapitel einzeln vorgestellt und anschliessend hinsichtlich ihrer Aussagekraft und ihrer Bedeutung für die vorliegende Diplomarbeit bewertet.

6.2 Untersuchungen zu physikalischen Eigenschaften von Wasser

Szcześ et al. (2020) – Oberflächenspannung und Benetzungsverhalten

Szcześ, Chibowski und Rzeźnik untersuchten, ob Magnetfelder die Oberflächenspannung von Wasser und dessen Benetzungsverhalten auf Glas- und Glimmeroberflächen beeinflussen. Dabei kamen statische Magnetfelder mit 15 mT und 270 mT zum Einsatz. Die Behandlungszeiten betrugen eine, fünf und zehn Minuten.

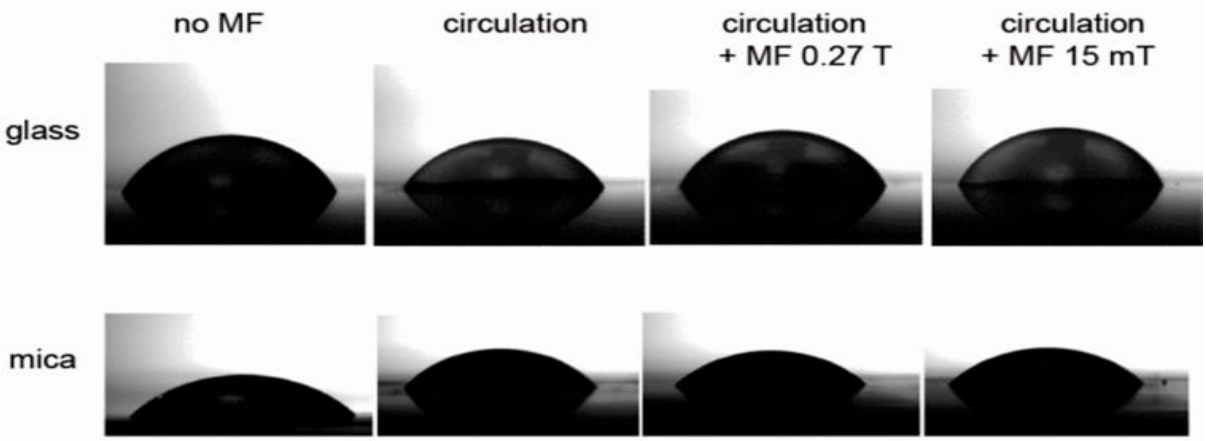


Abbildung 13: Wassertropfen auf den Glas- und Glimmeroberflächen

Die Forschenden bestimmten die Oberflächenspannung sowie die Kontaktwinkel von Wassertropfen auf den untersuchten Oberflächen. Bei den Kontaktwinkeln wurden teilweise Veränderungen beobachtet, deren Ausprägung von der Oberfläche und den Versuchsbedingungen abhing.

Kontaktwinkel

Der Kontaktwinkel θ ist der Winkel zwischen einer festen Oberfläche und der Tangente an einen Wassertropfen.

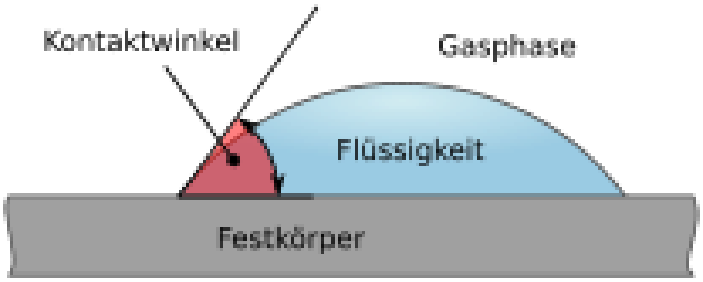


Abbildung 14: Kontaktwinkel

- Kleiner Kontaktwinkel (unter 90°): Das Wasser breitet sich eher aus. Die Oberfläche ist hydrophil.
- Grosser Kontaktwinkel (über 90°): Der Tropfen bleibt eher kugelförmig. Die Oberfläche ist hydrophob.
- Kontaktwinkel nahe 0°: Das Wasser benetzt die Oberfläche nahezu vollständig.

Kapillarität und Kapilaritätgleichung

Kapillarität beschreibt, warum Wasser in sehr engen Röhrchen oder Poren von selbst aufsteigen kann. Ein Beispiel ist ein dünnes Glasröhrchen, das in Wasser steht. Weil Wasser Glas normalerweise gut benetzt, steigt das Wasser im Röhrchen höher als der Wasserspiegel ausserhalb.

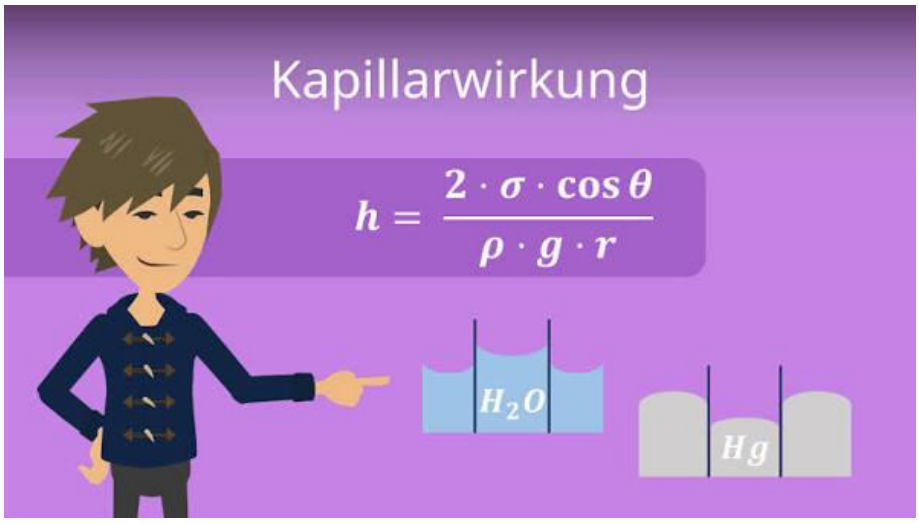


Abbildung 15: Kapillarität und Kapilaritätgleichung

Fazit

Die Änderungen der Oberflächenspannung waren dagegen sehr klein und statistisch nicht signifikant. Zusätzlich zeigte sich, dass bereits die Wasserzirkulation ohne Magnetfeld Messwerte beeinflussen konnte. Dies verdeutlicht die Bedeutung geeigneter Kontrollversuche.Die Untersuchung liefert Hinweise darauf, dass das Benetzungsverhalten unter bestimmten Bedingungen beeinflusst werden könnte. Ein eindeutiger Nachweis einer veränderten Oberflächenspannung gelang jedoch nicht.

McMahon (2009) – Überprüfung verschiedener Wasserparameter

McMahon untersuchte im Rahmen einer Bachelorarbeit an der University of Southern Queensland die Auswirkungen magnetischer Wasserbehandlung auf verschiedene Wasserparameter. Hierfür wurde eine eigene Versuchsvorrichtung mit sechs Paaren von Permanentmagneten entwickelt.
Zu den untersuchten Grössen gehörten der pH-Wert, der gelöste Sauerstoff, das Erwärmungs- und Abkühlverhalten sowie die Ausfällung von Calciumcarbonat. Ergänzend wurden Versuche zum Pflanzenwachstum und zur Betonfestigkeit durchgeführt.
Bei den Erwärmungsversuchen verliefen die Temperaturkurven von behandeltem und unbehandeltem Wasser nahezu identisch. Ein eindeutiger Einfluss auf das Erwärmungsverhalten konnte nicht festgestellt werden. Bei anderen Messgrössen traten zwar teilweise Unterschiede auf, diese waren jedoch nicht ausreichend reproduzierbar.
Der Autor identifizierte verschiedene mögliche Störfaktoren, darunter die Durchmischung des Wassers, unterschiedliche Ausgangsbedingungen und die begrenzte Genauigkeit einzelner Messgeräte.

6.3 Untersuchungen zur Kristallisation von Calciumcarbonat

Herzog et al. (1989) – Einfluss von Eisen auf die Kalkkristallisation

Herzog et al. untersuchten mögliche Ursachen für die in der Literatur beschriebenen Wirkungen magnetischer Wasserbehandlung. Im Mittelpunkt stand die Frage, ob Eisenionen die Keimbildung und das Wachstum von Calciumcarbonat beeinflussen können.
Die Forschenden stellten fest, dass gelöste zweiwertige Eisenionen (Fe^{2+}) das Wachstum von Calcit deutlich hemmen können. Das Wachstum von Aragonit wurde dagegen wesentlich weniger beeinflusst. Ausserdem wurde beobachtet, dass Eisenionen die Umwandlung von Aragonit in Calcit verzögern können.

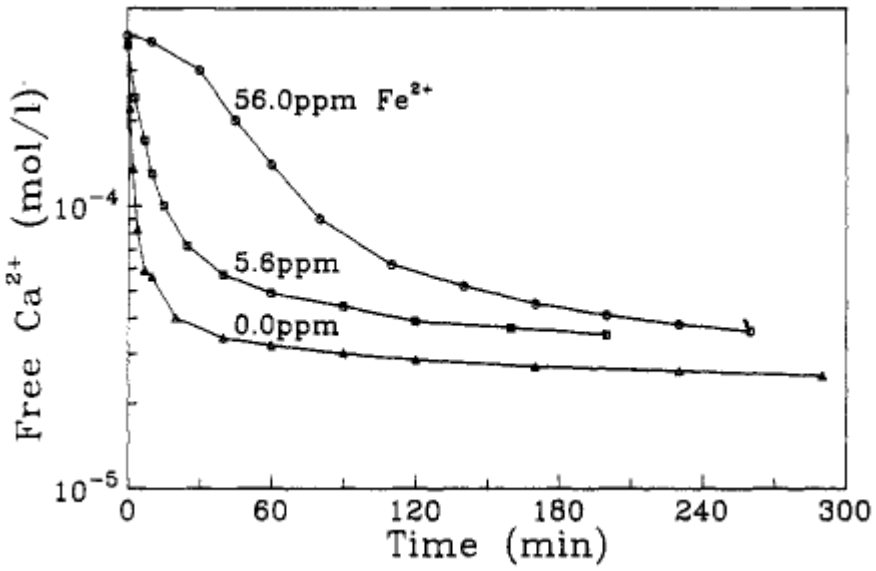


Abbildung 16: Einfluss unterschiedlicher Fe2+-Mengen auf das Aragonitwachstum

Diese Ergebnisse sind für die Bewertung magnetischer Wasserbehandlung besonders wichtig. Sie zeigen, dass Veränderungen der Calciumcarbonat-Kristallisation nicht zwingend durch eine direkte Wirkung des Magnetfeldes auf Wassermoleküle erklärt werden müssen. Auch geringe Mengen gelöster Metalle oder Korrosionsprodukte können die Kristallisation beeinflussen.

Kobe et al. (2002) – Einfluss auf die Kristallformen

Kobe et al. untersuchten die Bildung von Calciumcarbonat-Kristallen in einer zirkulierenden Modelllösung unter dem Einfluss von Magnetfeldern. Die Kristallisation wurde durch Erwärmung und die Freisetzung von Kohlendioxid ausgelöst. Die Versuche dauerten acht Stunden bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ungefähr 0,87 m/s.
Die entstandenen Kristalle wurden mittels Röntgendiffraktometrie und Transmissionselektronenmikroskopie untersucht. Die Autoren berichteten deutliche Unterschiede zwischen den unbehandelten und magnetisch behandelten Proben.
Ohne Behandlung bestand der Niederschlag überwiegend aus Calcit. Bei der höchsten in der Ergebnistabelle angegebenen Magnetfeldstärke stieg der Aragonit-Anteil auf 70,6 %, während der Calcit-Anteil auf 28,9 % sank.

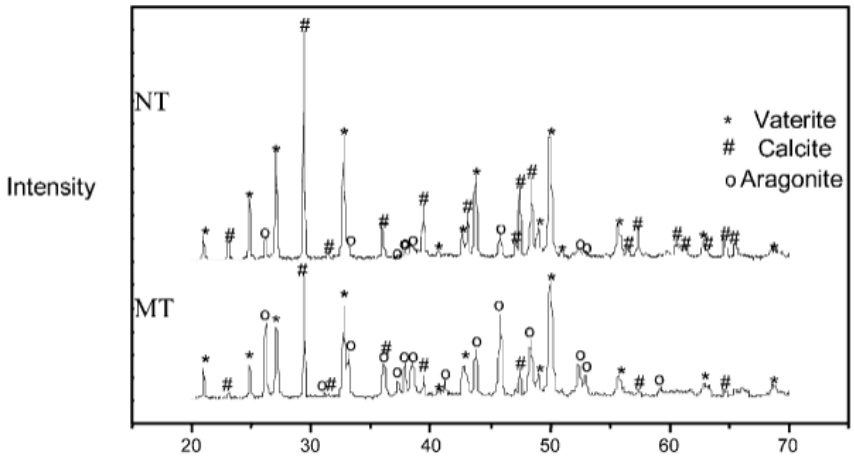


Abbildung 15: Röntgenbeugungsspektren der behandelten Proben: MT – im Magnetfeld (1,4 T) und NT – ohne Magnetfeld

Die Untersuchung liefert damit Hinweise darauf, dass Magnetfelder unter bestimmten Bedingungen die Zusammensetzung der Calciumcarbonat-Kristalle beeinflussen können.

Liu et al. (2010) – Kristallmorphologie und Oberflächenstruktur

Liu et al. untersuchten die Auswirkungen magnetischer Wasserbehandlung auf die Form und innere Struktur von Calciumcarbonat-Kristallen. Die Versuche wurden in einem geschlossenen Wasserkreislauf mit Stahlrohren durchgeführt. Die Magnetfeldstärken lagen zwischen 10 und 40 mT, die Strömungsgeschwindigkeit betrug ungefähr 0,5 m/s.

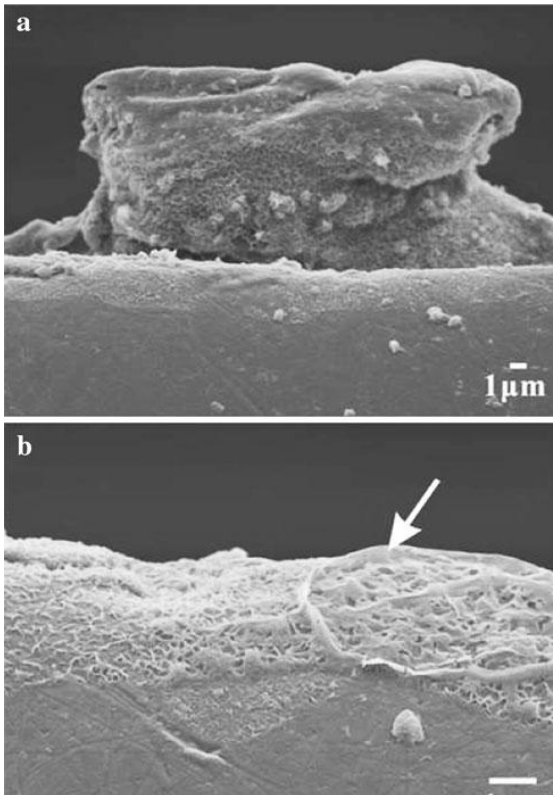


Abbildung 18: SEM-Sekundärelektronenbild einer Querschnittsansicht

Die entstandenen Ablagerungen wurden mit verschiedenen Methoden analysiert, darunter Röntgendiffraktometrie, Elektronenmikroskopie und spektroskopische Verfahren. Die Forschenden fanden hauptsächlich Calcit sowie kleinere Mengen Aragonit und Magnetit. Besonders interessant waren die beobachteten Veränderungen der Kristalloberflächen und der inneren Gitterstrukturen. Kleine Calcit-Nanopartikel lagerten sich teilweise zu grösseren Verbänden zusammen.

Die Autoren diskutierten, ob magnetohydrodynamische Kräfte und Veränderungen während des Kristallwachstums für diese Strukturen verantwortlich sein könnten. Daraus leiteten sie die Vermutung ab, dass bestimmte Calciumcarbonat-Ablagerungen möglicherweise leichter von technischen Oberflächen entfernt werden könnten.

El Hafidi und El Hafidi (2017) – Veränderung des Aragonit-Anteils

El Hafidi und El Hafidi untersuchten den Einfluss statischer Magnetfelder auf die Bildung von Calciumcarbonat-Kristallen. Dazu wurden Leitungswasser und Mineralwasser in einem geschlossenen Wasserkreislauf behandelt. Die magnetische Flussdichte betrug ungefähr 0,3 T, der Durchfluss etwa 1 l/min.
Anschliessend wurden die gebildeten Kristalle mittels Röntgendiffraktometrie untersucht. Die Autoren berichteten, dass der Aragonit-Anteil bei beiden Wasserarten zunahm.
Beim Leitungswasser stieg der Anteil von 30 % auf 47 %, beim Mineralwasser von 27 % auf 52 %. Im Durchschnitt entsprach dies einer Zunahme von ungefähr 29 % auf 50 %.

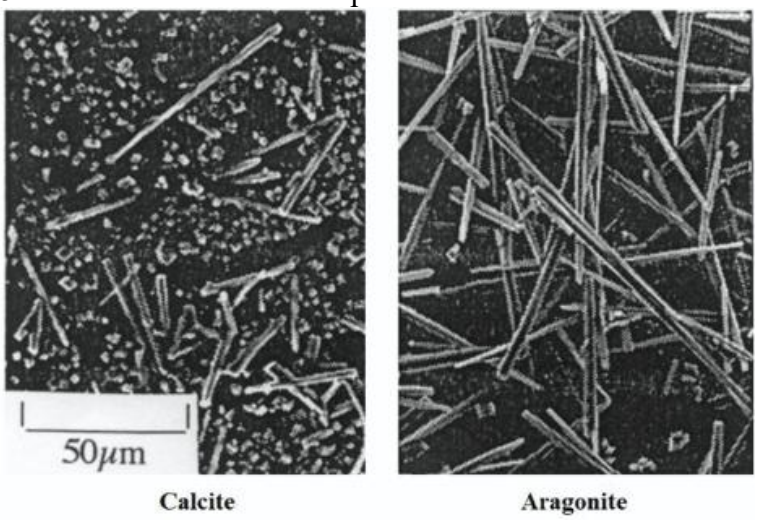


Abbildung 19: Calcite vs Aragonite

Die Autoren vermuteten, dass die verstärkte Aragonitbildung zu weniger kompakten Kalkablagerungen führen könnte. Eine solche Wirkung ist grundsätzlich von Interesse, da Ablagerungen auf Wärmeübertragungsflächen den Wärmeübergang beeinträchtigen können.

Die Aussagekraft der Untersuchung ist jedoch begrenzt. Die statistische Auswertung und die Dokumentation wiederholter Messungen sind nicht ausreichend ausführlich. Ausserdem wurden weder die Entfernung bestehender Kalkschichten noch die Haftfestigkeit oder der Energieverbrauch direkt gemessen.

6.4 Untersuchungen an technischen Wasseranlagen

Latva et al. (2016) – Kalkablagerungen in Rohrleitungen

Latva et al. untersuchten magnetische Wasserbehandlung sowohl in einer neu aufgebauten Pilotanlage als auch in einem bestehenden Trinkwassernetz. Damit verbindet die Studie kontrollierte Versuchsbedingungen mit Beobachtungen aus der Praxis.
Die Pilotanlage bestand aus acht parallelen Rohrleitungen aus Kupfer und Kunststoff. Behandelte Leitungen wurden mit unbehandelten Vergleichsleitungen verglichen. Das eingesetzte Gerät erzeugte ein zeitlich veränderliches Magnetfeld mit einer maximalen Flussdichte von 26 mT.
Nach ungefähr elf Monaten bestimmten die Forschenden die Calciumablagerungen auf den Rohrinnenflächen. Bei den Kupferleitungen sank der gemessene Wert von 1,53 auf 1,31 µg/cm². Bei den Kunststoffleitungen verringerte er sich von 0,57 auf 0,48 µg/cm². Dies entspricht einer Reduktion von ungefähr 14 bis 16 %. Zusätzlich wurden Unterschiede in der Oberflächenstruktur

der Ablagerungen beobachtet.

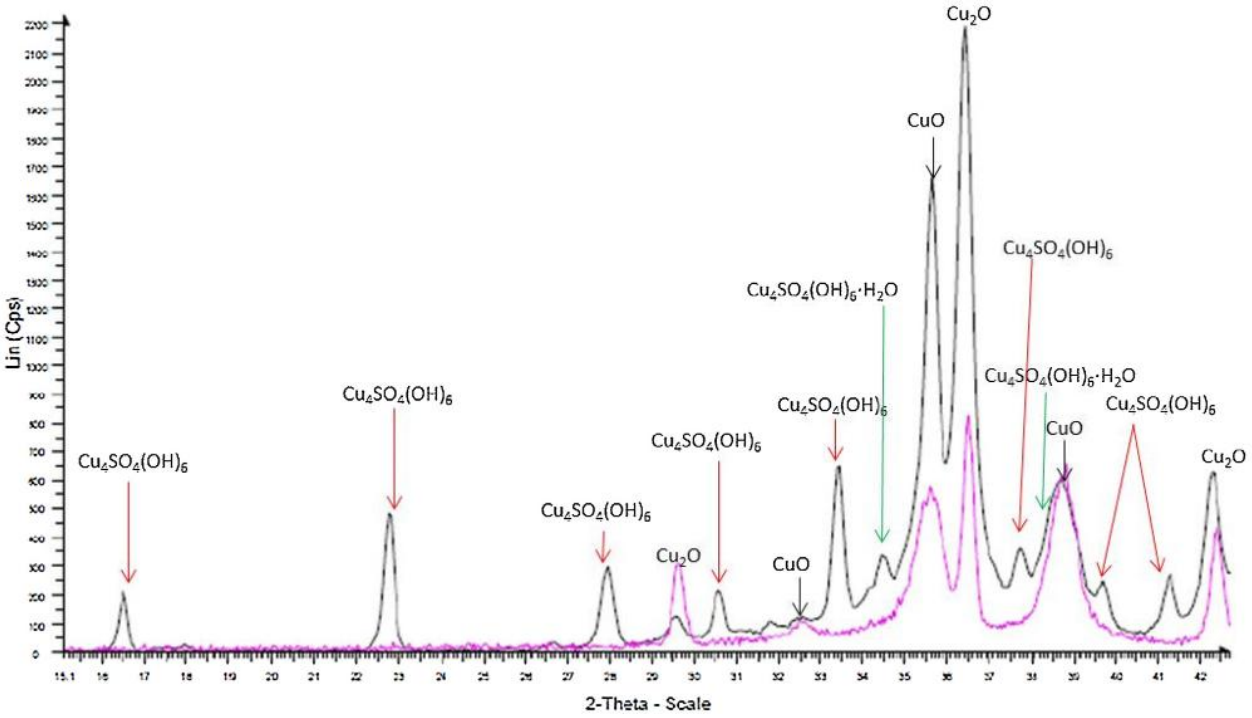


Abbildung 20: Diffraktogramme von Rohrproben, schwarze Linie vor MWT,violette nach MWT nach einem Jahr

Die Untersuchung ist für industrielle Anwendungen besonders relevant, weil sie Ablagerungen direkt an technischen Oberflächen betrachtet. Allerdings wurden weder der Wärmeübergang noch die Pumpenleistung oder der Energieverbrauch gemessen. Zudem können die Ergebnisse nicht unmittelbar auf andere Geräte oder Wasserzusammensetzungen übertragen werden.

6.5 Ergänzende Untersuchungen von Boson Distribution

VUT Brno (2018) – Thermische Eigenschaften von behandeltem Wasser

Eine im Jahr 2018 an der Fakultät für Chemie der Technischen Universität Brno durchgeführte Untersuchung befasste sich mit den thermophysikalischen Eigenschaften elektromagnetisch behandelten Wassers. Die Analyse wurde im Auftrag von Blue Boson SE durchgeführt und bezog sich auf eine Behandlung mit dem System Scat®Rexcit (Neu Hippotron)
Untersucht wurden unter anderem die Dichte, die spezifische Wärmekapazität sowie die Schmelz- und Verdampfungsenthalpie von behandeltem und unbehandeltem deionisiertem Wasser. Dazu wurden kalorimetrische und weitere physikalische Messmethoden eingesetzt.
Im Bericht werden eine geringfügige Erhöhung der Dichte sowie Veränderungen verschiedener thermischer Messgrössen angegeben. Besonders auffällig sind die berichtete Verringerung der Schmelzenthalpie um ungefähr 2,46 % und die Erhöhung der spezifischen Wärmekapazität um ungefähr 12,5 %.

Physikalische Eigenschaft	Mit BOSON Scat®Rexcit behandeltes Wasser	Deionisiertes Wasser (unbehandelt)	Veränderung durch Behandlung* (%)
Dichte (kg/m³) bei 20 °C	998,292 ± 0,002	998,220 ± 0,002	+0,007
Schmelzenthalpie (J/g)	317 ± 2	325 ± 2	−2,46
Verdampfungsenthalpie (J/g)	1925 ± 11	2090 ± 51	−7,89
Spezifische Wärmekapazität c_p (J/(g·°C)) bei 20 °C	4,67 ± 0,33	4,15 ± 0,07	+12,5

Tabelle 10: Vergleich der Dichte, Schmelzenthalpie, Verdampfungsenthalpie und spezifischen Wärmekapazität von unbehandeltem deionisiertem Wasser und mit BOSON Scat®Rexcit behandeltem Wasser

Quantenmechanische Grundlagen der elektromagnetischen Wasserbehandlung

Das Dokument «Komplexná analýza kvantovo-mechanických a termodynamických vlastností kvapalnej vody v excitovaných stavoch indukovaných elektromagnetickým žiarením» beschäftigt sich mit der Frage, wie elektromagnetische Strahlung die molekularen Eigenschaften von flüssigem Wasser beeinflussen könnte. Die Analyse beschreibt Wasser als ein dynamisches System, in dem die Moleküle durch Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verbunden sind. Diese Verbindungen verändern sich ständig und beeinflussen wichtige Eigenschaften wie Wärmekapazität, Dichte und Oberflächenspannung.
Ein Schwerpunkt des Dokuments ist die Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Energie und Wassermolekülen. Dabei werden verschiedene Formen der molekularen Anregung betrachtet. Je nach Frequenz und Energie können beispielsweise Bewegungen und Schwingungen der Moleküle beeinflusst werden.
Zusätzlich wird ein quantenmechanisches Modell sogenannter kohärenter Domänen vorgestellt. Nach diesem theoretischen Ansatz könnten sich Gruppen von Wassermolekülen bilden, die sich gemeinsam und geordnet verhalten. Die Autoren diskutieren, ob solche Vorgänge mit Veränderungen der physikalischen Eigenschaften von Wasser zusammenhängen könnten.

Einfluss von HIPPOTRON auf das Verhalten von Farbstoffen in Wasser

Das Dokument «Kvantovo-mechanická a termodynamická analýza interakcie elektromagneticky aktivovanej vody s textilnými polutantmi a nanokompozitným sorbentom GO-Fe_2O_3-PDA» beschäftigt sich mit möglichen Veränderungen des Verhaltens von Farbstoffen in elektromagnetisch behandeltem Wasser.
Die Analyse bezieht sich auf einen Laborversuch, bei dem normales demineralisiertes Wasser mit Wasser verglichen wurde, das zuvor mit HIPPOTRON behandelt worden war. Untersucht wurden drei Farbstoffe: Saturnblau, Ostacetviolett und Methylenblau.
Zur Untersuchung wurde die UV-Vis-Spektroskopie eingesetzt. Mit dieser Methode lässt sich feststellen, wie stark eine Lösung Licht bei bestimmten Wellenlängen absorbiert. Die im Dokument beschriebenen Ergebnisse zeigen Unterschiede in den Absorptionsspektren zwischen den untersuchten Wasserproben.

Zusätzlich wurde ein spezieller Sorbent aus Graphenoxid, Eisenoxid und Polydopamin (GO-Fe_2O_3-PDA) verwendet. Ein Sorbent ist ein Material, das andere Stoffe an seiner Oberfläche binden kann. Damit wurde untersucht, wie sich die Farbstoffe unter verschiedenen Bedingungen aus der Lösung entfernen lassen.
Das Dokument beschreibt insbesondere Veränderungen der Absorptionsmaxima und der Absorptionsintensität. Als mögliche Erklärung werden Veränderungen der Wechselwirkungen zwischen Wasser- und Farbstoffmolekülen diskutiert. Dazu gehören die Polarität der molekularen Umgebung, Wasserstoffbrückenbindungen und theoretische quantenmechanische Effekte.

6.6 Vergleich der Forschungsergebnisse

Die ausgewerteten Untersuchungen behandeln unterschiedliche physikalische und technische Wirkungen. Deshalb ist es wichtig, zwischen direkt gemessenen Eigenschaften und daraus abgeleiteten möglichen Anwendungen zu unterscheiden.

Studie	Hauptuntersuchung	Ergebnis
Herzog et al. (1989)	Eisen und $CaCO_3$-Kristallisation	Fe^{2+} kann Calcitwachstum hemmen
Kobe et al. (2002)	Kristallformen	Veränderung der Calcit-/Aragonitanteile
McMahon (2009)	Wasserparameter, Erwärmung	Kein eindeutiger Behandlungseffekt
Liu et al. (2010)	Kristallmorphologie	Besondere Oberflächen- und Gitterstrukturen
Han et al. (2016)	Optische Eigenschaften	Veränderungen von Absorptionsintensitäten
Latva et al. (2016)	Rohrablagerungen	Rund 14–16 % weniger Calcium an Rohrwänden
El Hafidi et al. (2017)	Kristallformen	Höherer Aragonit-Anteil
VUT Brno (2018)	Thermophysikalische Eigenschaften	Berichtete Änderungen von Wärmekapazität und Enthalpie
Szcześ et al. (2020)	Oberflächenspannung und Benetzung	Kontaktwinkeländerungen; Oberflächenspannung nicht signifikant verändert

Tabelle 11: Vergleich der Forschungsergebnisse

6.7 Zusammenfassung des Forschungsstandes

Die bisherige wissenschaftliche Literatur zeigt, dass magnetische Wasserbehandlung unter bestimmten Bedingungen messbare Veränderungen hervorrufen kann. Besonders häufig werden Auswirkungen auf die Kristallisation von Calciumcarbonat, die Bildung von Kalkablagerungen sowie die Zusammenlagerung von Partikeln beschrieben.
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die magnetische und elektromagnetische Wasserbehandlung ein wissenschaftlich untersuchtes, aber in wesentlichen Punkten noch nicht abschliessend geklärtes Forschungsgebiet darstellt.

7. Anwendungsmöglichkeiten der elektromagnetischen Wasserbehandlung

7.1 Eisflächen und Kältetechnik

Aufbau und Funktionsweise einer künstlichen Eisfläche

Künstliche Eisflächen werden in Eishallen, Eissportzentren und auf saisonalen Eisbahnen eingesetzt. Damit eine stabile Eisfläche entsteht, muss dem Wasser während der Eisbildung Wärme entzogen werden. Auch nach der Herstellung ist eine kontinuierliche Kühlung notwendig, da durch die Umgebung, die Beleuchtung, die Luftfeuchtigkeit und die Nutzung laufend Wärme in die Eisfläche gelangt.
Unter der Eisfläche befindet sich ein Rohrsystem, durch das ein gekühltes Wärmeträgermedium zirkuliert. Häufig werden dafür Wasser-Glykol-Gemische oder andere geeignete Kälteträger eingesetzt. Diese nehmen Wärme aus der Eisfläche auf und transportieren sie zur Kälteanlage.
Die Kälteanlage entzieht dem Wärmeträgermedium die aufgenommene Wärme und gibt sie über einen Verflüssiger beziehungsweise ein Rückkühlsystem an die Umgebung oder an ein Wärmerückgewinnungssystem ab.
Die Herstellung der Eisfläche erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst wird die Unterkonstruktion abgekühlt. Anschliessend werden dünne Wasserschichten aufgetragen, die nacheinander gefrieren. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die gewünschte Eisdicke erreicht ist.

Energiebedarf bei der Eisbildung

Der Wärmebedarf bei der Eisproduktion setzt sich hauptsächlich aus zwei Teilen zusammen: der Abkühlung des flüssigen Wassers bis zum Gefrierpunkt und der anschliessenden Erstarrung.
Für die Abkühlung des Wassers gilt:

$$Q = mc\Delta T$$

Dabei bedeuten:
Q: abzuführende Wärmemenge für die Abkühlung in kJ
m: Wassermasse in kg
c_p: spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg·K)
Δ T: Temperaturdifferenz in K

Für die Erstarrung des Wassers gilt:

$$Q=mLf$$

Dabei ist Lf die spezifische Schmelzenthalpie beziehungsweise Erstarrungsenthalpie des Wassers in kJ/kg.

Der gesamte theoretische Wärmebedarf ergibt sich aus:

$$Q_{ges}: m.c.\ \Delta T + m.Lf$$

Für unbehandeltes Wasser beträgt die spezifische Wärmekapazität bei üblichen Temperaturen ungefähr 4,18 kJ/(kg·K). Die Schmelzenthalpie bei 0 °C liegt bei ungefähr 334 kJ/kg.
Diese Berechnung beschreibt die Wärmemenge, die dem Wasser entzogen werden muss. Sie entspricht nicht direkt dem elektrischen Energieverbrauch der Kälteanlage. Dieser hängt zusätzlich von der Leistungszahl der Kälteanlage sowie von Wärmeverlusten und weiteren Energieverbrauchern ab.

Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch

Der Energieverbrauch einer Eisfläche wird durch verschiedene technische und betriebliche Faktoren beeinflusst.
Ein wichtiger Faktor ist die Eisdicke. Eine dickere Eisschicht vergrössert den thermischen Widerstand zwischen der Eisoberfläche und dem darunterliegenden Kühlsystem. Dadurch kann für die gleiche Oberflächentemperatur eine tiefere Temperatur des Kälteträgers erforderlich werden.

Technische Besichtigung der Eisbahn Martigny

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde eine technische Besichtigung der Eisbahn in Martigny vorgesehen. Ziel war es, den Aufbau einer künstlichen Eisfläche, die Funktionsweise der Kältetechnik und die betrieblichen Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch anhand einer realen Anlage kennenzulernen.
Darüber hinaus sollte geprüft werden, ob die Eisbahn grundsätzlich als möglicher zukünftiger Einsatzort für das elektromagnetische Wasserbehandlungssystem HIPPOTRON ICE infrage kommt.

7.2 HIPPOTRON ICE

HIPPOTRON ICE ist ein System zur physikalischen Wasserbehandlung, das für die Anwendung bei künstlichen Eisflächen vorgesehen ist. Ziel der Technologie ist es, Eigenschaften des verwendeten Wassers beziehungsweise des daraus entstehenden Eises zu beeinflussen und dadurch den Betrieb von Eisflächen zu optimieren.



Abbildung 21: Hippotron Ice

Gemäss den technischen Unterlagen von HIPPOTEAM wird bei einer beschriebenen Ausführung das Wasser durch eine Behandlungskammer geführt, in der elektromagnetische Anregungen eingesetzt werden. Die Dokumentation nennt unter anderem Hochfrequenzgeneratoren, interne Wirkkomponenten und eine Behandlungskammer. Das System ist deshalb nicht mit einem einfachen Permanentmagneten gleichzusetzen, der aussen an einer Rohrleitung befestigt wird.

Durchflussmenge	6.4 m^3/h
Temperatur (max.)	90 °C
Druck (max.)	1.6 Mpa / 16 Bar
Stromversorgung	230 V – 50 Hz
Stromverbrauch	120 mA
Ausgangsleistung	600 mW
Gewicht	8.5 kg
Anschlüsse	1 Zoll Inox Aussengewinde
Abmessungen	1000 x 116 x 110mm

Abbildung 22: Technische Details Hppotron Ice

Anwendung bei der Eisproduktion

HIPPOTRON ICE wird im Zusammenhang mit der Wasseraufbereitung für Gefriere Prozess eingesetzt. Für eine kontinuierliche Behandlung ist deshalb entscheidend, welche Wasserströme tatsächlich durch das Gerät geführt werden. Dazu gehören je nach Anlagenaufbau die Wasserzufuhr, ein vorhandener Speicher und die Versorgung der Eisaufbereitungsmaschine. Die konkrete Einbaustelle muss für jede Anlage separat geprüft werden. Die Wasserbehandlung ersetzt ausserdem nicht automatisch andere erforderliche Massnahmen zur Sicherstellung der Wasserqualität.



Abbildung 23: Hippotron Ice Installation

Erwartete technische Auswirkungen

Die vom Hersteller beschriebenen Anwendungsmöglichkeiten betreffen insbesondere die Eisbildung, die Temperaturverteilung innerhalb der Eisfläche und die betriebliche Optimierung. Eine mögliche Veränderung der Eisstruktur könnte die Wärmeübertragung innerhalb der Eisdecke beeinflussen. Technisch wäre dies relevant, wenn die erforderliche Eisoberflächentemperatur mit günstigeren Betriebsbedingungen der Kälteanlage erreicht werden könnte.
Ein weiterer möglicher Ansatz besteht in der Reduktion der Temperatur des Wassers für die Eisaufbereitung. Wenn eine ausreichende Eisqualität auch mit weniger stark erwärmtem Wasser erreicht werden kann, muss während der anschliessenden Abkühlung weniger Wärme abgeführt werden.
Zusätzlich kann eine gleichmässige und möglichst geringe Eisdicke den Wärmeübergang verbessern.
Daraus ergibt sich, dass der Nutzen von HIPPOTRON ICE nicht isoliert betrachtet werden darf. Die Wasserqualität, die Eisaufbereitung, die Eisdicke, das Hallenklima und die Regelung der Kälteanlage beeinflussen gemeinsam den Energieverbrauch.

Praxisbeispiel: Eisfeld Quader in Chur

Das Eisfeld Quader in Chur wird in den vorliegenden Herstellerunterlagen als Anwendungsbeispiel für HIPPOTRON ICE beschrieben. Für zwei verglichene Betriebsperioden werden elektrische Energieverbräuche von 244'513 kWh und 220'369,8 kWh angegeben. Dies entspricht einer Differenz von rund 24'143 kWh beziehungsweise 9,87 %.
Neben der Wasserbehandlung wurden jedoch auch betriebliche Veränderungen dokumentiert. Dazu gehörten eine tiefere Temperatur des Wassers für die Eisaufbereitung, eine geringere Eisdicke und Anpassungen an der Glykolverteilung.

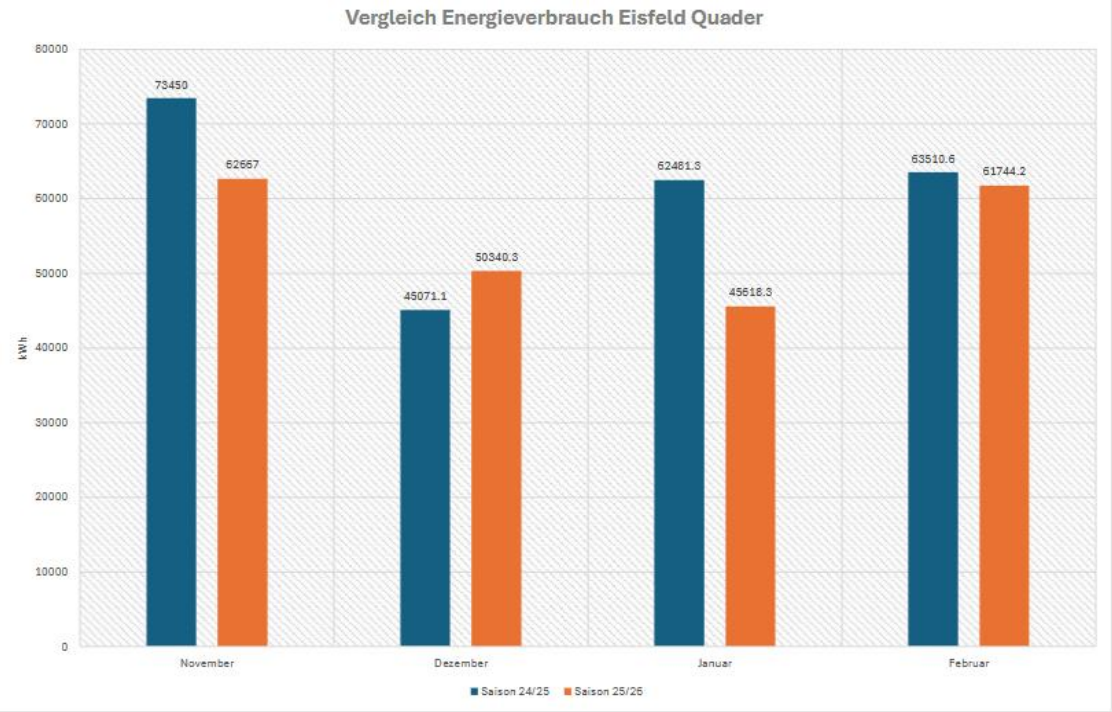


Abbildung 24: Vergleich Energieverbrauch Eisfeld Quader

Praxisbeispiel: Eisstadion Žilina

Für das Eisstadion in Žilina liegen technische Messungen vor, die vor und nach dem Einsatz von HIPPOTRON ICE durchgeführt wurden.
In der dokumentierten Messung vor der Installation betrug die Temperaturdifferenz zwischen der Unterseite und der Oberfläche der Eisdecke 2,25 °C. In vier späteren Messungen lag der Durchschnitt bei ungefähr 0,78 °C.
Auch die gemessenen Oberflächentemperaturen unterschieden sich. Vor der Installation wurde eine durchschnittliche Temperatur von ungefähr −3,4 °C dokumentiert. Die späteren Messungen lagen ungefähr zwischen −6,0 und −6,9 °C.

Kennzahl	Vorher	Nachher	Interpretation gemäss Bericht
Temperaturdifferenz zwischen Eisunterseite und Eisoberfläche (ΔT)	2,25 °C	Durchschnittlich 0,78 °C	Ungefähr 65 % geringerer thermischer Widerstand des Eises
Eisoberflächentemperatur	−3,43 °C	−5,99 bis −6,86 °C	Temperaturbereich, der für eine hochwertige Eisfläche geeignet ist
Temperatur der Kühlplatte	−6,3 °C bei einem Sollwert von −8,0 °C	−8,3 °C bei einem Sollwert von ungefähr −8,0 °C	Leistungsreserve der Kälteanlage
Ebenheit der Eisfläche	18 mm	8–25 mm, abhängig von der Messung	Die gleichmässige Eisaufbereitung bleibt eine betriebliche Herausforderung
Wasser für die Eisaufbereitungsmaschine	Unvollständige Angaben	130–165 ppm TDS	Über dem empfohlenen Zielwert; Verbesserung der Wasseraufbereitung erforderlich
Energetischer Nutzen	Keine Angabe	Geschätzte 48 000–80 000 €/Jahr	Qualifizierte technische Schätzung auf Grundlage der Eisphysik, kein durch Verbrauchsabrechnungen bestätigter Nachweis

Tabelle 12: Vergleich der Messwerte vor und nach dem Einsatz von HIPPOTRON ICE im Eisstadion Žilina

Fazit

Die bisherigen Anwendungen von HIPPOTRON ICE zeigen vielversprechende Möglichkeiten zur Optimierung der Eisproduktion und des Betriebs von Eissportanlagen. Besonders die dokumentierten Ergebnisse aus Chur und Žilina weisen darauf hin, dass die elektromagnetische Wasserbehandlung einen positiven Beitrag zur Verbesserung der Betriebsbedingungen leisten könnte.
Insgesamt zeigen die Praxisbeispiele, dass HIPPOTRON ICE ein interessanter Ansatz für eine

energieeffizientere Eisproduktion sein kann. Die Technologie bietet insbesondere in Verbindung mit einer optimierten Wasseraufbereitung, einer geeigneten Eisdicke und einer angepassten Regelung der Kälteanlage mögliche Vorteile.
Die bisherigen Ergebnisse rechtfertigen deshalb weitere Untersuchungen unter kontrollierten und vergleichbaren Betriebsbedingungen. Besonders wichtig sind dabei direkte Messungen des elektrischen Energieverbrauchs vor und nach der Installation. Damit könnte künftig genauer bestimmt werden, welchen eigenständigen Beitrag HIPPOTRON ICE zur Energieeinsparung leistet.

7.3 Industrielle Wasserkreisläufe HIPPOTRON

Die Technologie HIPPOTRON ist nicht nur für die Behandlung von Wasser in Eisstadien interessant, sondern kann auch in industriellen Wasserkreisläufen eingesetzt werden. Besonders relevant sind Anlagen, in denen grosse Wassermengen kontinuierlich zirkulieren und für Kühlprozesse verwendet werden.
HIPPOTRON arbeitet mit einer elektromagnetischen Behandlung des durchströmenden Wassers. Das Ziel besteht darin, physikalische Vorgänge im Wasserkreislauf günstig zu beeinflussen, ohne dem Wasser zusätzliche chemische Stoffe zuzuführen.



Abbildung 25: Hippotron Industrie

Praxisbeispiel: Kühlwasserkreislauf bei DUSLO

Ein dokumentiertes industrielles Anwendungsbeispiel stammt aus dem Unternehmen DUSLO am Standort Bratislava-Istrochem in der Slowakei.
In der Produktionsanlage Sulfenax wurde ein offener Kühlwasserkreislauf untersucht. Die Anlage dient der Kühlung industrieller Produktionsprozesse und umfasst unter anderem Kühltürme, Umwälzpumpen und Rohrleitungen.
Im Rahmen der Untersuchungen wurde das physikalische Wasserbehandlungssystem SCAT REXIT (HIPPOTRON ICE) eingesetzt. Die Technologie wurde in den Unterlagen mit Blue Boson in Verbindung gebracht.

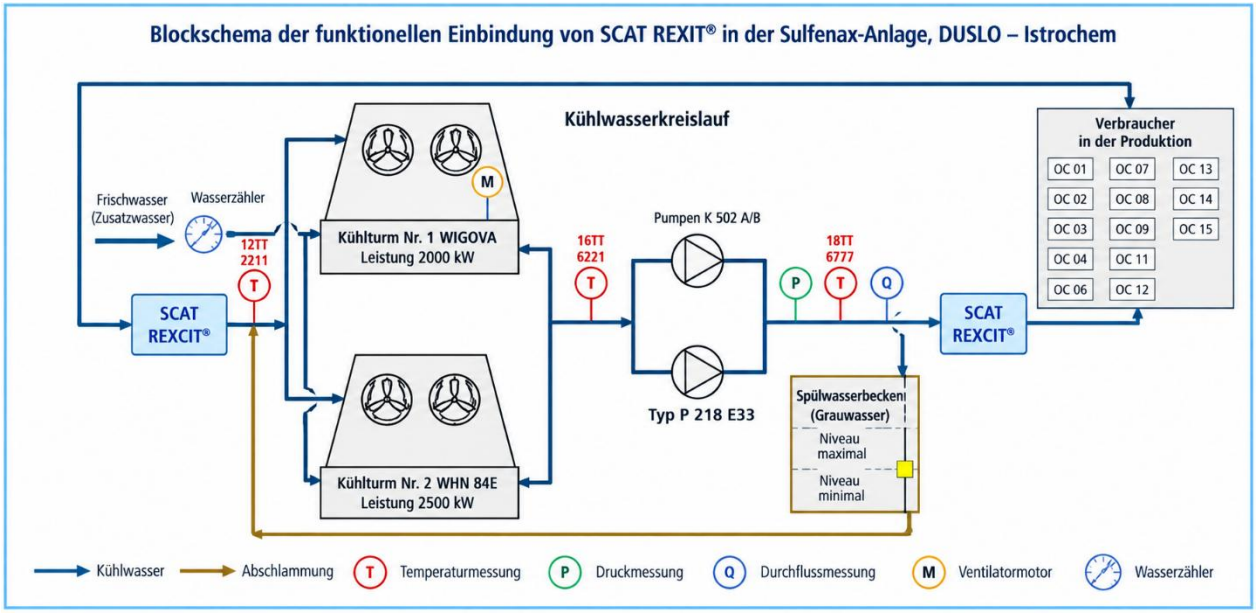


Abbildung 26: Blockschema

Die Untersuchungen im Kühlwasserkreislauf der Sulfenax-Anlage bei DUSLO – Istrochem zeigten positive Ergebnisse hinsichtlich des Ablagerungsverhaltens nach dem Einsatz der physikalischen Wasserbehandlung SCAT REXIT®.

Eine weitere Untersuchung wurde 2019 durch ENGIE Services durchgeführt. Dabei wurde der elektrische Energieverbrauch der Umwälzpumpen und Kühlturmventilatoren sowie die Kühlleistung der Anlage analysiert. Der Abschlussbericht vom 29. Mai 2019 nennt für den untersuchten Zeitraum eine elektrische Energieeinsparung von bis zu 10 %. Gleichzeitig wurde eine Verbesserung der energetischen Effizienz der Kühlanlage beobachtet.

Praxisbeispiel: TOYODA Gosei Czech

Ein weiteres interessantes Anwendungsbeispiel der elektromagnetischen Wasserbehandlung stammt aus dem Unternehmen TOYODA Gosei Czech in Klášterec nad Ohří, Tschechien. Während einer Betriebsunterbrechung im August 2023 wurde die Anlage mit der Wasserbehandlungstechnologie HIPPOTRON ausgerüstet. Anschliessend wurden die Betriebsdaten mit den Messwerten aus der Zeit vor der Installation verglichen.

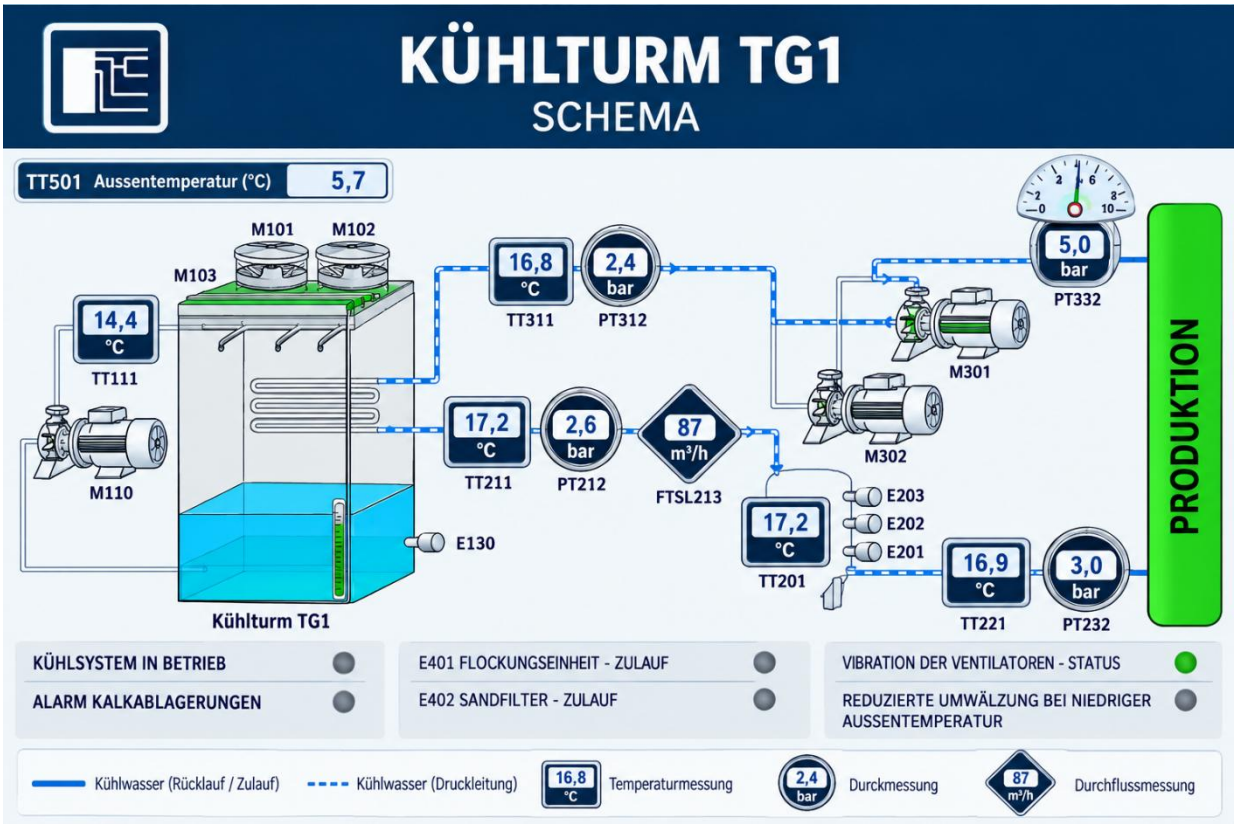


Abbildung 27: Schematische Darstellung des Kühlturms TG1 bei TOYODA Gosei

Nach der Installation wurden deutliche Veränderungen im Betriebsverhalten der Kühlanlage festgestellt. Gemäss dem Bericht verringerte sich der maximale Volumenstrom im geschlossenen Wasserkreislauf von ungefähr 60 m³/h auf etwa 20 m³/h. Gleichzeitig reduzierte sich die angezeigte Pumpenauslastung von ursprünglich rund 30–40 % auf ungefähr 1–20 %.

Auch beim Druck hinter den Pumpen wurde eine Verringerung um ungefähr 50 kPa beziehungsweise 0,5 bar dokumentiert. Das Ergebnis deutet auf ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung der Energieeffizienz industrieller Kühlanlagen hin.

Fazit

Die untersuchten Praxisbeispiele zeigen, dass die elektromagnetische beziehungsweise physikalische Wasserbehandlung ein vielversprechendes Potenzial für industrielle Wasserkreisläufe besitzt. Besonders interessant ist, dass sowohl positive Auswirkungen auf die Bildung von Kalkablagerungen als auch Verbesserungen der Energieeffizienz dokumentiert wurden.

Bei DUSLO – Istrochem wurde durch den Technischen Prüfinstitut Piešťany festgestellt, dass sich auf verschiedenen Materialoberflächen weniger neue Ablagerungen bildeten und bereits vorhandene Inkrustationen schrittweise abgebaut wurden. Diese Ergebnisse sind für industrielle Anlagen von grosser Bedeutung, da Ablagerungen den Wärmeübergang verschlechtern und den Wartungsaufwand erhöhen können. Zusätzlich zeigte die energetische Untersuchung von ENGIE Services aus dem Jahr 2019 bei DUSLO eine berechnete elektrische Energieeinsparung von bis zu 10 % im untersuchten Kühlwasserkreislauf. Damit liegen für diesen Standort nicht nur positive Beobachtungen zum Ablagerungsverhalten, sondern auch konkrete Ergebnisse zur

Energieeffizienz vor.

Auch das Praxisbeispiel TOYODA Gosei Czech zeigt ein deutliches Verbesserungspotenzial. Nach der Installation von HIPPOTRON wurden Veränderungen des Volumenstroms, der Pumpenregelung und der Druckverhältnisse dokumentiert. Die technische Auswertung ergab anhand eines Vergleichsmodells eine durchschnittliche jährliche Energieeinsparung von 36,9 %.

Die dokumentierten Einsparungen beruhen auf betrieblichen Vorher-Nachher-Vergleichen und Berechnungsmodellen. Deshalb lässt sich der alleinige Einfluss der Wasserbehandlung nicht in jedem Fall eindeutig bestimmen. Dennoch liefern die Untersuchungen konkrete und vielversprechende Hinweise auf ein technisch und wirtschaftlich relevantes Einsparpotenzial.

7.4 Wärmetauscher und Kühlanlagen

Bedeutung in der Industrie

Wärmetauscher und Kühlanlagen werden in vielen industriellen Bereichen eingesetzt. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, Wärme von einem Medium auf ein anderes zu übertragen. Dadurch können beispielsweise Maschinen, Produktionsanlagen oder technische Prozesse auf der gewünschten Betriebstemperatur gehalten werden.
Wasser wird häufig als Wärmeträger verwendet, da es eine hohe spezifische Wärmekapazität besitzt und grosse Wärmemengen aufnehmen und transportieren kann.
Die Effizienz einer Kühlanlage hängt von mehreren Faktoren ab. Dazu gehören die Wassertemperatur, der Volumenstrom, die Wärmeübertragungsflächen und der Zustand der Rohrleitungen.

Einfluss von Kalkablagerungen auf die Wärmeübertragung

Die übertragene Wärmeleistung eines Wärmetauschers kann vereinfacht mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$Q = U.A.\ \Delta T_m$$

Dabei bedeuten:

- Q: übertragene Wärmeleistung in W
- U: Wärmedurchgangskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$
- A: Wärmeübertragungsfläche in m^2
- ΔT_m: mittlere Temperaturdifferenz in K

Der Wärmedurchgangskoeffizient beschreibt, wie gut Wärme zwischen zwei Medien übertragen werden kann.Wenn sich Kalk auf einer Wärmeübertragungsfläche bildet, entsteht ein zusätzlicher thermischer Widerstand. Dadurch kann der Wärmedurchgangskoeffizient sinken.

Einfluss des Volumenstroms auf den Energieverbrauch

Neben der Wärmeübertragung ist auch die Wasserzirkulation wichtig. In industriellen Kühlkreisläufen sorgen Pumpen dafür, dass das Wasser kontinuierlich durch Rohrleitungen und Wärmetauscher strömt. Die transportierte Wärmeleistung kann mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$Q = \rho . V . c_p . \Delta T$$

Dabei bedeuten:

- ρ: Dichte des Wassers in kg/m³
- V: Volumenstrom in m³/s
- c_p: spezifische Wärmekapazität in J/(kg·K)
- ΔT: Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf in K

Die Gleichung zeigt, dass die transportierte Wärmeleistung sowohl vom Volumenstrom als auch von der Temperaturdifferenz abhängt. Ein hoher Volumenstrom bedeutet jedoch nicht automatisch eine bessere Energieeffizienz. Wenn die erforderliche Kühlleistung auch mit einem geringeren Volumenstrom erreicht werden kann, lässt sich unter geeigneten Bedingungen elektrische Pumpenenergie einsparen.

Bedeutung der elektromagnetischen Wasserbehandlung

Die elektromagnetische Wasserbehandlung mit HIPPOTRON könnte in industriellen Kühlanlagen auf zwei Arten von Interesse sein.

Erstens wird untersucht, ob die Behandlung das Kristallisations- und Ablagerungsverhalten von mineralischen Stoffen beeinflussen kann. Wenn dadurch weniger feste Ablagerungen auf Wärmeübertragungsflächen entstehen, könnte die Wärmeübertragung länger auf einem günstigen Niveau bleiben.

Zweitens ist die Frage interessant, ob sich die Betriebsbedingungen des Wasserkreislaufs verändern. Dazu gehören beispielsweise der Volumenstrom, die Druckverhältnisse und die Regelung der Pumpen.

Ein entsprechendes Praxisbeispiel wurde bereits in Kapitel 7.3 beschrieben. Bei TOYODA Gosei Czech wurden nach der Installation von HIPPOTRON im August 2023 Veränderungen der Pumpenregelung, des Volumenstroms und der Temperaturdifferenz festgestellt.

Bewertung der Energieeffizienz

Für eine zuverlässige energetische Bewertung muss die bereitgestellte Kühlleistung mit dem elektrischen Energieverbrauch verglichen werden. Eine mögliche Kennzahl ist der Energy Efficiency Ratio (EER):

$$EER = Q . P$$

Dabei bedeuten:

EER: Energy Efficiency Ratio in W

Q: Kühlleistung in W

P: Elektrische Leistungsaufnahme der betrachteten Anlage in W

Fazit

Wärmetauscher und Kühlanlagen bieten ein interessantes Potenzial für den Einsatz elektromagnetischer Wasserbehandlung. Besonders die mögliche Verringerung von Kalkablagerungen und die Verbesserung der Betriebsbedingungen könnten langfristig zur Energieeffizienz beitragen.

8. Eigene Untersuchungen und Berechnungen

8.1 Zielsetzung und Untersuchungsmethode

Das Ziel der eigenen Untersuchungen ist es, mögliche Unterschiede zwischen elektromagnetisch behandeltem und unbehandeltem Wasser festzustellen. Dabei soll geprüft werden, ob sich bestimmte physikalische und chemische Eigenschaften mit einfachen Messmethoden vergleichen lassen.

Praktische Wasseruntersuchungen

Die Versuche werden mit einfachen, handelsüblichen Messgeräten und Hilfsmitteln durchgeführt. Es handelt sich deshalb umorientierende Untersuchungen und nicht um Messungen unter professionellen Laborbedingungen. Um zufällige Abweichungen möglichst zu reduzieren, sollen die Messungen mehrfach wiederholt werden. Bei jedem Versuch werden die Wassermenge, die Temperatur, die verwendeten Geräte und die Umgebungsbedingungen dokumentiert.

Untersuchung	Messgrösse / Methode	Ziel der Untersuchung
Wassertemperatur	Messung mit einem Digitalthermometer in °C	Kontrolle gleicher Temperaturbedingungen bei den Wasserproben
pH-Wert	Messung mit Teststreifen oder pH-Meter	Vergleich des Säure- und Basenverhaltens
Elektrische Leitfähigkeit / TDS	Messung in µS/cm beziehungsweise geschätzter TDS-Wert in ppm	Feststellung möglicher Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit
Kapillarität	Messung der Steighöhe in mm nach festgelegten Zeitintervallen	Untersuchung möglicher Unterschiede im kapillaren Aufstiegsverhalten
Masse und Dichte	Wägung eines definierten Wasservolumens in g; Berechnung der Dichte	Vergleich der Dichte bei gleicher Temperatur
Gefrierverhalten	Beobachtung der Gefrierzeit und gegebenenfalls des Temperaturverlaufs	Untersuchung möglicher Unterschiede beim Gefrieren
Schmelzverhalten	Messung der Schmelzzeit oder Schmelzwassermenge	Vergleich des Auftauverhaltens unter gleichen Bedingungen

Tabelle 13: Übersicht der geplanten praktischen Wasseruntersuchungen

Technische Untersuchung der Kälteanlagen

Neben den Wasserproben werden technische Informationen aus bestehenden Eisanlagen ausgewertet.
Eine erste Besichtigung fand am 13. Oktober 2026 in Martigny statt. Dabei konnten der Aufbau der Kälteanlage sowie verschiedene Betriebswerte betrachtet werden.
Im Eisstadion Chur sollen nach Möglichkeit weitere Informationen zur Eisaufbereitung, zur Kälteanlage und zum Energieverbrauch gesammelt werden. Von besonderem Interesse sind die Eisdicke, die Temperatur des Aufbereitungswassers, die Betriebsbedingungen und die elektrische Energieaufnahme.

Eigene Berechnungen

Als Ergänzung zu den praktischen Untersuchungen wird der theoretische Energiebedarf für die Abkühlung und das Gefrieren von Wasser berechnet.
Dabei werden die spezifische Wärmekapazität und die Schmelzenthalpie berücksichtigt. Die Berechnungen ermöglichen es, die Grössenordnung der benötigten thermischen Energie zu bestimmen und mögliche Veränderungen rechnerisch zu beurteilen.
Die Ergebnisse werden mit ausgewählten Laboruntersuchungen und dokumentierten Praxisbeispielen verglichen.

Grenzen der Untersuchungen

Die geplanten Versuche können Hinweise auf messbare Unterschiede zwischen Wasserproben liefern. Aufgrund der begrenzten Genauigkeit einfacher Messgeräte sind jedoch nicht alle physikalischen Veränderungen zuverlässig nachweisbar. Für den Nachweis einer tatsächlichen Energieeinsparung wären vergleichbare Messungen des Stromverbrauchs und der erbrachten Kühlleistung über einen längeren Zeitraum notwendig. Die eigenen Untersuchungen dienen deshalb vor allem dazu, die theoretischen Aussagen und bisherigen Forschungsergebnisse durch praktische Beobachtungen zu ergänzen und kritisch zu bewerten.

8.2 Technische Besichtigung der Eisanlage Martigny

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Eisanlage in Martigny besichtigt. Eine erste technische Besichtigung fand am 13. Oktober 2026 statt. Am 20. Oktober 2026 folgte ein weiterer Besuch mit einem Fachgespräch mit Laurent Weide, der Informationen über den Betrieb, die Wasserqualität und die energetischen Zusammenhänge der Anlage zur Verfügung stellte. Das Ziel war es, die technischen Anforderungen an die Herstellung und den Betrieb einer Eisfläche besser zu verstehen. Im Mittelpunkt standen die Kälteerzeugung, die Luftentfeuchtung, die Wasserqualität und mögliche Massnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs. Während des Besuchs wurden verschiedene Betriebsanzeigen fotografiert. Die aufgenommenen Werte ermöglichen eine Beschreibung der Anlage unter den zum Aufnahmezeitpunkt vorhandenen Betriebsbedingungen.



Abbildung 28: Eisstadion in Martigny

Aufbau und Funktion der Kälteanlage

Die Eisanlage in Martigny arbeitet mit Ammoniak (NH_3) als Kältemittel im primären Kältekreislauf. Die erzeugte Kälte wird über einen Wärmetauscher an einen sekundären Kreislauf mit einem Glykolgemisch übertragen. Das abgekühlte Glykol wird durch Rohrleitungen unterhalb der Eisfläche gepumpt. Dabei nimmt es Wärme aus der Eisfläche und ihrer Umgebung auf und fliesst anschliessend zur erneuten Abkühlung zurück.

Auf der Steuerungsanzeige vom 20. Oktober 2026 wurden Glykoltemperaturen von −9,9 °C und −8,0 °C angezeigt. Daraus ergibt sich eine Temperaturdifferenz von 1,9 K. Die angezeigte Temperatur der Eisplatte betrug ungefähr −6,0 °C. Ein Infrarotsensor zeigte für die Eisoberfläche −5,53 °C an. Die elektrische Leistungsaufnahme eines Verdichters wurde mit 90,4 kW angezeigt. Bei einer Glykolpumpe waren 7,53 kW ablesbar.



Abbildung 29: Ammoniakanlage

Bedeutung der Luftentfeuchtung

Ein besonders interessantes Thema des Fachgesprächs war die Luftfeuchtigkeit in der Eishalle. Nach den Erläuterungen von Laurent Weide ist die Luftentfeuchtung für einen stabilen und energieeffizienten Betrieb sehr wichtig. Wenn die Luft zu feucht ist, kann sich in der Nähe der kalten Eisoberfläche Nebel bilden. Zusätzlich kann Feuchtigkeit an kalten Oberflächen kondensieren oder gefrieren. Dadurch entsteht eine zusätzliche Wärme- und Feuchtelast für die Kälteanlage. Die Eisqualität kann beeinträchtigt werden, und zur Aufrechterhaltung der gewünschten Betriebsbedingungen kann zusätzliche Energie erforderlich sein. Die Anlage verfügt deshalb über ein Entfeuchtungssystem des Typs CONDAIR DA9400. Auf der fotografierten Steuerungsanzeige war das Gerät eingeschaltet. Mehrere Sensoren zeigten relative Luftfeuchtigkeiten im Bereich von ungefähr 69 bis 75 % an.

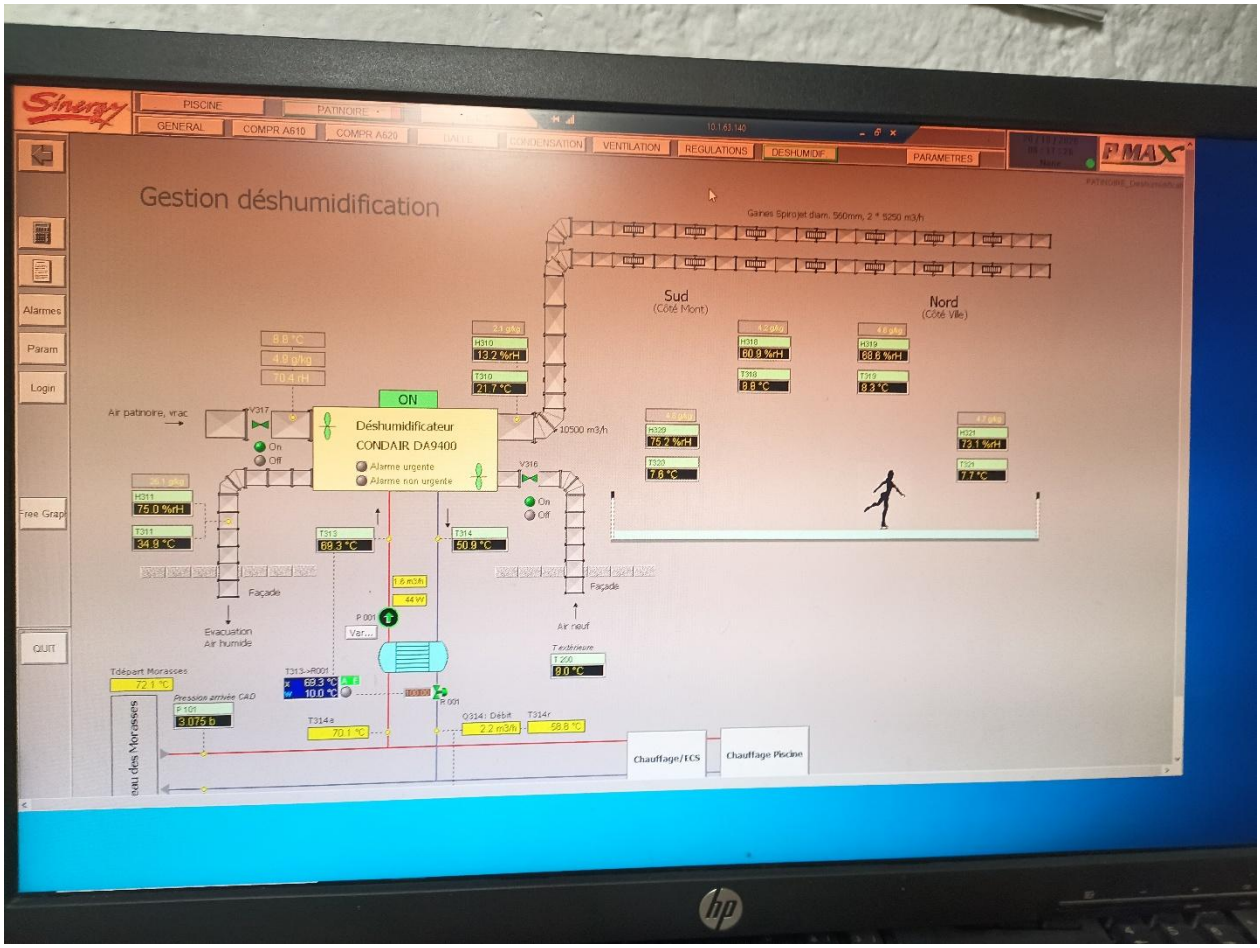


Abbildung 30: Luftentfeuchter

Wasserqualität und mögliche elektromagnetische Behandlung

Im Fachgespräch wurde auch die Wasserqualität besprochen. Nach Aussage von Laurent Weide treten in der Anlage nur geringe Probleme mit Kalkablagerungen auf. Das Wasser für ganz Martigny stammt aus den Bergen der Champex-Region und hat eine Wasserhärte von nur 0,4 mmol/l, was sehr weichem Wasser entspricht. Aus diesem Grund wird eine zusätzliche Wasserbehandlung, beispielsweise mit HIPPOTRON, derzeit nicht als notwendig angesehen. Gleichzeitig wurde die Möglichkeit einer kostenlosen Testinstallation angesprochen. Ob ein solcher Versuch durchgeführt werden kann, soll nach weiteren Gesprächen und einem Austausch mit dem Team in Chur geprüft werden. Eine Testinstallation könnte die Grundlage für zukünftige Vergleichsmessungen bilden. Dafür müssten vor und nach der Installation möglichst vergleichbare Betriebsdaten erfasst werden.

Energetische Verbindung mit dem Schwimmbad

Eine weitere Besonderheit der Anlage ist die Verbindung mit dem benachbarten Schwimmbad. Nach den Erläuterungen beim Besuch wird Wasser aus dem Schwimmbadbereich für einen Wärmeaustausch mit der Kälteanlage genutzt. Dabei kann das Wasser Wärme aus dem Kältesystem aufnehmen und anschliessend mit höherer Temperatur zurückgeführt werden. Diese Verbindung ermöglicht eine energetische Nutzung von Wärme, die bei der Kälteerzeugung

entsteht und andernfalls abgeführt werden müsste.

Bewertung der Besichtigung

Die Besichtigung in Martigny hat gezeigt, dass die Energieeffizienz einer Eisanlage von mehreren technischen Faktoren beeinflusst wird. Dazu gehören die Kälteerzeugung mit Ammoniak, der Glykolkreislauf, die Pumpenregelung, die Eisstärke, die Wasserqualität und insbesondere die Luftentfeuchtung. Auch die Nutzung der anfallenden Wärme im benachbarten Schwimmbad ist ein wichtiger Bestandteil des gesamten Energiekonzepts. Für die Bewertung von HIPPOTRON ist die Aussage zur geringen Kalkbildung besonders relevant. Sie verdeutlicht, dass eine zusätzliche Wasserbehandlung nicht in jeder Anlage den gleichen Nutzen erwarten lässt.

8.3 Versuchsaufbau und Material für die Wasseruntersuchungen

Ziel der Versuche

Im Rahmen der eigenen Untersuchungen ist ein Vergleich zwischen elektromagnetisch behandeltem und unbehandeltem Wasser geplant. Dabei soll geprüft werden, ob mit einfachen Messmethoden Unterschiede in den physikalischen und chemischen Eigenschaften festgestellt werden können.
Die Untersuchungen sollen nach Möglichkeit im Zusammenhang mit der HIPPOTRON-ICE-Anlage im Eisstadion Quader in Chur durchgeführt werden.
Da keine professionelle Laborausrüstung zur Verfügung steht, werden handelsübliche Messgeräte und einfache Versuchsmaterialien verwendet. Die Ergebnisse dienen als orientierende Vergleichsmessungen.

Probenahme und Vorbereitung

Für einen aussagekräftigen Vergleich sollen die Wasserproben möglichst aus derselben Wasserquelle stammen.
Idealerweise wird unbehandeltes Wasser vor dem HIPPOTRON-Gerät und behandeltes Wasser nach dem Gerät entnommen. Dabei ist darauf zu achten, dass beide Proben hinsichtlich Herkunft, Temperatur und Entnahmebedingungen vergleichbar sind.
Die Proben werden in saubere, verschliessbare Behälter gefüllt und eindeutig beschriftet. Für jede Probe werden das Entnahmedatum, die Uhrzeit, die Entnahmestelle und die Wassertemperatur dokumentiert.
Vor den Messungen sollen die Proben möglichst auf die gleiche Temperatur gebracht werden. Dadurch wird der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen reduziert.

Verwendete Messgeräte und Materialien

Für die Untersuchungen sind folgende Materialien vorgesehen:

Material	Verwendung
Digitalthermometer	Messung der Wassertemperatur
EC-/TDS-Messgerät	Messung der elektrischen Leitfähigkeit
pH-Teststreifen oder pH-Meter	Bestimmung des pH-Wertes
GH- und KH-Tropfentests	Bestimmung der Wasserhärte
Gleiche Kunststoffbehälter	Gefrier- und Schmelzversuche
Filterpapier und Lineal	Untersuchung der Kapillarität
Feinwaage	Messung der Wassermasse
Präzises Volumenmessgerät	Bestimmung eines definierten Wasservolumens
Stoppuhr	Zeitmessung bei den Versuchen
Probenflaschen und Etiketten	Entnahme und Kennzeichnung der Wasserproben

Tabelle 14: Materialliste

Die genaue Auswahl der Geräte hängt von ihrer Verfügbarkeit und den Kosten ab.

Geplante Durchführung

Die Wasseruntersuchungen werden in mehreren Schritten durchgeführt.
Zuerst werden die grundlegenden Eigenschaften der Wasserproben bestimmt. Dazu gehören die Temperatur, der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit sowie die Gesamt- und Karbonathärte.
Anschliessend wird das kapillare Aufstiegsverhalten untersucht. Probe mit zwei gleiche Glaskapillaren. Die Kapillaren werden senkrecht in die Wasserproben stellen und die Steighöhe wird über dem äusseren Wasserspiegel messen.
Bei einem weiteren Versuch wird die Masse eines definierten Wasservolumens bestimmt. Die Messungen sollen bei gleicher Temperatur erfolgen. Aus Masse und Volumen kann die Dichte berechnet werden.
Für die Untersuchung des Gefrierverhaltens werden gleiche Wassermengen in identische Behälter gefüllt und unter möglichst gleichen Bedingungen eingefroren. Dabei wird die Zeit bis zur sichtbaren Eisbildung beziehungsweise bis zum vollständigen Gefrieren dokumentiert.
Zusätzlich kann das Schmelzverhalten der gefrorenen Proben untersucht werden. Dazu werden

die Eisproben bei möglichst gleicher Umgebungstemperatur aufgestellt und über einen festgelegten Zeitraum beobachtet.

Wiederholungen und Vergleichbarkeit

Um zufällige Messabweichungen zu reduzieren, sollen die Versuche möglichst mehrfach wiederholt werden.
Besonders bei den Gefrier- und Kapillaritätsversuchen können kleine Unterschiede in den Behältern, der Umgebungstemperatur oder der Versuchsdurchführung die Ergebnisse beeinflussen.
Deshalb werden möglichst identische Materialien verwendet. Die Reihenfolge der Proben und ihre Positionen sollen bei Wiederholungen gewechselt werden.
Für die Auswertung werden die Einzelmessungen dokumentiert und anschliessend die Mittelwerte verglichen.

Grenzen des Versuchsaufbaus

Die geplanten Untersuchungen werden mit einfachen Messgeräten durchgeführt. Ihre Genauigkeit ist begrenzt, weshalb kleine Unterschiede zwischen den Wasserproben möglicherweise nicht zuverlässig festgestellt werden können.

Insbesondere die Dichtemessung ist anspruchsvoll, da bereits kleine Fehler bei der Volumenbestimmung oder Temperaturunterschiede das Ergebnis beeinflussen.

Auch Unterschiede beim Gefrieren können durch Unterkühlung oder zufällige Kristallisationsvorgänge entstehen.

Die Ergebnisse werden deshalb als orientierende Messungen bewertet. Sie können mögliche Veränderungen aufzeigen, ersetzen jedoch keine Untersuchung unter kontrollierten Laborbedingungen.

8.4 Durchführung und Messprotokolle in Chur

Am 27. Oktober 2026 wurden in einer Eishalle in Chur praktische Messungen durchgeführt. Ziel war es, ausgewählte Eigenschaften des Wassers und der Eisfläche mit einfachen Messgeräten zu erfassen. Die Messungen wurden fotografisch dokumentiert.
Für die Untersuchung der Wasserprobe wurde ein digitales Multifunktionsmessgerät verwendet. Damit konnten die Wassertemperatur, der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit, der TDS-Wert und das Redoxpotenzial bestimmt werden. Die Wasserprobe befand sich während der Messung in einem sauberen Behälter.
Zusätzlich wurden Messungen direkt auf der Eisfläche durchgeführt. Dabei kamen ein Temperaturmessgerät mit Kontaktfühler und eine Schieblehre zum Einsatz. Die fotografisch dokumentierten Temperaturanzeigen lagen ungefähr zwischen −5,1 und −4,2 °C. Mit der Schieblehre wurde die Dicke der Eisschicht kontrolliert.

Temperatur- und Eisdickenmessungen auf der Eisfläche

Die Messungen erfolgten an fünf Stellen entlang der Mittellinie der Eisfläche. Zur Temperaturmessung wurde ein elektronisches Thermometer mit einer Messsonde verwendet. Zusätzlich wurde die Eisdicke mit einer Schieblehre bestimmt.
Diese Beobachtung ist technisch nachvollziehbar, da die Betonplatte der Eisfläche über ein Glykol-Kühlsystem gekühlt wird. Die Temperatur nahe der Betonplatte ist deshalb niedriger als die Temperatur an der Eisoberfläche.

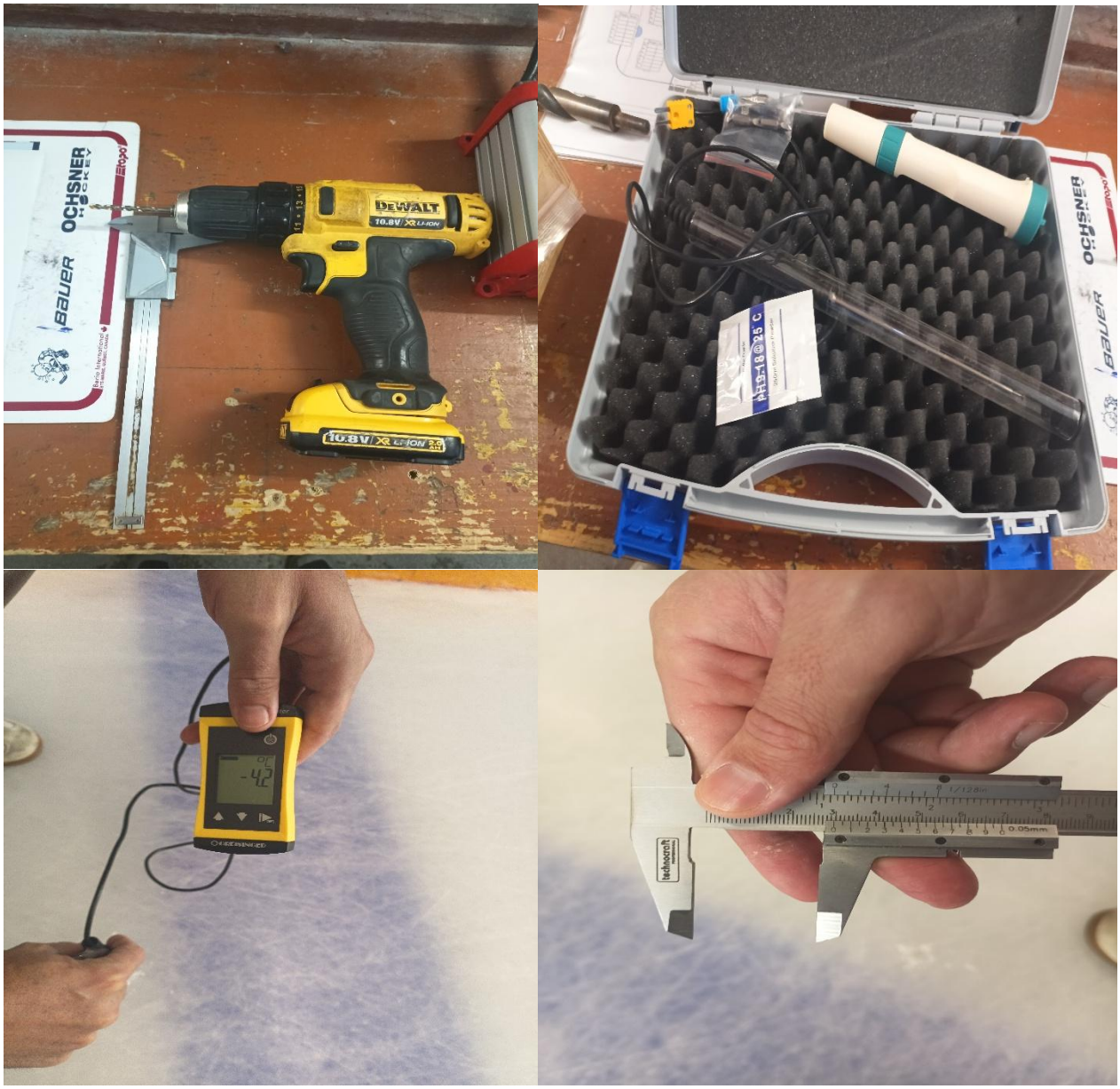


Abbildung 31: Messungen auf der Eisfläche in Chur

Anschliessend wurde an den jeweiligen Messstellen die Eisdicke mit einer Schieblehre kontrolliert. Die Messungen und die verwendeten Geräte wurden fotografisch dokumentiert.

Messstelle	Beton B (°C)	Oberfläche O (°C)	Differenz O − B (K)	Eisdicke D (mm)
1	−5,1	−4,4	0,7	29,5
2	−4,5	−4,0	0,5	25,0
3	−4,5	−3,8	0,7	30,0
4	−4,9	−3,9	1,0	37,0
5	−4,8	−4,1	0,7	35,0
Mittelwert	−4,76	−4,04	0,72	31,3

Tabelle 15: Temperatur- und Eisdickenmessungen – Eisfläche Chur

Die Eisdicke lag zwischen 25 und 37 mm. An allen fünf Stellen war die Temperatur im Bereich der Betonplatte niedriger als an der Eisoberfläche. Die mittlere Temperaturdifferenz betrug 0,72 K.

Wasserproben bei unterschiedlichen Temperaturen

Im Rahmen der eigenen Untersuchungen wurden drei Messreihen durchgeführt. Zuerst wurde unbehandeltes Leitungswasser bei einer Temperatur von ungefähr 10 °C untersucht (U1). Anschliessend erfolgte die Messung einer mit HIPPOTRON behandelten Wasserprobe bei ungefähr 17 °C (H). Zum Schluss wurde erneut unbehandeltes Leitungswasser bei einer Temperatur von ungefähr 22 bis 23 °C gemessen (U2).



Abbildung 32: Wasserprobe

Die Messungen fanden jedoch bei unterschiedlichen Temperaturen statt. Zudem wurde die Temperaturkompensation des Messgeräts nicht unabhängig überprüft. Deshalb ist ein direkter Vergleich nur eingeschränkt möglich.

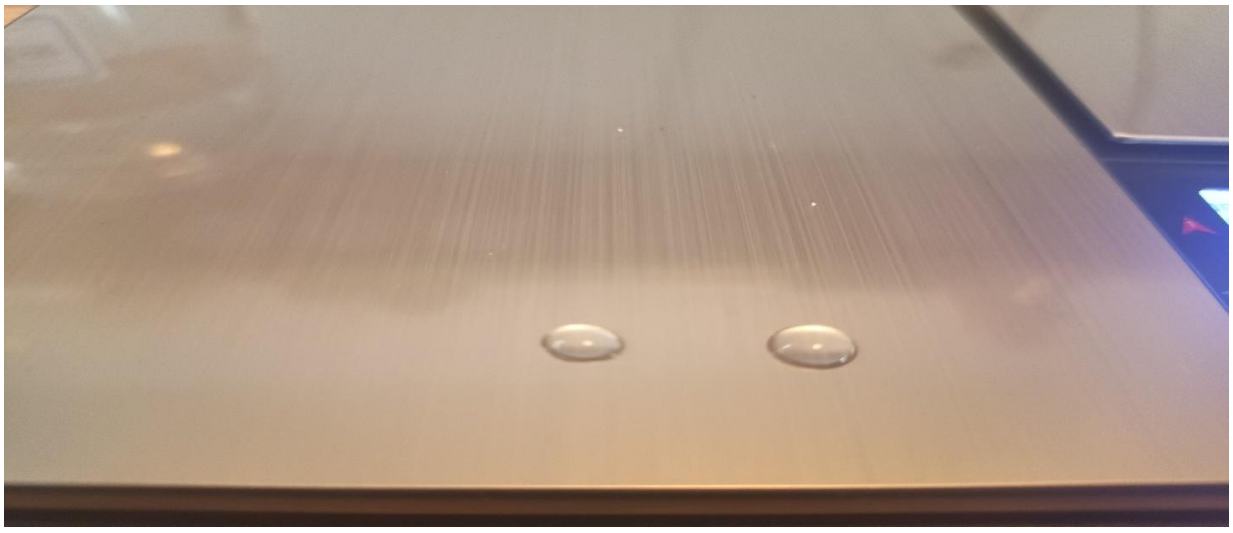
Messgrösse	U1 – unbehandelt	H – HIPPOTRON	U2 – unbehandelt
Temperatur	10,1–10,9 °C	17,0–17,4 °C	ca. 22–23 °C
Elektrische Leitfähigkeit (EC)	251 µS/cm	245 µS/cm	321 µS/cm
TDS	123 ppm	146 ppm	150 ppm
pH-Wert	7,48	7,16	7,19
Salzgehalt	0,01	0,01	0,01
Spezifisches Gewicht	1,000	1,000	1,000
ORP	183 mV	ca. −900 mV, Wert unsicher	160 mV

Tabelle 16: Vergleich den Wasserproben

Die Ergebnisse werden deshalb als orientierende Einzelmessungen betrachtet. Für eine zuverlässige Bewertung wären wiederholte Messungen bei gleicher Temperatur und mit kontrollierten Geräteeinstellungen erforderlich.

Wasserversuche zu Hause am Abend

Am Abend des 27. Oktober 2026 wurde zu Hause ein Vergleich zwischen unbehandeltem Wasser (U) und HIPPOTRON-behandeltem Wasser (H) durchgeführt.
Bei der Tropfenbildung wurde beobachtet, dass die Tropfen des behandelten Wassers grösser erschienen als diejenigen des unbehandelten Wassers.
Auch beim **Versuch mit der Kapillare** war ein optischer Unterschied erkennbar. Die Wasseroberfläche der behandelten Probe zeigte nach subjektiver Beobachtung eine stärker konvexe Form.



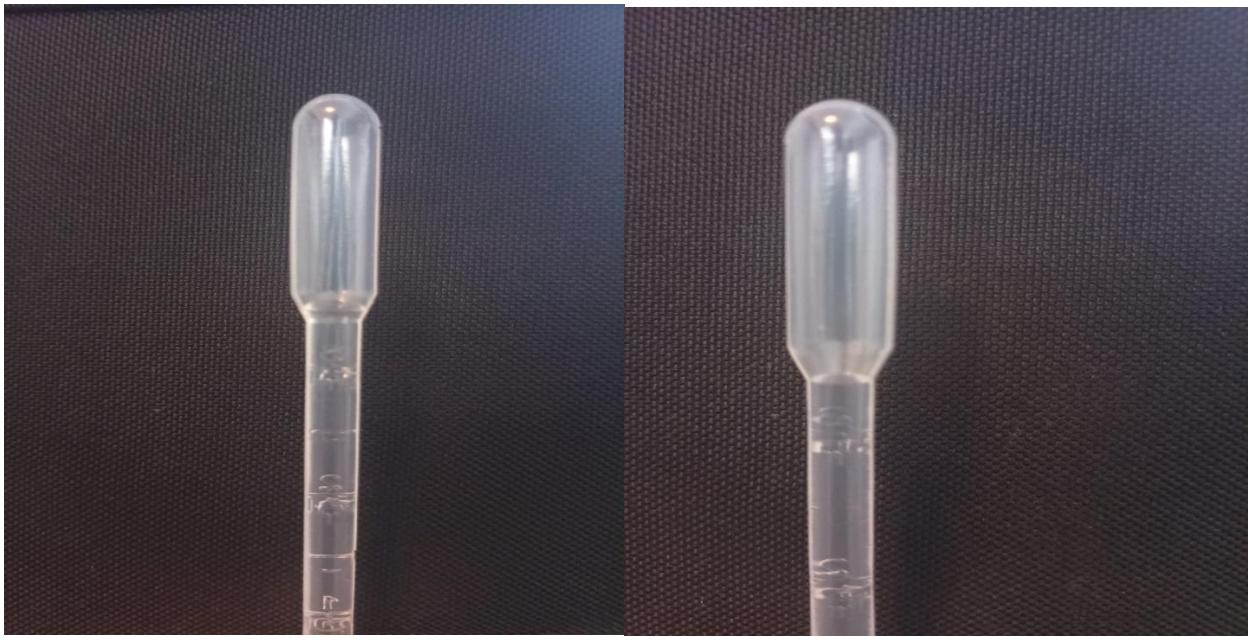


Abbildung 33: Kapillarität

Diese Beobachtungen könnten auf Unterschiede im Benetzungsverhalten oder in der Tropfenbildung hinweisen. Eine Veränderung der Oberflächenspannung lässt sich daraus jedoch noch nicht sicher ableiten.

Nachher wurde zu Hause ein vergleichender **Schmelzversuch** mit unbehandeltem Wasser (U) und HIPPOTRON-behandeltem Wasser (H) durchgeführt. Für beide Proben wurden 60-ml-Dosen verwendet.



Abbildung 34: Schmelzversuch

Nach einer Schmelzzeit von ungefähr zwei Stunden war die unbehandelte Probe vollständig

geschmolzen. Bei der behandelten Probe befand sich dagegen noch ein Eisrest mit einer geschätzten Kantenlänge von etwa 1 cm im Behälter.
Bei gleicher Ausgangswassermenge zeigte sich somit zum Beobachtungszeitpunkt ein Unterschied im Schmelzzustand. Die HIPPOTRON-behandelte Probe war noch nicht vollständig geschmolzen.

Weiter wurden Messungen mit einem **digitalen Wasserqualitätsmessgerät** durchgeführt.
Bei dieser Einzelmessung zeigte die behandelte Probe somit einen höheren pH-Wert und ein höheres Redoxpotenzial, während die angezeigte elektrische Leitfähigkeit und der TDS-Wert niedriger lagen.

Messgrösse	U – unbehandelt	H – HIPPOTRON	Differenz H − U
pH-Wert	7,81	8,03	+0,22
Elektrische Leitfähigkeit (EC)	344 µS/cm	324 µS/cm	−20 µS/cm (−5,8 %)
TDS	172 ppm	165 ppm	−7 ppm (−4,1 %)
Redoxpotenzial (ORP)	137 mV	147 mV	+10 mV

Tabelle 17: Vergleich Messungen mit einem digitalen Wasserqualitätsmessgerät

Die Ergebnisse dokumentieren Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Proben. Ohne wiederholte Messungen, dokumentierte Probentemperaturen und eine Überprüfung der Messunsicherheit kann jedoch nicht festgestellt werden, ob diese Unterschiede durch die elektromagnetische Wasserbehandlung verursacht wurden.

Als ergänzende Untersuchung wurden unbehandeltes Wasser (U) und HIPPOTRON-behandeltes Wasser (H) mit **Mehrparameter-Teststreifen** verglichen.
Die Teststreifen ermöglichen eine orientierende Bestimmung des pH-Werts, der Gesamtalkalinität, des Carbonatgehalts, der Gesamthärte sowie der Nitrat-, Nitrit- und Gesamtchlorgehalte.

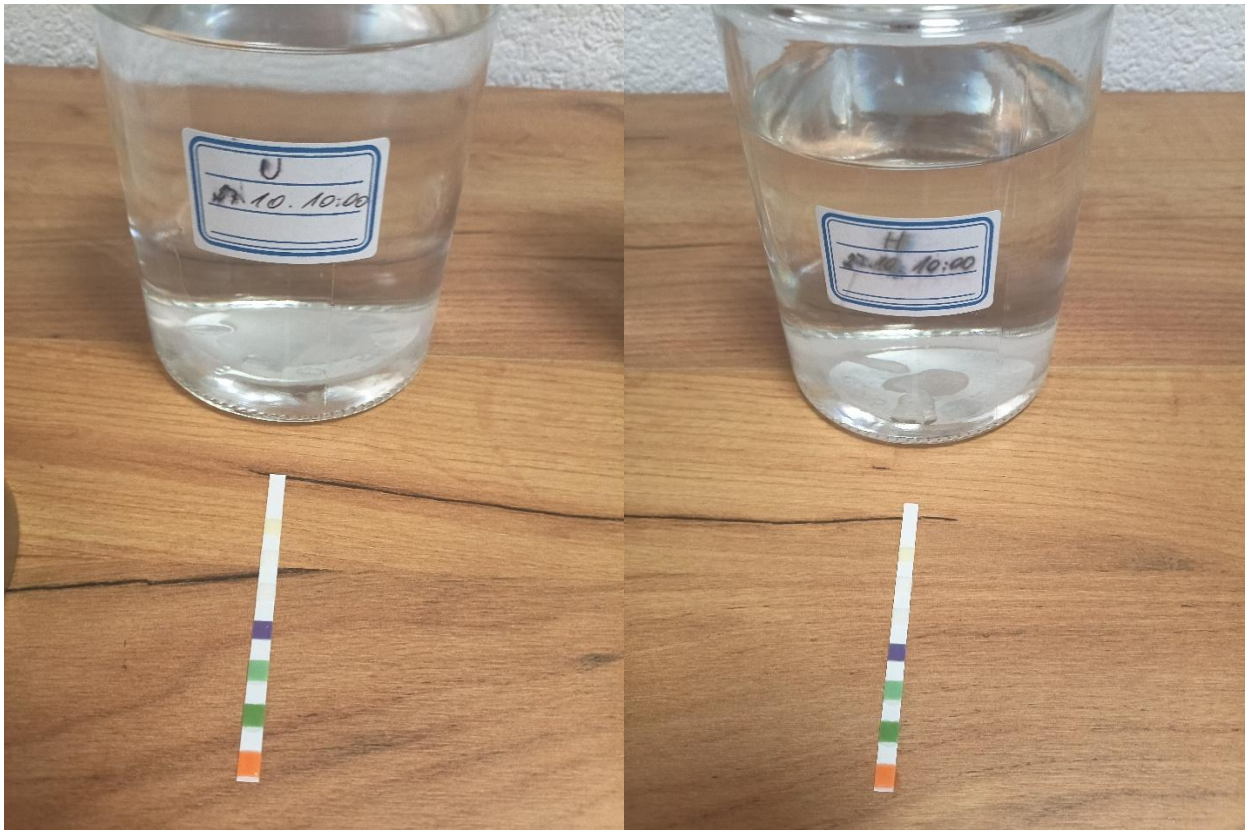


Abbildung 35: Vergleich der Teststreifen

Beim visuellen Vergleich zeigten beide Proben ähnliche Farbreaktionen. Besonders bei der Gesamthärte waren keine eindeutig unterscheidbaren Farbwerte erkennbar. Auch bei den übrigen untersuchten Parametern liessen sich anhand der Fotografien keine zuverlässigen quantitativen Unterschiede feststellen.

Praktische Beobachtungen des Eismeisters in Chur

Neben den technischen Messungen wurden auch die praktischen Erfahrungen des Eismeisters Lukas in Chur berücksichtigt. Er berichtete über mehrere positiven Veränderungen der Eisfläche im Zusammenhang mit der Anwendung der HIPPOTRON-Technologie.
Eine besonders auffällige Veränderung betrifft die Eisaufbereitung mit der Eismaschine. Nach seiner Beobachtung verfestigt sich das aufgetragene Wasser deutlich schneller als zuvor. Diese Veränderung sei nicht nur ihm selbst aufgefallen, sondern auch anderen Mitarbeitenden.
Weiter erklärte er, dass die Schlittschuhe weniger tief in die Eisoberfläche eindringen. Das Eis werde im praktischen Betrieb als deutlich härter wahrgenommen. Während des Spiels entstehe zudem weniger Eisabrieb.
Auch bei der täglichen Pflege der Eisfläche stellte der Eismeister Verbesserungen fest. Das Eis lasse sich einfacher bearbeiten und der notwendige Aufwand sei geringer.

8.5 Eigene thermodynamische Berechnungen

Mit den folgenden Berechnungen soll untersucht werden, wie viel Energie benötigt wird, um Wasser abzukühlen und vollständig zu gefrieren.
Zusätzlich werden die Laborwerte der VUT Brno für elektromagnetisch behandeltes und unbehandeltes Wasser verglichen.
Als Beispiel werden 1'000 kg Wasser verwendet. Das Wasser hat am Anfang eine Temperatur von 10 °C und soll vollständig zu Eis bei 0 °C gefrieren.
Die Berechnungen bestehen aus zwei Teilen. Zuerst wird das Wasser von 10 °C auf 0 °C abgekühlt. Anschliessend wird die Energie berechnet, die beim Gefrieren entzogen werden muss.

Berechnung für unbehandeltes Wasser

Für unbehandeltes Wasser wird eine spezifische Wärmekapazität von 4,15 kJ pro kg und Grad verwendet.

Abkühlen des Wassers

$$1\,000\ \text{kg} \times 4{,}15\ \text{kJ/(kg·K)} \times 10\ \text{K} = 41\,500\ \text{kJ} = \underline{41\ \text{MJ}}$$

Gefrieren des Wassers
Für die Schmelzenthalpie wird der Laborwert von 325 kJ/kg verwendet.

$$1\,000\ \text{kg} \times 325\ \text{kJ/kg} = 325\,000\ \text{kJ} = \underline{325\ \text{MJ}}$$

Gesamte Energie

$$41{,}5\ \text{MJ} + 325\ \text{MJ} = \underline{366{,}5\ \text{MJ}} \div 3{,}6 = \underline{101{,}81\ \text{kWh}}$$

Berechnung für behandeltes Wasser

Für behandeltes Wasser werden die Laborwerte von 4,67 kJ/(kg·K) für die Wärmekapazität und 317 kJ/kg für die Schmelzenthalpie verwendet.

Abkühlen des Wassers

$$1\,000\ \text{kg} \times 4{,}67\ \text{kJ/(kg·K)} \times 10\ \text{K} = 46\,700\ \text{kJ} = \underline{46{,}7\ \text{MJ}}$$

Gefrieren des Wassers

$$1'000\ \text{kg} \times 317\ \text{kJ/kg} = 317'000\ \text{kJ} = \underline{317\ \text{MJ}}$$

Gesamte Energie

$$46{,}7\ \text{MJ} + 317\ \text{MJ} = 363{,}7\ \text{MJ} = \underline{101{,}03\ \text{kWh}}$$

Die Differenz beträgt:

$$366{,}5\ \text{MJ} - 363{,}7\ \text{MJ} = 2{,}8\ \text{MJ} = \underline{0{,}78\ \text{kWh}}$$

Der prozentuale Unterschied beträgt:

$$2{,}8\ \text{MJ} \div 366{,}5\ \text{MJ} \times 100 = \underline{0{,}76\ \%}$$

Berechnung	Unbehandeltes Wasser	Behandeltes Wasser
Energie für Abkühlung	41,5 MJ	46,7 MJ
Energie für Gefrieren	325 MJ	317 MJ
Gesamte thermische Energie	366,5 MJ	363,7 MJ
Gesamte thermische Energie in kWh	101,81 kWh	101,03 kWh

Tabelle 18: Vergleich der Ergebnisse

Das behandelte Wasser benötigt in dieser theoretischen Berechnung ungefähr 0,76 % weniger Energie.

Beispiel für den elektrischen Energieverbrauch

Die berechnete thermische Energie ist nicht gleich dem elektrischen Energieverbrauch.

Eine Kälteanlage kann mit einer Kilowattstunde Strom mehrere Kilowattstunden Wärme transportieren. Das Verhältnis wird als COP bezeichnet.

Für diese Beispielrechnung wird ein COP von 3 angenommen.

Unbehandeltes Wasser:

$$101{,}81 \text{ kWh} \div 3 = 33{,}94 \text{ kWh Strom}$$

Behandeltes Wasser:

$$101{,}03 \text{ kWh} \div 3 = 33{,}68 \text{ kWh Strom}$$

Unterschied:

$$33{,}94 - 33{,}68 = \underline{0{,}26 \text{ kWh Strom}}$$

Unter diesen vereinfachten Bedingungen beträgt die rechnerische Einsparung ungefähr 0,26 kWh Strom pro 1 000 kg gefrorenes Wasser. Der COP von 3 ist ein angenommener Beispielwert und wurde nicht in Martigny oder Chur gemessen. Auch Pumpen, Luftentfeuchtung und weitere Energieverbraucher sind nicht berücksichtigt.

9. Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse

In Kapitel 8 wurden die praktischen Untersuchungen und Messungen dokumentiert. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse kurz zusammengefasst.

Wasserqualität und Wasserhärte

Bei den Wasseranalysen wurden Unterschiede beim pH-Wert, bei der Leitfähigkeit, beim TDS-Wert und beim Redoxpotenzial festgestellt. Auch bei der Tropfenbildung und Kapillarität waren optische Unterschiede sichtbar. Eine eindeutige Veränderung der Wasserhärte oder der Calcium- und Magnesiumkonzentration konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Gefrierverhalten und Eisbildung

Beim Gefrierversuch konnte kein eindeutiger Unterschied festgestellt werden, während die behandelte Probe beim Schmelzversuch länger Eisreste aufwies. Die Messungen in Chur dokumentierten die Temperaturverteilung und Eisdicke der Eisfläche.
Die geringe gemessene Temperaturdifferenz kann auf günstige Wärmeübertragungsbedingungen hinweisen.

Praktische Erfahrungen im Eisstadion Chur

Nach den Erfahrungen des Eismeisters Lukas zieht das Wasser bei der Eisaufbereitung schneller an und die Eisoberfläche wird als härter wahrgenommen. Zudem berichtete er von weniger Eisabrieb, geringerem Pflegeaufwand und einem niedrigeren Bedarf an Kälteleistung.

Energieverbrauch und Einsparpotenzial

Die ausgewerteten Verbrauchsdaten aus Chur zeigen einen geringeren Stromverbrauch zwischen den betrachteten Betriebszeiträumen. Da gleichzeitig weitere technische und betriebliche Optimierungen durchgeführt wurden, kann die Einsparung nicht allein HIPPOTRON zugerechnet werden. Die Ergebnisse weisen jedoch auf ein mögliches Energieeinsparpotenzial hin.

Industrielle Anwendungen

Die untersuchten industriellen Beispiele zeigen mögliche Vorteile der elektromagnetischen Wasserbehandlung in Kühlkreisläufen und bei der Wärmeübertragung. In den Unterlagen zu TOYODA Gosei, DUSLO und Boson Distribution werden energetische Verbesserungen beschrieben. Insgesamt zeigen die industriellen Beispiele ein mögliches technisches Potenzial.

10. Diskussion

Interpretation der Ergebnisse

Die Untersuchungen zeigen, dass zwischen unbehandeltem und HIPPOTRON-behandeltem Wasser einzelne Unterschiede auftreten können. Besonders interessant sind die positiven Erfahrungen aus dem Eisstadion Chur, wo Verbesserungen bei der Eisqualität und der täglichen Pflege beobachtet wurden.

Vergleich mit der wissenschaftlichen Literatur

Die ausgewerteten wissenschaftlichen Untersuchungen beschreiben ebenfalls Veränderungen einzelner Wassereigenschaften unter bestimmten Versuchsbedingungen. Die eigenen Beobachtungen stimmen teilweise mit diesen Ergebnissen überein, sind aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden jedoch nur eingeschränkt vergleichbar. Ein allgemein anerkannter Wirkmechanismus lässt sich daraus nicht ableiten.

Vergleich mit Herstellerangaben

Die Herstellerangaben zu HIPPOTRON ICE beschreiben eine bessere Eisqualität, eine einfachere Eisaufbereitung und mögliche Energieeinsparungen. Einige dieser Angaben stimmen mit den praktischen Erfahrungen des Eismeisters in Chur überein.

Fehlerquellen und Messunsicherheit

Die eigenen Versuche wurden mit einfachen Messgeräten und teilweise unter nicht vollständig kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Unterschiede bei der Wassertemperatur, der Messgenauigkeit und den Umgebungsbedingungen können die Ergebnisse beeinflusst haben. Für zuverlässigere Aussagen wären wiederholte Messungen unter gleichen Bedingungen notwendig.

11. Wirtschaftlichkeit und Ökologie

Für die wirtschaftliche Betrachtung werden die dokumentierten Stromverbrauchs- und Kostendaten des Eisfelds Quader in Chur verwendet. In der Saison 2025/26 betrug der Stromverbrauch von November bis Februar insgesamt 220 369,8 kWh. Die ausgewiesenen Stromkosten beliefen sich auf CHF 120 250.85.

Der durchschnittliche Strompreis wird wie folgt berechnet:

CHF 120 250.85 ÷ 220 369,8 kWh = 0,546 CHF/kWh

Der berechnete Strompreis von 0,546 CHF/kWh erscheint hoch. Es sollte deshalb beim Betreiber nachgefragt werden, wie sich dieser Preis zusammensetzt und ob darin neben den reinen Energiekosten auch Netznutzungsgebühren, Leistungspreise oder weitere Kosten enthalten sind. Bis zur Klärung ist die wirtschaftliche Berechnung mit entsprechender Vorsicht zu betrachten.

Berechnung der Amortisationszeit

Die Amortisationszeit beschreibt, wie lange es dauert, bis die Investitionskosten durch die eingesparten Betriebskosten ausgeglichen werden. Für die Berechnung werden die Investitionskosten durch die jährliche Einsparung geteilt.

Für die Installation eines HIPPOTRON-ICE-Systems werden Investitionskosten von CHF 60 000 inklusive Installation angenommen. Dieser Betrag basiert auf einer Preisangabe für das System.

Beispielrechnung bei 5 % angenommener Stromersparnis

CHF 60 000 ÷ CHF 6 012.54 = 9,98 Jahre

Angenommene Einsparung	Weniger Strom	Rechnerische Kostenersparnis	Amortisationszeit
5 %	11 018,5 kWh	CHF 6 012.54	10 Jahre
10 %	22 037,0 kWh	CHF 12 025.09	5 Jahre
15 %	33 055,5 kWh	CHF 18 037.63	3,3 Jahre

Tabelle 19: Berechnung von hypothetischen Szenarien

Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Die Berechnungen zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit stark von der tatsächlich erreichten Stromersparnis abhängt. Bei einer Einsparung von 5 % würde die Amortisation ungefähr 10 Jahre dauern. Bei 10 % würde sich die Investition nach etwa 5 Jahren amortisieren. Bei 15 % wäre eine Amortisation nach ungefähr 3,3 Jahren möglich.

Ökologische Bewertung

Neben der Wirtschaftlichkeit wird auch untersucht, welche ökologischen Vorteile durch einen

geringeren Stromverbrauch entstehen könnten. Der Emissionsfaktor beschreibt den durchschnittlichen Stromproduktionsmix der Schweiz. Er berücksichtigt Lebenszyklusemissionen, jedoch keine Stromimporte und Netzverluste. Der tatsächliche Emissionsfaktor des Stromprodukts des Eisfelds Quader kann davon abweichen.

Berechnungsbeispiel der möglichen CO_2-Einsparung 5 % Stromersparnis

220 369,8 kWh × 5 % = 11 018,49 kWh

11'018,49 kWh × 0,0392 kg CO_2/kWh = 431,92 kg CO_2

ungefähr 0,43 Tonnen CO_2

Angenommene Stromersparnis	Eingesparte elektrische Energie	CO_2-Reduktion
5 %	11 018,5 kWh	0,43 t CO_2
10 %	22 037,0 kWh	0,86 t CO_2
15 %	33 055,5 kWh	1,30 t CO_2

Tabelle 20: Theoretische CO_2-Reduktion bei verschiedenen Einsparszenarien

Die Berechnungen zeigen, dass eine tatsächliche Reduktion des Stromverbrauchs auch zu einer Verminderung der Treibhausgasemissionen führen könnte.

12. Fazit und Ausblick

12.1 Beantwortung der Forschungsfrage

Die Forschungsfrage dieser Diplomarbeit lautet:

Kann die elektromagnetische Wasserbehandlung messbare Veränderungen bewirken und daraus ein technisch relevantes Potenzial zur Energieeinsparung entstehen?

Die eigenen Untersuchungen und die ausgewerteten Studien zeigen, dass unter bestimmten Bedingungen Unterschiede in den Eigenschaften und im Verhalten von Wasser beobachtet werden können. Auch die praktischen Erfahrungen im Eisstadion Chur weisen auf mögliche Verbesserungen der Eisqualität und der Eisaufbereitung hin.
Diese Ergebnisse deuten auf ein interessantes technisches Potenzial hin. Eine eindeutige Zuordnung aller Veränderungen zur elektromagnetischen Wasserbehandlung sowie ein unabhängiger Nachweis konkreter Energieeinsparungen waren im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht möglich.
Die Forschungsfrage kann deshalb teilweise positiv beantwortet werden: Es bestehen Hinweise auf messbare Veränderungen und mögliche energetische Vorteile, deren Ursachen und Reproduzierbarkeit weiter untersucht werden müssen.

12.2 Persönliches Fazit

Wasser ist ein alltäglicher Stoff, dessen physikalische Eigenschaften für zahlreiche technische Prozesse von grosser Bedeutung sind. Besonders seine Fähigkeit, Wärmeenergie aufzunehmen, zu speichern und wieder abzugeben, macht es zu einem wichtigen Medium in der Energie- und Kältetechnik.
Die Beschäftigung mit verschiedenen Studien und praktischen Untersuchungen hat bei mir die Frage aufgeworfen, ob das technische Potenzial des Wassers bereits vollständig verstanden und genutzt wird. Insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Wassermolekülen, ihren Wasserstoffbrückenbindungen und äusseren elektromagnetischen Feldern bieten interessante Ansätze für weitere Untersuchungen.

Viele Erkenntnisse der Naturwissenschaften entstanden zunächst durch praktische Experimente und Beobachtungen. Erst durch wiederholte Messungen und die Entwicklung geeigneter Modelle konnten die beobachteten Zusammenhänge genauer erklärt werden. Auch bei der elektromagnetischen Wasserbehandlung ist es deshalb wichtig, ungewöhnliche Ergebnisse sorgfältig zu untersuchen, ohne daraus vorschnell allgemeine Schlussfolgerungen abzuleiten.

Die ausgewerteten Studien und die eigenen Beobachtungen zeigen für mich, dass dieses Forschungsgebiet weitere Aufmerksamkeit verdient. Sie beweisen noch keine dauerhafte Veränderung einer besonderen Wasserstruktur, werfen aber interessante Fragen zu möglichen molekularen Wechselwirkungen und deren technischen Auswirkungen auf.

12.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Für die zukünftige Forschung wäre besonders interessant, wie elektromagnetische Felder die molekularen Wechselwirkungen im Wasser beeinflussen können und ob solche Veränderungen unter kontrollierten Bedingungen reproduzierbar sind.
Dabei sollten neben der elektrischen Leitfähigkeit und der Kristallisation auch thermische Eigenschaften wie Wärmekapazität, Erstarrungs- und Schmelzverhalten untersucht werden.
Entscheidend wäre zudem, mögliche Veränderungen auf molekularer Ebene mit messbaren Auswirkungen in technischen Anlagen zu verbinden.
In Eisstadien und industriellen Kühlanlagen könnten langfristige, kontrollierte Vergleichsmessungen zeigen, ob sich daraus tatsächlich eine geringere elektrische Energieaufnahme ergibt.

Aus meiner Sicht liegt das verborgene Potenzial des Wassers nicht in einer bereits bewiesenen neuen Eigenschaft, sondern in den Möglichkeiten, die durch weitere wissenschaftliche Untersuchungen noch entdeckt und technisch genutzt werden könnten.

12.4 Lessons Learned

Während dieser Diplomarbeit habe ich gelernt, wie wichtig es ist, theoretisches Wissen mit praktischen Untersuchungen zu verbinden. Besonders die Besuche in den Eisstadien, die Gespräche mit Fachpersonen und die eigenen Wasserexperimente haben mir geholfen, das Thema besser zu verstehen.
Eine wichtige Erkenntnis war, dass Messungen sorgfältig geplant und unter möglichst gleichen Bedingungen durchgeführt werden müssen. Bereits kleine Unterschiede bei der Temperatur, der Messmethode oder den Umgebungsbedingungen können die Ergebnisse beeinflussen.

Ich habe auch gelernt, zwischen einer praktischen Beobachtung und einem wissenschaftlich nachgewiesenen Zusammenhang zu unterscheiden. Die positiven Erfahrungen aus dem Eisstadion Chur sind wertvoll, müssen aber durch weitere Messungen ergänzt werden, um die Ursachen und mögliche Energieeinsparungen eindeutig zu bestimmen.
Am meisten hat mich überrascht, wie komplex Wasser trotz seiner alltäglichen Verwendung ist. Diese Arbeit hat mein Interesse an den molekularen Eigenschaften des Wassers und an neuen Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz verstärkt.
Für zukünftige Projekte nehme ich mit, dass Offenheit gegenüber neuen Technologien genauso wichtig ist wie kritisches Denken, genaue Messungen und eine objektive Auswertung der Ergebnisse.

12.5 Reflexion – Weg zum Ziel

Der Projektablauf entsprach zu Beginn weitgehend der Planung. Die praktischen Versuche und die Datenauswertung verschoben sich jedoch in die zweite Oktoberhälfte, da die Organisation der Messungen und Besichtigungen mehr Zeit benötigte als erwartet.
Besonders hilfreich waren die Gespräche mit Fachpersonen und der Zugang zu praktischen Anlagen. Eine Herausforderung war die Vergleichbarkeit der Messdaten, da nicht alle Versuche unter identischen Bedingungen durchgeführt werden konnten. Trotz dieser Schwierigkeiten

konnten die wesentlichen Untersuchungen abgeschlossen und die Forschungsfrage kritisch beurteilt werden.

12.6 Verdankungen

Ich bedanke mich bei allen Personen, die mich während meiner Diplomarbeit unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt den Verantwortlichen und Mitarbeitenden der Eisstadien in Chur und Martigny für die Besichtigungen, die praktischen Informationen und die Unterstützung bei den Untersuchungen.
Ebenso danke ich meiner Betreuungsperson und allen weiteren Fachpersonen, die mir mit Informationen, Unterlagen und wertvollen Gesprächen geholfen haben.

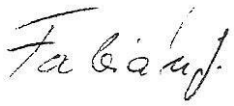
13. Eigenständigkeitserklärung

Arbeiten, die nachweisbar in vollen Umfang oder in den wesentlichen Teilen unverändert oder ohne korrekte Quellenangabe übernommen werden, gelten als vorfabriziert und werden nicht bewertet.

Ich bestätige, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und alle benutzten Quellen gekennzeichnet habe. Diese Arbeit wurde weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits einer Prüfungskommission vorgelegt.

Name / Vorname: Fabian Jaroslav

Ort / Datum / Unterschrift: Fully, 31.10.2026



14. Verzeichnisse

14.1 Literaturverzeichnis

- W. Wagner and A. Pruß, "The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **31**, 387-535 (2002).
- Arkan, S., Akin, S. and Parlaktuna, M: Effect of Calcite Scaling on Pressure Transient Analysis of Geothermal Wells. In: 27th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California Nummer SGP-TR-171. (2002)
- R14-08(2011): Revised Release on the Pressure along the Melting and Sublimation Curves of Ordinary Water Substance
- Chibowski, E.; Szcześ, A. (2018): *Magnetic water treatment – A review of the latest approaches.* Chemosphere, Vol. 203, S. 54–67. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.160.
- Alabi, A.; Chiesa, M.; Garlisi, C.; Palmisano, G. (2015): *Advances in anti-scale magnetic water treatment.* Environmental Science: Water Research & Technology, 1, 408–425. DOI: 10.1039/C5EW00052A.
- Kobe, S.; Dražić, G.; Cefalas, A.C.; Sarantopoulou, E.; Stražišar, J. Nucleation and crystallization of $CaCO_3$ in applied magnetic fields. Cryst. Eng. 2002,
- Herzog, R.E.; Shi, Q.; Patil, J.N.; Katz, J.L. Magnetic Water Treatment: The Effect of Iron on Calcium Carbonate Nucleation and Growth. Langmuir 1989
- Martínez Moya, S.; Boluda Botella, N.; García Quiles, J. Effect of electromagnetic water treatment on carbonate scale. Determination of calcite and aragonite by the Meigen test. In Proceedings of the 14th Mediterranean Congress of Chemical Engineering, Barcelona, Spain, 16–20 November 2020.
- Wang, Y.; Wei, H.; Li, Z. Effect of magnetic field on the physical properties of water. Results Phys. 2018
- Alomari, A.A. Effect of magnetic treatment on temporary hardness of groundwater. Asian J. Chem. 2019
- McMahon, C. A. (2009). Investigation of the Quality of Water Treated by Magnetic Fields. Bachelorarbeit, University of Southern Queensland, Australien.
- Han, X.; Peng, Y.; Ma, Z. Effect of magnetic field on optical features of water and KCl solutions. Optik 2016
- Latva, M.; Inkinen, J.; Rämö, J.; Kaunisto, T.; Mäkinen, R.; Ahonen, M.; Matilainen, J.; Pehkonen, S. Studies on the magnetic water treatment in new pilot scale drinking water system and in old existing real-life water system. J. Water Process Eng. 2016
- Mahmoud, B.; Yosra, M.; Nadia, A. Effects of magnetic treatment on scaling power of hard waters. Sep. Purif. Technol. 2016
- Liu, C.Z.; Lin, C.H.; Yeh, M.S.; Chao, Y.M.; Shen, P. Surface Modification and Planar Defects of Calcium Carbonates by Magnetic Water Treatment. Nanoscale Res. Lett. 2010
- Michael F.H. Krutina: Allgemeine Meteorologie, 2014

- Slaný, J.; Klouda, K. (2025): *Protokol o měření absorbancí vod znečištěných textilními barvivy.* VŠB – Technische Universität Ostrava, Fakultät für Sicherheitsingenieurwesen, Ostrava, Tschechien. Im zweiten Analysebericht zitierte Originaluntersuchung.
- Slaný, J.; Klouda, K. (2025): *Kvantovo-mechanická a termodynamická analýza interakcie elektromagneticky aktivovanej vody s textilnými polutantmi a nanokompozitným sorbentom.* VŠB – Technische Universität Ostrava, Fakultät für Sicherheitsingenieurwesen, Ostrava, Tschechien. *GO-Fe_2O_3-PDA.* Unveröffentlichter Analysebericht,
- Slaný, J.; Klouda, K. (2025): k*omplexná analýza kvantovo-mechanických a termodynamických vlastností kvapalnej vody v excitovaných stavoch indukovaných elektromagnetickým žiarením,* VŠB – Technische Universität Ostrava, Fakultät für Sicherheitsingenieurwesen, Ostrava, Tschechien. Unveröffentlichter Forschungsbericht
- Dr. Gerald H. Pollack (2015), Wasser - viel mehr als H2O

14.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Titelblatt, Quelle: Boson Distribution

Abbildung 2: Projektstrukturplanung, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3: Projektablaufplanung, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 4: Wassermolekül, Quelle: studyflix.de

Abbildung 5: Erscheinungsformen des Wassers, Quelle: Das Wasser, Michael F.H. Krutina

Abbildung 6: Mineralanlagerungen, Quelle: Bundesverband Geothermie

Abbildung 7: Durch Strom hervorgerufenes magnetisches Feld, Quelle: https://www.bfs.de

Abbildung 8: Übersicht des elektromagnetischen Spektrums, Quelle: Wikipedia

Abbildung 10: Elektromagnetisches Feldgeneratorsystem, Quelle: www.mdpi.com

Abbildung 11: Hauptmineralformen von Calciumcarbonat, Quelle: www.mdpi.com

Abbildung 12: SEM-Bild von Aragonitkristallen mit und ohne elektromagnetische Behandlung

Abbildung 13: Wassertropfen auf den Glas- und Glimmeroberflächen, Quelle: Aleksandra Szcze´s, Magnetic Field Effect on Water Surface Tension in Aspect of Glass and Mica Wettability

Abbildung 14: Kontaktwinkel, Quelle: Wikipedia

Abbildung 15: Kapillarität und Kapilaritätgleichung, Quelle: StudyFix

Abbildung 16: Einfluss unterschiedlicher Fe2+-Mengen auf das Aragonitwachstum, Quelle:Ruth E. Herzog, The effect of iron on Calcium Carbonate Nucleation and Growth

Abbildung 17: Röntgenbeugungsspektren der behandelten Proben: MT – im Magnetfeld (1,4 T) und NT – ohne Magnetfeld, Quelle:S. Kobe, Nucleation and crystallization of CaCO3 in applied magnetic fields.

Abbildung 18: SEM-Sekundärelektronenbild einer Querschnittsansicht: Quelle: C. Z. Liu, Surface Modification and Planar Defects of Calcium Carbonates by Magnetic Water Treatment

Abbildung 19: Calcite vs Aragonite, Quelle: M.Y. El Hafidi, Existing Scale Deposits Removal by

Magnetic Water Treatment: Theoretical Study and Experiment

Abbildung 20: Diffraktogramme von Rohrproben, schwarze Linie vor MWT,violette nach MWT nach einem Jahr, Quelle: Martti Latva, Studies on the magnetic water treatment in new pilot scale drinking water system and in old existing real-life water system.

Abbildung 21: Hippotron Ice, Quelle: Factsheet Hippotron ICE 2026

Abbildung 22: Technische Details Hppotron Ice, Quelle: Factsheet Hippotron ICE 2026

Abbildung 23: Hippotron Ice Installation, Quelle: Factsheet Hippotron ICE 2026

Abbildung 24: Vergleich Energieverbrauch Eisfeld Quader, Quelle: Auswertung Energie Quader 24/25

Abbildung 25: Hippotron Industrie, Quelle: Factsheet Hippotron ICE 2026

Abbildung 26: Blockschema, Quelle: TSÚ Piešťany (2018), Bericht zur Untersuchung des Kühlwasserkreislaufs bei DUSLO

Abbildung 27: Schematische Darstellung des Kühlturms TG1 bei TOYODA Gosei, Quelle: TOYODA Gosei Czech, Betriebsvisualisierung des Kühlturms TG1

Abbildung 28: Eisstadion in Martigny, Quelle: Eigene Foto

Abbildung 29: Ammoniakanlage, Quelle: Eigene Foto

Abbildung 30: Luftentfeuchter, Quelle: Eigene Foto

Abbildung 31: Messungen auf der Eisfläche in Chur, Quelle: Eigene Foto

Abbildung 32: Wasserprobe, Quelle: Eigene Foto

Abbildung 33: Kapillarität, Quelle: Eigene Foto

Abbildung 34: Schmelzversuch, Quelle: Eigene Foto

Abbildung 35: Vergleich der Teststreifen, Quelle: Eigene Foto

14.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorgehensmodell, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 2: Projektablaufplanung, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 3: Meilensteine, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 4: Kommunikationsplanung, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 5: Risikoanalyse, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 6: Wasserdichte, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 7: Übersicht Wasser Eigenschaften, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 8: Entstehung der Wasserhärte, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 9: Vergleich der magnetischen und elektromagnetischen Wasserbehandlung, Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Chibowski und Szcześ (2018), Martínez Moya und Boluda Botella (2021) sowie der Patentanmeldung SK 50037-2021 A3.
Tabelle 10: Vergleich der Dichte, Schmelzenthalpie, Verdampfungsenthalpie und spezifischen Wärmekapazität von unbehandeltem deionisiertem Wasser und mit BOSON Scat®Rexcit behandeltem Wasser. Quelle: Untersuchungsbericht der Technischen Universität Brno (2018).
Tabelle 11: Vergleich der Forschungsergebnisse, Quelle: Forschungsstudien

Tabelle 12: Vergleich der Messwerte vor und nach dem Einsatz von HIPPOTRON ICE im Eisstadion Žilina, Quelle: Boson Distribution SE (2026), Analýza ZS Žilina – HIPPOTRON ICE
Tabelle 13: Übersicht der geplanten praktischen Wasseruntersuchungen, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 14: Materialliste, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 15: Temperatur- und Eisdickenmessungen – Eisfläche Chur, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 16: Vergleich den Wasserproben, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 17: Vergleich Messungen mit einem digitalen Wasserqualitätsmessgerät, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 18: Vergleich der Ergebnisse, Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage der Laborwerte der VUT Brno (2018)
Tabelle 19: Berechnung von hypothetischen Szenarien, Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage der Laborwerte der VUT Brno (2018)
Tabelle 20: Theoretische CO_2-Reduktion bei verschiedenen Einsparszenarien, Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage der Energieauswertung des Eisfelds Quader und des Schweizer Emissionsfaktors 2025 von Carbon Recycling / Ember.

14.4 Quellenverzeichnis

Unternehmensinterne Quellen

https://en.bosondistribution.com/#tech
https://hippotronice.com/

Internetquellen

5.1 Wasser, IAPWS, https://iapws.org,
5.3 Wasserhärte, Calcium und Magnesium, https://wasserhaerteschweiz.ch/
5.4 Gefrieren und Kristallisation, https://www.nature.com/articles/s42254-023-00570-7?utm_source=chatgpt.com,
https://www.weltderphysik.de/gebiet/materie/nachrichten/2010/gefrierpunkt-von-wasser-nicht-immer-bei-0c/, https://www.nature.com/articles/nature10586?utm_source=chatgpt.com
5.5 Grundlagen des Magnetismus, 5.6 Grundlagen des Elektromagnetismus,
https://www.supermagnete.ch/magnetismus,
https://www.supermagnete.ch/magnetismus/Elektromagnetismus
5.7.2 Elektromagnetische Wasserbehandlung, https://www.mdpi.com
6.2 Untersuchungen zu physikalischen Eigenschaften von Wasser,
https://de.wikipedia.org/wiki/Kontaktwinkel, https://de.wikipedia.org/wiki/Kapillarit%C3%A4t
11. Wirtschaftlichkeit und Ökologie, https://carbonrecycling.co.uk/de/emission-factors/electricity/switzerland

14.5 Glossar – Erklärung der Fachbegriffe

B – Magnetische Flussdichte
Physikalische Grösse zur Beschreibung der Stärke und Richtung eines Magnetfeldes. Die SI-Einheit der magnetischen Flussdichte ist Tesla (T).

Ca – Calcium
Chemisches Element, das in natürlichem Wasser hauptsächlich als gelöstes Calciumion (Ca^{2+}) vorkommt. Calcium trägt wesentlich zur Wasserhärte bei und spielt bei der Bildung mineralischer Ablagerungen eine wichtige Rolle.

$CaCO_3$ – Calciumcarbonat
Chemische Verbindung aus Calcium-, Kohlenstoff- und Sauerstoffatomen. Calciumcarbonat ist ein wesentlicher Bestandteil von Kalkablagerungen in Rohrleitungen, Wärmetauschern und anderen wasserführenden technischen Anlagen.

CO_2 – Kohlenstoffdioxid
Gasförmige chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff. In der Arbeit wird CO_2 insbesondere im Zusammenhang mit der ökologischen Bewertung und möglichen Emissionseinsparungen betrachtet.

D_2O – Schweres Wasser
Wasser, bei dem die gewöhnlichen Wasserstoffatome durch das Wasserstoffisotop Deuterium ersetzt sind. D_2O besitzt gegenüber gewöhnlichem Wasser teilweise abweichende physikalische Eigenschaften.

Elektromagnetische Wasserbehandlung
Physikalisches Verfahren, bei dem Wasser einem elektromagnetischen Feld beziehungsweise elektromagnetischen Impulsen ausgesetzt wird. In dieser Arbeit wird untersucht, ob dadurch messbare Veränderungen bestimmter Eigenschaften oder technischer Prozesse auftreten.

Elektromagnetisches Feld (EM-Feld)
Physikalisches Feld, das aus elektrischen und magnetischen Komponenten besteht. Elektromagnetische Felder können unter anderem durch elektrische Ströme und zeitlich veränderliche elektrische oder magnetische Felder entstehen.

Gefrierenthalpie / Erstarrungsenthalpie
Wärmemenge, die beim Übergang eines Stoffes vom flüssigen in den festen Aggregatzustand an die Umgebung abgegeben wird. Bei der Eisproduktion muss diese Wärme durch die Kälteanlage abgeführt werden.

H_2O – Wasser
Chemische Verbindung aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom.

HIPPOTRON ICE
Technologie zur elektromagnetischen Behandlung von Wasser für Anwendungen bei künstlichen Eisflächen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird deren möglicher Einfluss auf Wasser, Eisbildung und Energiebedarf untersucht.

Kälteanlage
Technische Anlage, die einem zu kühlenden System Wärme entzieht und diese auf einem höheren Temperaturniveau an die Umgebung oder ein anderes System abgibt.

kWh – Kilowattstunde
Einheit der Energie. Eine Kilowattstunde entspricht einer Energiemenge von 3,6 Megajoule (MJ).

Mg – Magnesium
Chemisches Element, das in Wasser hauptsächlich als Magnesiumion (Mg^{2+}) vorkommt. Neben Calcium trägt Magnesium wesentlich zur Wasserhärte bei.

Schmelzenthalpie
Energiemenge, die erforderlich ist, um einen Stoff bei seiner Schmelztemperatur vom festen in den flüssigen Aggregatzustand zu überführen, ohne seine Temperatur während des Phasenübergangs zu erhöhen.

Tesla (T)
SI-Einheit der magnetischen Flussdichte.

Wasserhärte
Mass für den Gehalt gelöster Erdalkaliionen im Wasser. Für die Wasserhärte sind insbesondere Calcium- und Magnesiumionen von Bedeutung.

Wärmetauscher
Technische Einrichtung zur Übertragung thermischer Energie zwischen zwei Medien, ohne dass sich diese Medien im Normalbetrieb direkt miteinander vermischen.

Wirkungsgrad (η)
Verhältnis zwischen nutzbarer und zugeführter Energie beziehungsweise Leistung eines technischen Systems. Der Wirkungsgrad ist dimensionslos und wird häufig in Prozent angegeben.

15. Anhang

15.1 Auswertung Energie Quader 24_25 Vergleich 25_26

Vergleich Energieverbrauch Eisfeld Quader

Energieverbrauch in kWh

kWh	Saison 24/25	Saison 25/26	
November	73450	62667	
Dezember	65071.1	50300.3	
Januar	62651.3	45618.3	
Februar	63510.6	61700.2	
	264683	220369.8	-44313.2

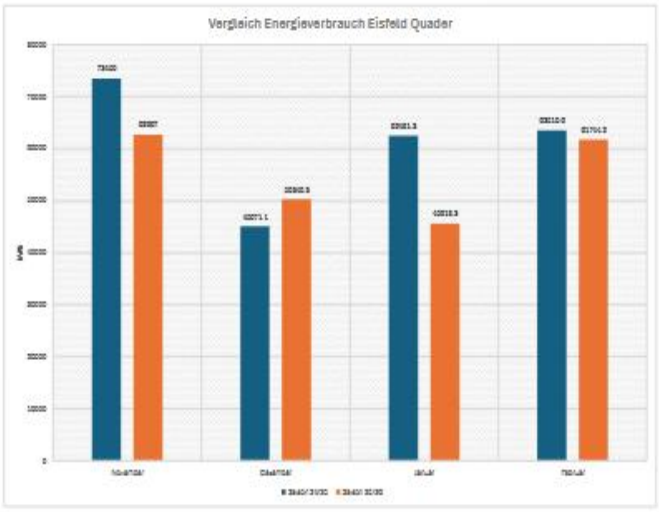
Temperatur Mittelwert über Monat

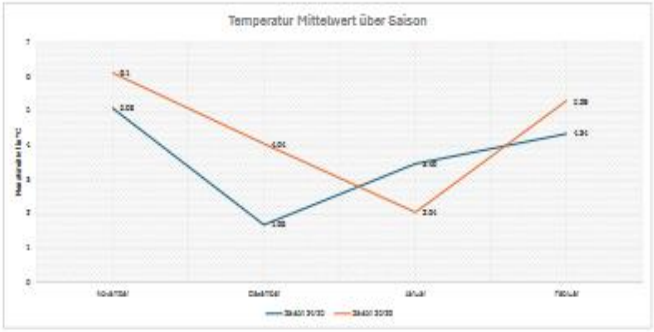
°C	Saison 24/25	Saison 25/26
November	5.08	6.1
Dezember	1.68	4.04
Januar	3.65	2.04
Februar	4.34	5.29

Stromkosten in CHF

CHF	Saison 24/25	Saison 25/26	
November	CHF 26'502.61	CHF 26'221.25	
Dezember	CHF 25'601.75	CHF 27'368.25	
Januar	CHF 26'605.15	CHF 25'120.00	
Februar	CHF 26'971.06	CHF 25'531.35	
	CHF 133'053.55	CHF 130'250.85	-CHF 13'233.70

weitere Verbesserungen:
Temperatur Rücklauf Eismaschine neu ca. 25°C anstatt über 40°C
Eisdicke Saison 25/26 ca. 5.5cm anstatt +10cm in vorhergehenden Jahren
neu Soleaufbereitung Glycol über zwei Hauptverteiler (bisher nur einer)





TEKO Schweizerische Fachschule

Daten von Wetterstation Lürlibad (http://churerwetter.ch) & Kundenportal IBC

Tag	Temp Mittel 2025	Verbrauch	Kosten in CHF	Tag	Temp Mittel 2024	Verbrauch		Tag	Temp Mittel 2023	Verbrauch	Kosten in CHF
01.11.2025	16.5	0		01.11.2024	9.6			01.11.2023	9.6	0	
02.11.2025	10.3	0		02.11.2024	8.3			02.11.2023	9.9	0	
03.11.2025	7.2	0		03.11.2024	8.2			03.11.2023	5	0	
04.11.2025	7.1	0		04.11.2024	8.1			04.11.2023	5.8	0	
05.11.2025	9.6	2687.4		05.11.2024	8.5			05.11.2023	7.2	2825	
06.11.2025	11.3	5038.5		06.11.2024	8.7			06.11.2023	6.5	2825	
07.11.2025	7.5	3349.2		07.11.2024	7.4			07.11.2023	6	2825	
08.11.2025	4.3	2037.6		08.11.2024	7.7			08.11.2023	4.8	2825	
09.11.2025	6.6	2634.3		09.11.2024	7.8			09.11.2023	8.9	2825	
10.11.2025	6.3	3531.6		10.11.2024	5.3			10.11.2023	5.7	2825	
11.11.2025	6.3	2624.4		11.11.2024	4.1			11.11.2023	3.7	2825	
12.11.2025	10.4	3165.3		12.11.2024	4.8			12.11.2023	3	2825	
13.11.2025	13.1	3655.2		13.11.2024	2.5			13.11.2023	7.1	2825	
14.11.2025	15	3657.6		14.11.2024	2.5			14.11.2023	9.1	2825	
15.11.2025	14.6	4992.3		15.11.2024	2.2			15.11.2023	7.6	2825	
16.11.2025	10.5	4065.9		16.11.2024	3.7			16.11.2023	7	2825	
17.11.2025	6.8	3460.8		17.11.2024	3.9			17.11.2023	5.2	2825	
18.11.2025	1.3	1466.7		18.11.2024	5.4			18.11.2023	3.7	2825	
19.11.2025	-0.1	1130.1		19.11.2024	6.3			19.11.2023	6.7	2825	
20.11.2025	1.9	1318.8		20.11.2024	3.7			20.11.2023	7	2825	
21.11.2025	-0.1	1122.6		21.11.2024	-0.7			21.11.2023	6.6	2825	
22.11.2025	-1.6	1023.3		22.11.2024	-1.3			22.11.2023	5.5	2825	
23.11.2025	-1.4	836.1		23.11.2024	-0.2			23.11.2023	2.6	2825	
24.11.2025	7.1	2384.4		24.11.2024	7.4			24.11.2023	2.9	2825	
25.11.2025	3.7	2105.7		25.11.2024	10.4			25.11.2023	0.6	2825	
26.11.2025	2.3	1515.9		26.11.2024	8.5			26.11.2023	0.9	2825	
27.11.2025	0.9	968.4		27.11.2024	5.9			27.11.2023	2.2	2825	
28.11.2025	-1	772.5		28.11.2024	4.7			28.11.2023	2	2825	
29.11.2025	3.4	1581.9		29.11.2024	1.7			29.11.2023	-0.7	2825	
30.11.2025	3.2	1540.5		30.11.2024	0.4			30.11.2023	0.3	2825	
Mittelwert	**6.1**	62667	CHF 34'509.28	**Mittelwert**	**5.18**			**Mittelwert**	**5.08**	73450	CHF 38'502.61

kein Vergleich möglich, da Chiller nicht einsatzbereit

2825 Mittelwert keine Smartmeter-Werte da Installation 17.10.24

TEKO Schweizerische Fachschule

Daten von Wetterstation Lürlibad (http://churerwetter.ch) & Kundenportal IBC

Tag	Temp Mittel 2026	Verbrauch	Kosten in CHF	Tag	Temp Mittel 2025	Verbrauch	
01.01.2026	-3.2	566.4		01.01.2025	3	891	
02.01.2026	-1.3	949.5		02.01.2025	6.3	2065.2	
03.01.2026	-1.4	733.8		03.01.2025	0.4	1496.1	
04.01.2026	-4.5	569.7		04.01.2025	-1.5	758.1	
05.01.2026	-7.8	534		05.01.2025	5.9	2346.9	
06.01.2026	-7.9	332.1		06.01.2025	10.8	3166.5	
07.01.2026	-6.8	557.7		07.01.2025	3.5	2168.7	
08.01.2026	-3.5	557.7		08.01.2025	7.2	2803.8	
09.01.2026	1.4	1488.3		09.01.2025	9.4	3204.9	
10.01.2026	0.4	1420.8		10.01.2025	1.7	1708.8	
11.01.2026	-1.1	949.5		11.01.2025	-0.6	1186.2	
12.01.2026	-0.6	861.9		12.01.2025	-2.3	1802.1	
13.01.2026	5.1	1393.5		13.01.2025	-3.4	1070.4	
14.01.2026	6.7	1865.1		14.01.2025	-2.8	1178.7	
15.01.2026	7.3	1960.5		15.01.2025	-0.9	804.6	
16.01.2026	9.3	2646.6		16.01.2025	-2.5	687.9	
17.01.2026	10.1	2916.6		17.01.2025	-3.1	743.1	
18.01.2026	9.4	2652.6		18.01.2025	0.9	1047.6	
19.01.2026	8	2505		19.01.2025	4.2	1799.1	
20.01.2026	6.3	1801.2		20.01.2025	6.3	2145.3	
21.01.2026	4.6	1529.1		21.01.2025	3.3	1262.7	
22.01.2026	2.4	1031.1		22.01.2025	7.6	2329.2	
23.01.2026	5.1	1617		23.01.2025	7.8	3000.6	
24.01.2026	4	1719.9		24.01.2025	7.7	2643.3	
25.01.2026	2	1728.6		25.01.2025	12.4	3916.2	
26.01.2026	2.1	1596.3		26.01.2025	5.7	3514.8	
27.01.2026	5.5	2070.9		27.01.2025	8.5	3519.6	
28.01.2026	4.8	2160.6		28.01.2025	2.5	2835.3	
29.01.2026	2.6	2018.7		29.01.2025	2.4	2227.8	
30.01.2026	2.1	1305.3		30.01.2025	5.4	2392.2	
31.01.2026	2	1578.3		31.01.2025	1.5	1764.6	
Mittelwert	**2.04**	45618.3	CHF 25'120.95	**Mittelwert**	**3.46**	62481.3	CHF 34'407.02

TEKO Schweizerische Fachschule

Daten von Wetterstation Lürlibad (http://churerwetter.ch) & Kundenportal IBC

Tag	Temp Mittel 2026	Verbrauch	Kosten in CHF	Tag	Temp Mittel 2025	Verbrauch	
01.02.2026	1.5	1395.6		01.02.2025	3.3	2364.3	
02.02.2026	4.9	1876.2		02.02.2025	2	1579.5	
03.02.2026	8.1	2859.3		03.02.2025	1.7	1335	
04.02.2026	5.3	1829.1		04.02.2025	1.3	1249.2	
05.02.2026	5.7	2001		05.02.2025	1.2	1185.3	
06.02.2026	6.7	2208		06.02.2025	-1.7	1300.5	
07.02.2026	5.7	2117.4		07.02.2025	5	2243.4	
08.02.2026	4.5	1870.2		08.02.2025	7.5	2907	
09.02.2026	2.6	1410.3		09.02.2025	4.3	2023.5	
10.02.2026	7.9	2633.7		10.02.2025	5.8	2518.8	
11.02.2026	7.2	2885.7		11.02.2025	8.2	2892.9	
12.02.2026	6.9	2967.3		12.02.2025	8.4	3022.2	
13.02.2026	5.8	2711.7		13.02.2025	5.1	2649.3	
14.02.2026	6	2522.7		14.02.2025	0.2	1582.8	
15.02.2026	3.4	2193.6		15.02.2025	-1.3	1544.7	
16.02.2026	1.8	1996.2		16.02.2025	0.5	1854.3	
17.02.2026	1.5	1422.6		17.02.2025	0.9	1788.6	
18.02.2026	1.6	1548.9		18.02.2025	0.5	1572.6	
19.02.2026	3.1	1595.1		19.02.2025	1.7	1497.6	
20.02.2026	3	1536.9		20.02.2025	5.9	2250.6	
21.02.2026	2.4	1901.1		21.02.2025	10.2	3087.3	
22.02.2026	4.6	2347.8		22.02.2025	12.1	3675.3	
23.02.2026	6.9	2522.4		23.02.2025	8.1	2811	
24.02.2026	6	2325.9		24.02.2025	8.5	3037.2	
25.02.2026	8.3	2488.5		25.02.2025	9.3	3156	
26.02.2026	8.7	2607		26.02.2025	5.8	2837.7	
27.02.2026	9.9	2872.5		27.02.2025	4	2649.3	
28.02.2026	8.1	3097.5		28.02.2025	2.9	2894.7	
Mittelwert	**5.29**	61744.2	CHF 0.00	**Mittelwert**	**4.34**	63510.6	CHF 0.00

Daten von Wetterstation Lürlibad (http://churerwetter.ch) & Kundenportal IBC

Tag	Temp Mittel 2025	Verbrauch	Kosten in CHF	Tag	Temp Mittel 2024	Verbrauch	
01.12.2025	3.6	1566.9		01.12.2024	0.7	735.9	
02.12.2025	4.7	1547.4		02.12.2024	5.3	1387.2	
03.12.2025	3.1	1648.2		03.12.2024	4.7	2093.7	
04.12.2025	0.5	1269.9		04.12.2024	2.4	1577.7	
05.12.2025	2.2	1643.4		05.12.2024	1.1	1324.5	
06.12.2025	3.2	1660.2		06.12.2024	5	2547.9	
07.12.2025	4.7	2097.9		07.12.2024	3.7	1815.6	
08.12.2025	7	2284.2		08.12.2024	2.8	2058	
09.12.2025	9.4	2350.8		09.12.2024	2.9	2214	
10.12.2025	4.9	1194.3		10.12.2024	1.2	1617.3	
11.12.2025	5	1284.3		11.12.2024	-0.9	934.8	
12.12.2025	4.7	1164		12.12.2024	-1.7	687	
13.12.2025	2.1	882		13.12.2024	1.4	1136.4	
14.12.2025	2.1	897.9		14.12.2024	0	1702.5	
15.12.2025	9	1879.8		15.12.2024	2.2	2016	
16.12.2025	10.5	2937.3		16.12.2024	3.6	1674.9	
17.12.2025	7.9	2115		17.12.2024	4.2	1300.8	
18.12.2025	8.9	2492.1		18.12.2024	6.4	1865.1	
19.12.2025	8.7	2731.8		19.12.2024	9	2559.9	
20.12.2025	6.1	2014.5		20.12.2024	1.3	2087.7	
21.12.2025	9.6	3023.1		21.12.2024	-0.9	1834.8	
22.12.2025	10.4	3114.9		22.12.2024	1.1	1977.6	
23.12.2025	4.4	1768.8		23.12.2024	0	1336.2	
24.12.2025	0.1	1184.4		24.12.2024	0.7	1324.5	
25.12.2025	0.8	561.9		25.12.2024	-3.1	477	
26.12.2025	1.8	1361.7		26.12.2024	-1.7	762.6	
27.12.2025	0.4	987		27.12.2024	-0.5	670.2	
28.12.2025	-3.1	606.3		28.12.2024	-0.1	858	
29.12.2025	-3.2	725.4		29.12.2024	0.8	846.3	
30.12.2025	-2.3	787.8		30.12.2024	0.6	865.2	
31.12.2025	-2.1	557.1		31.12.2024	0	781.8	
Mittelwert	**4.04**	50340.3	CHF 27'721.25	**Mittelwert**	**1.68**	45071.1	CHF 24'819.62

15.2 VUT Protokol

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA CHEMICKÁ

Protokol o analýze

Zadavatel: Blue Boson SE, Slovensko

Požadavek dle objednávky: Provedení DSC analýzy neupravené a upravené vody technologií Scat°Rexcit, patentové č. EP1941216B1

Testovací metoda: DSC (diferenční kompenzační kalorimetrie) a hustoměr

Vyhotovení protokolu: 26.10.2018

Zpracovatel: doc. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D., kucerik@vutbr.cz

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta chemická,

Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí

Purkyňova 118

612 00 Brno

IČ: 00216305

DIČ: CZ00216305

1. Zadání

Požadavkem zadavatele bylo stanovení výparného tepla, tepla potřebného pro tání ledu, tepelné kapacity a hustoty upravené vody průtokovou technologií Scat®Rexcit v porovnání s vodou nepravenou s využitím diferenční kompenzační kalorimetrie (DSC) a měření hustoty s vysokým rozlišením.

2. Popis vzorků

Vzorky neupravené deionizované vody byly získány na FCH, kde se také produkuje. Tato byla také použita k úpravě na dovezeném zařízení firmy Blue Boson SE. Voda byla v zařízení cirkulována a měřena po několika dnech. Během cirkulace došlo po delší době k tvorbě menšího zákalu, který vznikl čištěním stěn okruhu polygonu, které byly z pogumovaného materiálu .

3. Příprava vzorků

Vzorky byly odebrány z dovezeného zařízení (testovací stand Scat®Rexcit) a okamžitě měřeny tj. v rámci 15 minut zahrnujících navážení do DSC pánviček a startu experimentu případně nastříknutí do hustoměru. Navážka vzorku na DSC byla kolem 3 mg, pro hustoměr bylo použito ca 5 ml vzorku.

4. Experimenty

4. 1 Diferenční kompenzační kalorimetrie

Principem DSC je měření tepelného toku z a do materiálu během zvoleného teplotního programu (zjednodušeně). Měření bylo provedeno na zařízení DSC Q 2500 (TA Instruments, USA, New Castle, Delaware). Analýza vzorku byla provedena v atmosféře dusíku 50 ml/min, vzorky byly vždy naváženy do Al pánviček Tzero, které byly okamžitě hermeticky uzavřeny. Teplota DSC pícky na začátku experimentu byla vždy 30°C. Každý vzorek byl změřen 3x. Pro vyhodnocení byl použit software TRIOS dodávaný firmou TA Instruments.

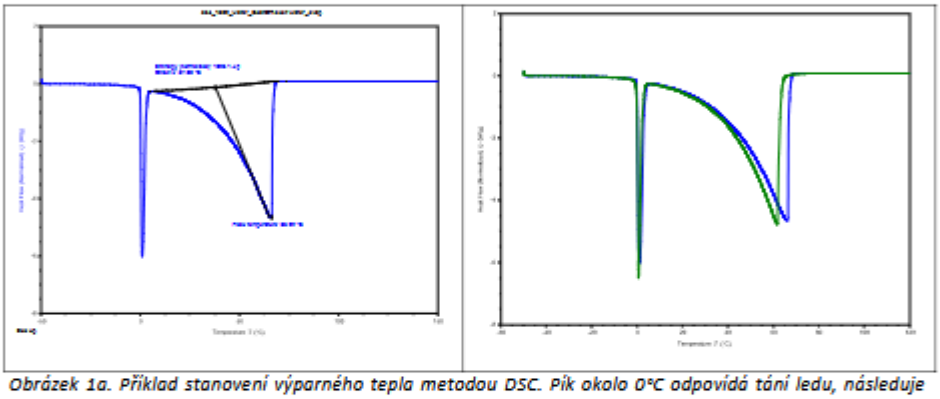
Pro jednotlivá stanovení termofyzikálních veličin byly použity následující podmínky a teplotní programy:

Výparné teplo: těsně před samotným měřením byly pánvičky perforovány. Pro měření byl využit postup v minulosti vyvinutý a testovaný pracovištěm (Kučerík et al., 2018; Prusová et al., 2010). Teplo bylo

vyhodnoceno jako plocha endotermického píku začínajícího nad 0°C a končícího okolo 70°C. Příklad stanovení je na obrázku 1.

Teplotní program:

1. Ekvilibrace na -50°C
2. Ohřev rychlostí 5 °C min^{-1} na teplotu 180 °C.

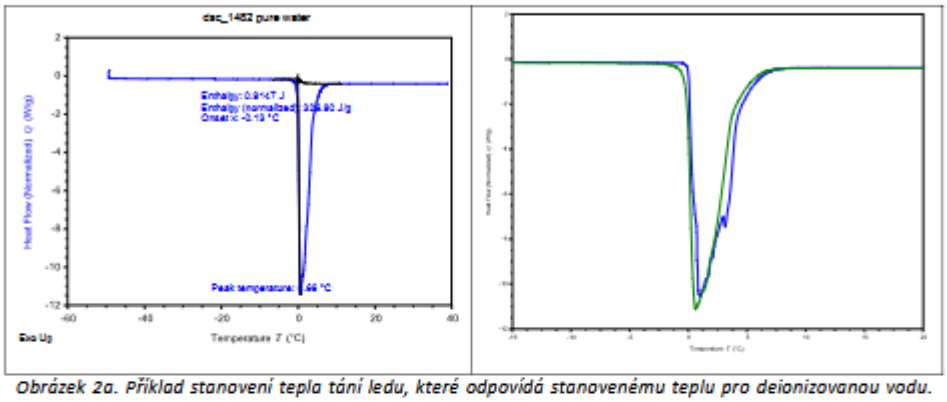


Obrázek 1a. Příklad stanovení výparného tepla metodou DSC. Pík okolo 0°C odpovídá tání ledu, následuje vypařování, jehož plocha píku odpovídá stanovenému teplu. Záznam ukazuje pouze ohřevnou část teplotního programu. 1b Porovnání záznamu odpařování přístrojové vody (modrá) a deionizované vody (zelená).

Teplo potřebné k tání ledu: Vzorky byly měřeny v hermeticky uzavřené pánvičce, aby se zabránilo vypařování vody během experimentu. Vyhodnocovala se plocha endotermického píku, který byl pozorován kolem 0°C. Příklad měření deionizované vody je na obrázku 2.

Použitý teplotní program

1. Ekvilibrace na -50°C
2. Ohřev rychlostí 5 °C min^{-1} na teplotu 30 °C.



Obrázek 2a. Příklad stanovení tepla tání ledu, které odpovídá stanovenému teplu pro deionizovanou vodu. Záznam ukazuje pouze ohřevnou část teplotního programu. 2b. Porovnání záznamu tání ledu přístrojové vody (zelená) a deionizované vody (modrá)

Stanovení tepelné kapacity: Přístroj Q2500 umožňuje přímé stanovení tepelné kapacity vzorku, nicméně první experimenty s upravenou vodou nevedly k reprodukovatelným údajům pro přístrojovou vodu. Proto byl zvolen klasický přístup, při němž se změřený tepelný tok porovnává se standardem (safír). Příklad měření je na obrázku 3.

Použitý teplotní program

1. Ekvilibrace na 5°C
2. Izoterma 5 min
3. Ohřev 5°C/min na 30°C
4. Izoterma 5 minut.

Hodnoty byly odečteny přímo na záznamu pro 20°C a porovnány se standardem (safír) a záznamem, který byl pořízen bez pánviček. Podrobný pospi lze najít například v práci Šimon a Cibulková.

4. 2 Měření hustoty

Hustota vzorků byla měřena na přístroji Anton Paar 5000 M. Vzorek byl před měřením zbaven rozpuštěného vzduchu opakovaným snížením tlaku v injekční stříkačce. Poté byl vzorek injektován do přístroje, kde byla po dosažení teploty 20,000±0,001°C desetkrát za sebou změřena hustota. Ta byla zprůměrována. Tento postup byl opakován celkem třikrát pro oba vzorky, hodnoty byly opět zprůměrovány. Ke statistickému zpracování výsledků byl použit software Excel, standardní odchylka byla vypočítána s použitím příkazu „stdeva".

5. Výsledky

Zprůměrované výsledky měření se standardními odchylkami měření jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1. Stanovené hodnoty hustoty, entalpie tání ledu, výparné entalpie a tepelné kapacity a jejich směrodatné odchylky.

	přístrojová voda BOSON Scat®Rexcit	deionizovaná voda	Změna po úpravě* (%)
hustota (kg/m^3) při 20°C	998.292±0.002	998.220±0.002	+0,007
teplo tání (J/g)	317±2	325±2	-2,46
výparné teplo (J/g)	1925±11	2090±51	-7,89
tepelná kapacita c_p (J/(g °C)) při 20°C	4.67±0.33	4.15±0.07	+12,5

*nárůst (+) nebo pokles hodnoty (-) po úpravě

Výsledky v tabulce 1 ukazují, že v přístroji došlo ke změně termofyzikálních vlastností a hustoty vody. V případě hustoty došlo úpravou k nepatrnému zvýšení hustoty. U tepla tání ledu došlo již k výraznějšímu snížení hodnot. Za normálních okolností dochází při ochlazení vody pod 0°C k tvorbě hexagonální struktury ledu. Naměřené snížení tedy může naznačovat buď nedokonalosti ve tvorbě hexagonálních krystalů, případně tvorbu jiných struktur jakými jsou kubické krystaly nebo i amorfní led. V tomto případu se i deioniovaná voda, která při měření sloužila jako standard, liší od tabelované hodnoty. Ta je udávána 334 J/g (Liu and Cowman, 2000) a důvodem rozdílu je patrně malá odchylka při kalibraci DSC, případně anomálie vyskytující se při práci s vodou. U výparného tepla došlo úpravou vody ke snížení hodnot, což ukazuje na nižší energetické nároky při převedení vody kapalného do plynného stavu. Také poslední parametr tepelná kapacita ukázal změny, tj. úpravou došlo ke zvýšení, a to i přes větší rozptyl naměřených dat. Změny

v měřených hodnotách naznačují možné změny ve struktuře vody způsobené použitým zařízením Scat[a] Rexcit .

Reference

Kučerík, J., Ondruch, P., Kunhi Mouvenchery, Y., Schaumann, G.E., 2018. Formation of Water Molecule Bridges Governs Water Sorption Mechanisms in Soil Organic Matter. Langmuir 34, 12174–12182. doi:10.1021/acs.langmuir.8b02270

Liu, J., Cowman, M.K., 2000. Thermal analysis of semi-dilute hyaluronan solutions. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 59, 547–557.

Prusová, a., Smejkalová, D., Chytil, M., Velebný, V., Kucerík, J., 2010. An alternative DSC approach to study hydration of hyaluronan. Carbohydrate Polymers 82, 498–503. doi:10.1016/j.carbpol.2010.05.022

Šimon, P. Cibulková Z. (https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjkpaHT8LzeAhXC1iwKHZ4yCZMQFjADegQIBRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.tpl.fpv.ukf.sk%2Fengl_vers%2Fthermophys%2Fproceedings%2Fsimon.pdf&usg=AOvVaw31nEaGGZRRpixTk98SE3DT)

V Brně dne 26. 10. 2018 vypracoval



Doc. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D.

Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí

Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně

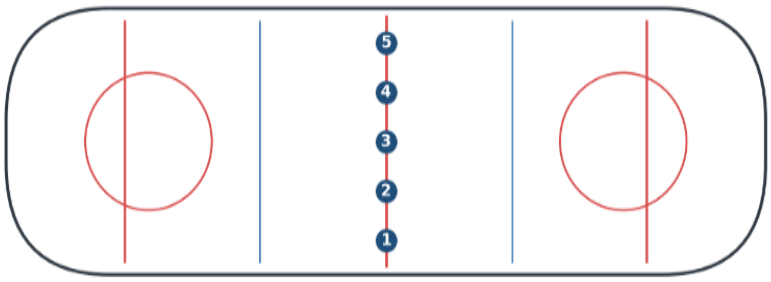
15.3 Messprotokoll – Eisfläche Chur

Messprotokoll – Eisfläche Chur

Messung ausschliesslich auf der Mittellinie | Datum: 27.10.2026 | Uhrzeit: ca. 10:00 Uhr

Messort	Messobjekt	Messgrössen	Messverfahren
Eisfläche Chur	5 Punkte auf der Mittellinie	Oberfläche, Betonnähe, Eisdicke	Temperaturmessgerät; Schieblehre

Fünf Messstellen entlang der Mittellinie (schematisch)



Messwerte

Messstelle	Eisoberfläche O (°C)	Betonnähe B (°C)	Differenz O – B (K)	Eisdicke D (mm)
1	-4,4	-5,1	0,7	29,5
2	-4,0	-4,5	0,5	25,0
3	-3,8	-4,5	0,7	30,0
4	-3,9	-4,9	1,0	37,0
5	-4,1	-4,8	0,7	35,0
Mittelwert	-4,04	-4,76	0,72	31,3