

**MITTEILUNGEN ZUM  
GEWÄSSERSCHUTZ**

**NR. 30**

# **Elektromagnetische Wasserbehandlung**

**Fallstudien in Abwasseranlagen  
und Trinkwasser-Anwendungen**



**Bundesamt für Umwelt, Wald und  
Landschaft (BUWAL)**

**Herausgeber**

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)  
*Das BUWAL ist ein Amt des Eidg. Departements für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)*

**Bearbeitung**

Dr. Regula Müller, Prof. Dr. B. Wehrli, Dr. H.R. Siegrist  
EAWAG, Kastanienbaum

**Download PDF**

[www.umwelt-schweiz.ch/publikationen](http://www.umwelt-schweiz.ch/publikationen)  
(eine gedruckte Fassung ist nicht erhältlich)  
Code: MGS-30-D

© BUWAL 1999

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Vorwort</b>	<b>3</b>
<b>Préface de l'OFEFP</b>	<b>4</b>
<b>Premessa dell'UFAFP</b>	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>Résumé</b>	<b>7</b>
<b>Riassunto</b>	<b>8</b>
<b>1 EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG</b>	<b>9</b>
<b>2 STAND DER FORSCHUNG UND WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Chemische Grundlagen</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Physikalische Grundlagen</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Die Literatur zum Thema physikalische Wasserbehandlung</b>	<b>20</b>
<b>3 FALLSTUDIEN</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Ablagerungen in Kläranlagen</b>	<b>25</b>
3.1.1 Kläranlage Werdhölzli	30
3.1.2 Kläranlage Worblental	43
<b>3.2 Verkalkungsprobleme in Trinkwasseranlagen</b>	<b>50</b>
3.2.1 Trinkwasserversorgung mit hartem Wasser	54
<b>4 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN</b>	<b>58</b>
<b>LITERATUR</b>	<b>60</b>

## Abstract

Im Auftrag des BUWAL wurde im Rahmen einer Doktorarbeit untersucht, ob es gelingt, elektromagnetische Felder so zu erzeugen und einzusetzen, dass dadurch die Bildung mineralischer Ablagerungen (wie z.B. Kalk) in Leitungssystemen verhindert werden kann. Es wurden drei Fallstudien in stark übersättigten Systemen (in den Schlammbehandlungen zweier Kläranlagen und in einer Trinkwasserversorgung mit hartem Wasser) durchgeführt. Anhand der Resultate der ARA Worblental sowie der Trinkwasser-Fallstudie konnte nachgewiesen werden, dass geeignete, für diese Anwendungen weiterentwickelte elektromagnetische Felder in der Lage sind, die Bildung von Ablagerungen vollständig zu verhindern.

As a project of the federal environmental agency BUWAL, a thesis was made to investigate whether it was possible to create and install electromagnetic fields for the purpose of preventing mineral deposits, scaling, in pipes. Three case studies were performed in strongly supersaturated systems: in the anaerobic digestion of sewage sludge in two wastewater treatment plants and in a drinking water supply with very hard water. The results in the ARA Worblental clearly showed that with suitable electromagnetic fields developed for this application, it was in fact possible to completely inhibit the buildup of incrustations.

Une thèse de doctorat exécutée sur mandat de l'OFEFP a étudié s'il était possible de générer et de mettre en place des champs électromagnétiques qui permettent d'éviter la formation d'incrustations minérales (calcaires, par exemple) dans les canalisations. Trois cas pratiques ont été examinés dans des systèmes largement sursaturés (le traitement des boues de deux stations d'épuration et une installation d'approvisionnement en eau potable où l'eau est caractérisée par une dureté élevée). Les résultats obtenus dans la STEP de Worblental et dans l'installation d'approvisionnement en eau potable ont démontré que des champs électriques idoines, développés à cet effet, étaient en mesure d'éviter totalement la formation d'incrustations minérales.

Nell'ambito di una tesi di dottorato promossa dall'UFAPP si è esaminato se sia possibile creare e impiegare campi elettromagnetici in modo da evitare la formazione di depositi di natura minerale nelle tubature (come ad es. il calcare). Sono stati studiati tre casi in sistemi fortemente ipersaturi (nel trattamento dei fanghi di due impianti di depurazione delle acque e in un impianto per l'approvvigionamento idrico con acqua dura). Sulla base dei risultati dell'IDA Worblental e dello studio relativo all'acqua potabile si è potuto dimostrare che campi magnetici adeguati, appositamente sviluppati per questi impieghi, sono in grado di evitare completamente la formazione di depositi.

## Vorwort

Beim Gebrauch von hartem Wasser in Haushalt, Gewerbe und Industrie entstehen oft störende Kalkrückstände in Wasserleitungen und an Sanitäreinrichtungen. Aufgrund von Beobachtungen in der Praxis hat sich gezeigt, dass in gewissen Fällen die Entstehung derartiger Kalkablagerungen durch Einwirkung von elektromagnetischen Felder reduziert werden kann.

Erste Versuche in Trübwasserleitungen in Kläranlagen deuteten darauf hin, dass es sogar da möglich sein könnte, die Tendenz zur Bildung von Ablagerungen zu verringern.

Wissenschaftlich erhärtete und nachvollziehbare Erklärungen über die Wirkungsweise der elektromagnetischen Wasserbehandlung fehlten lange Zeit, was zusammen mit allerlei unterschiedlichen Behauptungen Grund zu vielen Kontroversen und Spekulationen gab.

Im Rahmen einer Dissertation<sup>1</sup> sind erstmals an der ETH Fallstudien zur praktischen Anwendung von elektromagnetischen Feldern in der Schlammbehandlung von Abwasserreinigungsanlagen und in Trinkwassersystemen durchgeführt worden. Ziel der Dissertation war, die Phänomenologie zu erfassen und zu untersuchen, ob die elektromagnetische Wasserbehandlung auch in der Abwasserreinigung nutzbringend eingesetzt werden kann. Weiter sollte versucht werden, ein wissenschaftliches Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen zu erarbeiten.

Aus der Sicht des Gewässerschutzes ist ein erfolgreicher, technisch und wissenschaftlich fundierter Einsatz geeigneter elektromagnetischen Feldern anstelle der abwasserbelastenden Chemikalien eine nutzbringende Alternative. Von Bedeutung ist die Anwendung solcher Systeme auch in Wärmetauschern, beispielsweise bei der Schlammbehandlung in kommunalen Abwasserreinigungsanlagen. Durch Verhinderung von Ablagerungen wird die Wärmeübertragung verbessert und es entstehen weniger Energieverluste.

Im Hinblick darauf, dass die Anwendung von elektromagnetischen Feldern aus der Sicht des Umweltschutzes vielfältige Vorteile aufweist, aber der wissenschaftliche Zugang bisher fehlte, leistete das BUWAL einen finanziellen Beitrag an die Arbeiten und wirkte begleitend mit.

---

<sup>1</sup> Regula Müller, Einfluss elektromagnetischer Felder auf Kristallisationsvorgänge: Praktische Anwendung in der Schlammbehandlung von Kläranlagen und in Trinkwassersystemen. Dissertation ETH Nr. 12644, 1998.

## Préface de l'OFEFP

L'utilisation domestique, artisanale ou industrielle d'eau dure provoque souvent la formation de résidus calcaires gênants dans les conduites et dans les installations sanitaires. Actuellement, les incrustations calcaires sont en règle générale éliminées mécaniquement ou au moyen de produits chimiques acides. Dans la pratique, on a observé que la formation de telles incrustations calcaires pouvait être réduite sous l'action de champs électromagnétiques.

Les premiers essais menés dans des conduites d'eau trouble de stations d'épuration donnent à penser que la tendance à la formation d'incrustations devrait pouvoir être réduite là aussi.

Le manque d'explications claires, étayées scientifiquement, à propos du mode de fonctionnement du traitement électromagnétique de l'eau se faisait sentir depuis longtemps et laissait la porte ouverte à toutes sortes de controverses et de spéculations.

Pour la première fois, des cas concrets d'utilisation pratique des champs électromagnétiques – dans le traitement des boues de stations d'épuration des eaux usées et dans des installations d'approvisionnement en eau potable – ont été étudiés à l'EPFZ dans le cadre d'une thèse de doctorat<sup>2</sup>. Un premier objectif de la thèse consistait à décrire les phénomènes et à étudier si le traitement électromagnétique pouvait également être appliqué avec profit à l'épuration des eaux usées. Il s'agissait ensuite d'élaborer une description scientifique des mécanismes à la base de ce traitement.

Du point de vue de la protection des eaux, le recours à des champs électromagnétiques au lieu de produits chimiques polluant les eaux usées est une alternative prometteuse. L'application de tels systèmes revêt également une importance certaine pour les échangeurs thermiques, par exemple dans le traitement des boues des stations communales d'épuration des eaux usées. Si la formation d'incrustations est évitée, le transfert de chaleur fonctionne mieux et les pertes d'énergie sont moins importantes.

En raison des multiples avantages de l'utilisation de champs électromagnétiques pour la protection de l'environnement et du manque de bases scientifiques disponibles à ce sujet, l'OFEFP a apporté à ce travail un soutien financier et a suivi ses développements.

---

<sup>2</sup> Regula Müller, Einfluss elektromagnetischer Felder auf Kristallisationsvorgänge: Praktische Anwendung in der Schlammbehandlung von Kläranlagen und in Trinkwassersystemen. Thèse EPFZ n° 12644, 1998.

## Premessa dell'UFAFP

L'uso dell'acqua dura nelle economie domestiche, nell'artigianato e nell'industria provoca sovente fastidiosi depositi calcarei nelle condotte d'acqua e negli impianti sanitari. Oggi i depositi calcarei vengono solitamente eliminati con prodotti chimici acidi o in modo meccanico. Osservazioni fatte durante l'applicazione pratica hanno rivelato che simili depositi calcarei possono essere ridotti mediante l'azione di campi elettromagnetici.

Primi esperimenti in condotte di acque torbide sembrano indicare che sarebbe eventualmente possibile ridurre la tendenza a formare depositi.

Per molto tempo non si è potuto disporre di spiegazioni scientifiche assodate e plausibili sugli effetti del trattamento elettromagnetico delle acque, il che ha dato adito a molte controversie e speculazioni.

Nell'ambito di una tesi di dottorato<sup>3</sup> sono stati studiati per la prima volta al PFZ esempi di applicazione pratica di campi elettromagnetici nel trattamento dei fanghi di impianti di depurazione delle acque e in sistemi di approvvigionamento di acqua potabile. Un primo obiettivo della tesi era quello di raccogliere dati sulla fenomenologia e di esaminare se il trattamento elettromagnetico delle acque possa essere utilizzato con profitto anche nella depurazione delle acque. Inoltre si voleva tentare di capire a livello scientifico i meccanismi che sono alla base di tale procedimento.

Dal punto di vista della protezione delle acque l'utilizzazione di campi elettromagnetici al posto di prodotti chimici che inquinano le acque è un'alternativa vantaggiosa. L'applicazione di tali sistemi è importante anche in scambiatori di calore, ad esempio nel trattamento dei fanghi in impianti di depurazione delle acque comunali. La trasmissione del calore viene migliorata se si impedisce la formazione di depositi, ciò che crea minori perdite di energia.

Considerando il fatto che l'applicazione di campi elettromagnetici presenta molteplici vantaggi dal punto di vista della protezione ambientale, ma che finora mancava un approccio scientifico al fenomeno, l'UFAFP ha dato un sostegno finanziario a questo lavoro accompagnandone l'elaborazione.

---

<sup>3</sup> Regula Müller, Einfluss elektromagnetischer Felder auf Kristallisationsvorgänge: Praktische Anwendung in der Schlammbehandlung von Kläranlagen und in Trinkwassersystemen. Dissertation ETH No. 12644, 1998.

## Zusammenfassung

In einer ETH- Dissertation wurde Einsatz und Wirkungsweise elektromagnetischer Felder zur Verhinderung von Ablagerungen in Rohren untersucht. Der Hauptaspekt der Arbeit lag im Einsatz elektromagnetischer Felder in der Schlammbehandlung von Kläranlagen, wo durch Ablagerungen oft Dauerprobleme entstehen.

In einer ersten Fallstudie wurde der Einfluss elektromagnetischer Felder in der Kläranlage Werdhölzli anhand entsprechender Installationen an mehreren Stellen, die erfahrungsgemäss eine Tendenz zur Verkrustung aufweisen, untersucht. Es stellte sich heraus, dass unter einer auf 50% reduzierten Säuredosierung der Schichtaufbau gering blieb und sich kein Unterschied zwischen den behandelten Abschnitten und den Referenzstrecken nachweisen liess. Erst in einer zweiten Versuchsetappe unter stark verkalkenden Bedingungen zeigte sich ein schwacher Einfluss der Felder. Die Wirksamkeit der hier zum Einsatz gekommenen Geräte war für einen lohnenswerten Einsatz ungenügend. Im Verlauf dieser Untersuchungen wurde zudem auch deutlich, wie schwierig es sein kann, Beobachtungen bezüglich Krustenaufbau zuverlässig zu beurteilen.

Eine zweite Untersuchung fand gleichzeitig in einer Trinkwasserversorgung mit sehr hartem Wasser statt. Hier zeigte sich, dass sich unter dem Einfluss der angewendeten Felder die Menge der aufgebauten Kalkschicht um den Faktor 6 verringerte und sich die Kristallmodifikation und der Kristallhabitus änderten. In der Literatur finden sich Hinweise einiger Autoren, die ähnliche Beobachtungen dokumentieren.

Infolge der geringen Effekte in der Kläranlage Werdhölzli und der in der Zwischenzeit erarbeiteten Grundlagen wurden in einer dritten Fallstudie in der Kläranlage Worblental neue Versuche mit einem weiterentwickelten Feldkonzept durchgeführt. Mit Hilfe eines speziell entwickelten Gerätes gelang es, in dieser Anlage die Felder so einzustellen, dass Ablagerungen gänzlich verhindert werden konnten. Diese dritte Fallstudie illustriert, dass es effektiv möglich ist, mineralische Ablagerungen auch in komplexen Systemen durch geeignete Feldeinflüsse erfolgreich zu verhindern. Im Sinne einer nachhaltigen Lösung lassen sich damit wesentlich Energie und Kosten einsparen und die Salzbelastung von Trinkwasser und Gewässern verringern.

Die Spannweite von anfänglich schwacher zu 100%-iger Wirkung hat bestätigt, dass der erfolgreiche Einsatz von physikalischer Wasserbehandlung stark von den zum Einsatz kommenden elektromagnetischen Feldern sowie den physikalisch-chemischen Randbedingungen abhängt. Daraus wird auch deutlich, dass eine Verallgemeinerung der hier beschriebenen Resultate eine leichtfertige Verfälschung der komplexen Zusammenhänge darstellen würde. Dazu ist es notwendig, in weiterer Forschung zuerst die Zusammenhänge für Vergleiche auf einer breiteren Basis zu erarbeiten.

## Résumé

Une thèse de doctorat de l'EPFZ a étudié l'utilisation de champs électromagnétiques pour la prévention d'incrustations dans les tuyaux, ainsi que leur mode d'action. Le volet principal du travail examine la mise en œuvre de champs électromagnétiques dans le traitement des boues de stations d'épuration, où la formation d'incrustations est souvent source de problèmes chroniques.

Dans une première étude de cas pratique à la station d'épuration de Werdhölzli, les recherches menées au moyen d'installations appropriées ont porté sur l'action exercée par les champs électromagnétiques en plusieurs endroits connus pour présenter une tendance à l'encroûtement. Il s'est avéré que l'encroûtement restait faible, bien que le dosage d'acide ait été réduit de moitié, et qu'aucune différence n'apparaissait entre les sections traitées et les tronçons de référence. Seule une deuxième étape de recherches, menée sous des conditions fortement incrustantes, a révélé une faible influence des champs. L'efficacité de l'appareillage mis en œuvre dans ce cas n'était pas suffisante pour que son utilisation soit rentable.

Un deuxième travail de recherche a été exécuté simultanément dans une installation d'approvisionnement en eau potable où l'eau est caractérisée par une dureté très élevée. Il en est ressorti que l'importance de la croûte calcaire formée diminuait d'un facteur six et que la forme cristalline se modifiait sous l'action des champs appliqués. Les ouvrages spécialisés contiennent quelques indications de la part d'auteurs qui décrivent des observations similaires. Dans une troisième étude de cas pratique, de nouvelles expériences ont été effectuées à la station d'épuration de Worblental, en tenant compte des observations faites à la station d'épuration de Werdhölzli et des conclusions tirées depuis. L'utilisation d'un appareillage spécialement élaboré pour l'occasion a permis de régler les champs dans cette STEP de telle façon que les encroûtements ont pu y être totalement évités.

Cette troisième étude montre que l'utilisation des champs électromagnétiques peut être concluante même dans des systèmes complexes. En termes de solution durable, l'application de cette méthode permet de réaliser d'importantes économies énergétiques et financières tout en réduisant la charge en sels des eaux, et de l'eau potable en particulier.

La variabilité du taux d'efficacité, d'abord faible, puis maximal, a confirmé que la réussite de la mise en œuvre de traitements physiques de l'eau dépendait étroitement des champs appliqués et des conditions physico-chimiques ambiantes. Il en découle que chercher à généraliser les résultats exposés ici reviendrait à simplifier abusivement des relations complexes. Il faut poursuivre les recherches afin d'étudier ces relations sur une base plus large.

## Riassunto

In una tesi di dottorato del PFZ sono stati esaminati l'impiego e l'azione di campi elettromagnetici volti ad impedire la formazione di depositi nelle condotte. L'aspetto principale del lavoro consisteva nell'utilizzazione di campi elettromagnetici per il trattamento dei fanghi negli impianti di depurazione delle acque, dove spesso nascono problemi causati dai depositi. In un primo caso studiato si è trattato di esaminare, mediante le apposite installazioni, l'influsso di campi elettromagnetici in più punti dell'impianto di depurazione Werdhölzli i quali per esperienza presentano una tendenza a formare incrostazioni. Un dosaggio di acido inferiore al 50% ha avuto come effetto di ridurre al minimo la formazione di strati; inoltre non si è notata nessuna differenza fra le parti trattate e quelle di riferimento. Solo in una seconda tappa degli esperimenti, in condizioni di estrema calcificazione, si è rilevato un debole influsso dei campi. L'efficacia delle apparecchiature utilizzate per questo esperimento era insufficiente ai fini di un impiego proficuo.

Una seconda indagine è stata condotta contemporaneamente in un impianto per l'approvvigionamento idrico con acqua molto dura. In questo caso si è avuto modo di constatare che sotto l'influsso dei campi impiegati la quantità dello strato di calcare formatosi era diminuito del fattore 6 e che sia la modificazione dei cristalli che la formazione cristallina avevano subito un cambiamento. Nella bibliografia specifica si trovano indicazioni di alcuni autori che hanno documentato osservazioni analoghe. In base alle osservazioni fatte nell'impianto di depurazione Werdhölzli e ai nessi emersi nel frattempo, sono stati compiuti nuovi esperimenti nell'ambito di una terza ricerca nella stazione di depurazione Worblental. Con l'ausilio di un'attrezzatura appositamente sviluppata, in quest'ultimo impianto si è riusciti a regolare i campi in modo tale da impedire completamente i depositi.

Questa terza indagine dimostra che è possibile impiegare campi elettromagnetici anche in sistemi complessi. Ai fini di una soluzione sostenibile si possono così ridurre in modo considerevole sia i consumi di energia che i costi, contribuendo anche a una diminuzione del carico di sale nell'acqua potabile e nei corsi d'acqua.

L'ampio spettro di risultati (da un effetto inizialmente debole a un effetto del 100%) ha confermato che l'impiego efficiente del trattamento fisico delle acque dipende in larga misura dai campi utilizzati nonché dai vincoli di natura fisico-chimica. Ne consegue chiaramente che una generalizzazione dei risultati qui descritti rappresenterebbe una falsificazione sconsiderata dei nessi complessi. E' quindi necessaria un'ulteriore attività di ricerca per una migliore comprensione di tali nessi avendo a disposizione un numero maggiore di dati.

## 1 EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG

Geräte zur Beeinflussung der Verkalkung auf nicht-chemischer Basis, sog. physikalische<sup>4</sup> Wasserbehandlung, gibt es seit langem und in den unterschiedlichsten Ausführungen. Die Erfahrungen in der Praxis sind kontrovers. Die Grundlagen waren bis vor wenigen Jahren nicht bekannt und die Zusammenhänge nicht erforscht. Vor dem Hintergrund dieser Wissenslücke argumentierten verschiedene Hersteller unter Zuhilfenahme unseriöser Behauptungen. Wissenschaftliche Untersuchungen zum Phänomen elektromagnetischer Wasserbehandlung sind oft an theoretischen und experimentellen Schwierigkeiten gescheitert:

- Fehlendes theoretisches Verständnis der Vorgänge,
- Fehlende Parametrisierung,
- Fehlende Reproduzierbarkeit und widersprüchliche Behauptungen,
- Lange Experimente (ein Krustenaufbau geht in der Regel langsam vor sich),
- Kleine Beobachtungsskalen (atomare Größenordnung),
- Viele Einflussgrößen (Multidisziplinarität).

Andererseits wird heute mehr und mehr versucht, Energie einzusparen und die Chemikalienbelastung unserer Gewässer zu senken. Beispielsweise liesse sich laut dem Bundesprogramm "Energie 2000" vielerorts in Kläranlagen Energie sparen, wenn man den Schlammgehalt des Faulwassers erhöhen würde. Ein praktisches Hindernis dabei sind aber die Ablagerungen, die sich dann vermehrt bilden. Im Hinblick auf eine potentielle, technologisch neue und zeitgemässe Lösung zur Bekämpfung von Verkrustungen in der Schlammbehandlung von Kläranlagen wurde vom BUWAL eine Forschungsarbeit in Auftrag gegeben, die anhand von Fallstudien in der Praxis sich dem Thema von der phänomenologischen Seite nähern, zugleich aber auch die Grundlagen für das Verständnis der Mechanismen erarbeiten sollte.

Mineralische Ablagerungen entstehen in Kläranlagen in einem komplexen Umfeld. Sie

- sind wenig bekannt und kaum untersucht,
- können verschiedene Ursachen haben (da chemisch komplex),
- werden oft mit dem Einsatz von Chemikalien bekämpft, die ökologisch und ökonomisch keine idealen Lösungen darstellen.

Durch die Literaturstudien im Verlauf dieser Arbeit konnten nur zwei Publikationen über eine Anwendung physikalischer Wasserbehandlung im Zusammenhang mit Problemen in Kläranlagen gefunden werden (siehe Kap. 2.3.).

---

<sup>4</sup> Verschiedene Begriffe sind im Gebrauch: elektrophysikalische, elektromagnetische, elektrische, magnetische, katalytische Wasserbehandlung etc.

### Umfrage

Um eine Übersicht über das Ausmass der Verkrustungsproblematik in Kläranlagen zu gewinnen, wurde 1994 zu Beginn der Untersuchungen eine Umfrage unter Klärwärtern durchgeführt. Die Auswertung von 126 Fragebogen (100% Rücklauf) ergab, dass in rund 60% der Kläranlagen Verkrustungsprobleme (z.T. an mehreren Stellen) bekannt sind.

Verkrustungsproblem ?	
keine Probleme	39 %
Verkrustungsprobleme	61 %
Verkrustungsprobleme an mehreren Stellen	32 %

Zu den gefährdeten Bereichen in Kläranlagen ergab sich folgendes Bild:

Ort der Verkrustungen ?	
Wärmetauscher	53 %
Trübwasser- und Faulwasserleitung	44 %
Schlammleitungen	27 %
Zentrifugen resp. Schlammpressen	25 %
Biologie	9 %
andere	17 %

Die Massnahmen, die im Zusammenhang mit Verkrustungen genannt werden, sind i.a. Spülen, mechanisches Reinigen und Säurezudosierung. In einzelnen Fällen werden ganze Rohre ausgewechselt.

Gegenmassnahmen ?	
Spülen	66 %
Mechanische Reinigung	57 %
Zudosieren von Säure	23 %
Zudosieren von anderen Chemikalien	9 %

In vielen Kläranlagen wird eine Kombination mehrerer Massnahmen angewendet, um so das Ablagerungsproblem zu bekämpfen. In 75% der Fälle werden diese Massnahmen von Angestellten der Kläranlage ausgeführt, in 38% werden (ergänzend oder ausschliesslich) externe Firmen beigezogen. In fünf Fällen war ein Versuch mit magnetischer resp. elektromagnetischer Wasserbehandlung unternommen worden - jedoch nur in einem Fall mit einer gewissen Wirkung.

### Die Fragestellung der Dissertation

Aufgrund der Widersprüchlichkeit der Berichte und Erfahrungen war zu Beginn des Projektes keineswegs klar, ob sich die Anwendung elektromagnetischer Felder als erfolgreich erweisen würde. Als erstes musste die Phänomenologie erfasst werden. Der zweite Anspruch ging dahin, zu untersuchen, ob das Phänomen elektromagnetischer Wasserbehandlung sich in so komplexen Fällen wie Kläranlagen nutzbringend würde einsetzen lassen. Der dritte Anspruch betraf schliesslich die Frage nach dem Verständnis und den zugrundeliegenden, wissenschaftlich fassbaren Mechanismen.

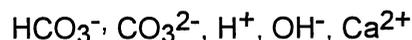
## 2 STAND DER FORSCHUNG UND WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Zum Thema physikalischer Wasserbehandlung findet sich wenig brauchbare Literatur. Die meisten Untersuchungen beschränken sich auf die Beschreibungen von Effekten oder rein chemische Studien. Die Argumentation der Werbung muss i.a. als pseudowissenschaftlich bezeichnet werden. Es werden deshalb an dieser Stelle kurz die chemischen und physikalischen Grundlagen erläutert, welche für die Diskussion der Anwendung physikalischer Wasserbehandlung und möglicher Wirkungsmechanismen notwendig sind. Für die Herleitungen muss auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen werden.

### 2.1 Chemische Grundlagen

#### Gleichgewichte

Der grösste Anteil der im Wasser gelösten Stoffe liegt als Ionen vor. Im Fall von Wasser im Gleichgewicht mit Kalk finden sich folgende Ionen:

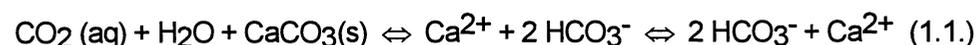


Zudem liegt Kohlensäure in der Form von  $[\text{CO}_2 \text{ aq}]$  und  $[\text{H}_2\text{CO}_3]$  vor (abgekürzt als  $\text{H}_2\text{CO}_3^*$ ).

Diese Spezies stehen miteinander im Gleichgewicht. Verschiebt sich der pH-Wert, so verschieben sich die relativen Anteile der Ionen.

#### Die Auflösung von Calciumcarbonat (Kalk)

Die Auflösung von Calciumcarbonat kann summarisch mit folgenden Gleichungen beschrieben werden (siehe Fig. 3.14.):



Die Kohlensäure stammt im allgemeinen aus der Atmosphäre, kann aber auch aus der Rhizosphäre oder aus einem mikrobiellen Abbau stammen. Sie löst sich in Wasser und liegt als gelöste Kohlensäure ( $\text{H}_2\text{CO}_3^*$ ), als Carbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) und hauptsächlich als Bicarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) vor.

Das gelöste Bicarbonat stellt die eigentliche Transportform der späteren Kalkablagerung dar.

### Die Ausfällung von Calciumcarbonat

Die Ausfällung von Calciumcarbonat lässt sich als Umkehr der Reaktion 1.1. beschreiben. Es gibt mindestens zwei Mechanismen oder parallele Reaktionswege, die je nach pH mit verschiedenen prozentualen Anteilen gleichzeitig ablaufen:



Die erste Gleichung gilt im neutralen pH-Bereich generell als die wichtigere Reaktion. Bei saurem pH kann auch ein dritter Reaktionsmechanismus eine Rolle spielen:



Die beobachtete Geschwindigkeitsrate setzt sich aus den Einzelreaktionen und ihren Rückreaktionen zusammen, wobei - abhängig von pH und  $\text{CO}_2$ -Partialdruck - die schnellste Reaktion dominiert.

### Chemische Übersättigung

Eine Ausfällung kann dann stattfinden, wenn eine Übersättigung erreicht ist.

Die relative Übersättigung  $\Omega$  ist definiert als

$$\Omega = \frac{[\text{Ca}^{2+}]_t \cdot [\text{CO}_3^{2-}]_t}{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{eq}} \cdot [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{eq}}} = \frac{\text{IAP}}{K_{\text{so}}}$$

Das IAP (ion activity product) bezeichnet das Produkt der aktuell herrschenden Ionenkonzentrationen.  $K_{\text{SO}}$  ist das Löslichkeitsprodukt des betreffenden Minerals. Dieser Wert definiert, ab welcher Konzentration die Lösung übersättigt ist und somit eine Ausfällung stattfinden kann. Das Löslichkeitsprodukt ist pH- und temperaturabhängig.

Sobald  $\Omega > 1$  ist, ist die thermodynamische Bedingung erfüllt, dass die gelösten Ionen ausfallen können. Spontan findet eine Ausfällung jedoch erst oberhalb des sog. metastabilen Bereiches statt. Quantitative Angaben zu diesem metastabilen Bereich sind problematisch: Im Gegensatz zu der Löslichkeitskurve ist dieser Bereich nicht allein thermodynamisch definiert, sondern auch eine Funktion der Prozessvariablen (wie z.B. der Abkühlungsrate und des Wandmaterials).

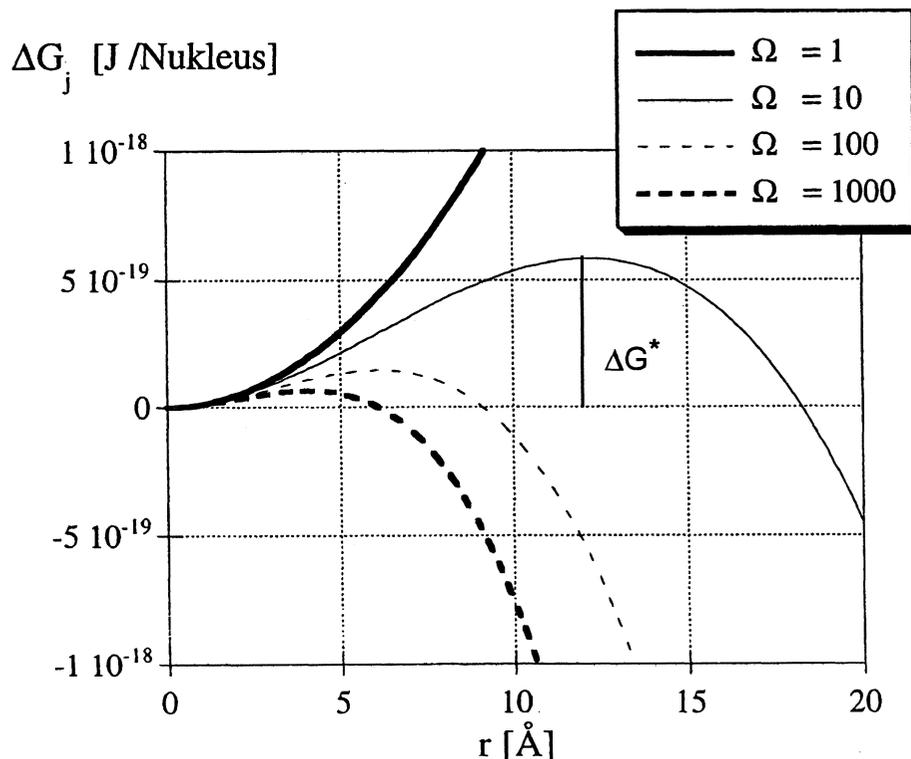
### **Keimbildung**

Die Keimbildung oder Nukleation bezeichnet den ersten Schritt der Bildung einer neuen Phase aus einem homogenen Medium. Er führt zur Bildung neuer Zentren, an welchen das Wachstum erfolgen kann. Im Fall von "homogener Nukleation" stellt sich spontan eine Keimbildung aus den gelösten, übersättigt vorliegenden Ionen ein, im Fall "heterogener Nukleation" erfolgt die Keimbildung auf geeigneten Oberflächen, die im System vorhanden sind (z.B. Algen, dispergierte Partikel oder Wandflächen). Einem Katalysator vergleichbar reduziert die fremde Oberfläche die nötige Aktivierungsenergie und erleichtert den Nukleationsprozess.

Die Kalk- resp. Kesselsteinausfällungen in realen Systemen, seien es nun technische Systeme, oder natürliche (z.B. Seen), werden durch heterogene Nukleation ausgelöst.

### **Aktivierungsenergie**

Die Bildung eines Kristallisationskeimes erfordert Energie. Beim Aufbau eines Keimes wird einerseits zunehmend Gitterenergie frei, doch muss gleichzeitig für die Bildung der neuen Oberfläche Oberflächenenergie aufgewendet werden. Mit zunehmender Grösse des Kristallkeimes ändern sich die beiden Grössen in unterschiedlicher Weise, so dass die Gesamtenergie ein Maximum überschreitet und dann immer kleiner und schliesslich negativ wird. Dieses Maximum  $\Delta G^*$  wirkt als Energiebarriere.



**Fig. 2.1.:** Änderung der freien Enthalpie ( $\Delta G$ ) bei der Bildung eines Calcitkeimes als Funktion des Radius  $r$  und der relativen Übersättigung  $\Omega$ .

### Die Calciumcarbonatmineralien

Es ist eine Besonderheit des Calciumcarbonats, dass es je nach Bedingungen in leicht unterschiedlichen kristallinen Gitterstrukturen (als Calcit, Aragonit oder als Vaterit) auskristallisieren kann. Entsprechend der chemischen<sup>5</sup> und physikalischen<sup>6</sup> Randbedingungen zum Zeitpunkt des Auskristallisierens bildet sich bevorzugt das eine oder andere Kristallgitter.

Unter normalem Druck und Temperatur sind nur Calcit und Aragonit stabil. Andere Modifikationen wandeln sich nach entsprechender Zeit in Calcit um. Da aber gerade auch kinetische<sup>7</sup> Faktoren eine massgebende Rolle spielen, lässt sich aus der Thermodynamik allein nicht zuverlässig

<sup>5</sup> Übersättigung, pH, relativer Anteil der verschiedenen Ionen und Störionen, Anteil an dispergiertem, kolloidalen Material

<sup>6</sup> Temperatur, Druck, Fließgeschwindigkeit etc.

<sup>7</sup> Die Kinetik beschäftigt sich mit den Fragen der Reaktionsgeschwindigkeit, den verschiedenen Einflüssen auf die Geschwindigkeit und den Reaktionsmechanismus.

ableiten, welche Kristallform unter den gegebenen Bedingungen entsteht.

### Einflüsse durch Verunreinigungen in realen Systemen

Im Gegensatz zu den kontrollierten, reinen Laborbedingungen sind in der Umwelt immer Spuren anderer Stoffe vorhanden. Viele dieser in natürlichen Systemen häufig vorkommenden Verunreinigungen verringern die Geschwindigkeit der Nukleation und/oder des Kristallwachstums von Calciumcarbonat (Inhibition). Partikelförmige Verunreinigungen können andererseits als Impfkörper wirken und so eine heterogene Nukleation erleichtern: Gerade bei Verunreinigungen mit Eisen sind in Bezug auf die Fällung von Calciumcarbonat beide Phänomene beobachtet worden: Einerseits findet Inhibition durch gelöste Eisenionen statt (Meyer, 1984) und andererseits ist heterogene Nukleation an vermutlich kolloidalen Eisenhydroxiden beobachtet worden (Sebold, 1996).

Die Stoffe, die die Ausfällung von Calciumcarbonat verhindern, sind relativ gut bekannt. Zu den wirkungsvollsten Inhibitoren gehören Phosphate und Phosphorverbindungen (z.B. "Calgon") sowie die Ionen des Eisens ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ), des Zinks ( $\text{Zn}^{2+}$ ) und des Magnesiums ( $\text{Mg}^{2+}$ ).

### Folgerungen

- Chemisch gesehen ist die Kesselsteinbildung eine Ausfällung aus einer übersättigten Lösung. Die Reaktion ist unter Praxisbedingungen durch die Keimbildungsprozesse kontrolliert.
- Die Kalkausfällung ist an das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht gekoppelt. Daher kann das Ausgasen von  $\text{CO}_2$  zu einer Übersättigung führen.
- Die Auflösungs- und Fällungsreaktionen von Calciumcarbonat in reinen Systemen sind sehr eingehend untersucht worden. Die chemischen Vorgänge an der Grenzfläche zwischen Wasser und Calcitoberflächen hingegen sind bis heute auf molekularer Ebene wenig bekannt. Ein Grund dafür ist, dass die Reaktionen an der Kristalloberfläche im Fall von Calcit sehr rasch ablaufen.
- Calciumcarbonat kann in drei verschiedenen Kristallgittern auskristallisieren. Die Bildung bestimmter  $\text{CaCO}_3$ -Kristallmodifikationen ist gerade für technische Systeme kaum systematisch untersucht worden.
- Die Kristallbildungsprozesse reagieren schon auf Spuren von Verunreinigungen. Die chemischen Reaktionen können dadurch empfindlich gebremst (Inhibition) oder beschleunigt (Heterokeime) werden.
- Die Nukleation erfordert eine Aktivierungsenergie und ist von chemischen und physikalischen Parametern abhängig. Der Energieeintrag durch ein elektromagnetisches Wasserbehandlungsgerät ist wesent-

lich kleiner als die thermische Energie bei Raumtemperatur, führt also vermutlich zu keiner nennenswerten Erhöhung der Energie des Systems.

## 2.2 Physikalische Grundlagen

In der Literatur fehlt bisher eine systematische Erarbeitung der Zusammenhänge zwischen chemisch-mineralogischen Phänomenen und physikalischen-elektrotechnischen Bedingungen. Die dem Sammelbegriff der sogenannten "magnetischen" oder "elektromagnetischen Wasserbehandlung" zugrundeliegenden physikalischen Gegebenheiten sind sehr unterschiedlich und können fallweise auch sehr komplex sein. In diesem Licht gesehen werden denn auch die vielen widersprüchlichen Aussagen aus verschiedenen Forschungsberichten verständlich, die mit unterschiedlichen elektrophysikalischen Wasserbehandlungsmethoden resp. -geräten gemacht worden sind.

Die Untersuchung all dieser Zusammenhänge hätte den Rahmen dieser vom BUWAL in Auftrag gegebenen Studie gesprengt. Hier sollte untersucht werden, ob es gelingt, elektromagnetische Felder so zu erzeugen und einzusetzen, dass dadurch die Bildung mineralischer Ablagerungen in komplexen Systemen wie Kläranlagen verhindert werden kann.

### Die verwendeten elektromagnetischen Geräte

In der hier vorgestellten Arbeit kamen elektromagnetische Geräte mit Spulen zur Anwendung. Die Spulen werden um die von der Verkalkung betroffene Rohrleitung gewickelt. Ein Gerät liefert ein komplexes Wechselstromsignal, das an die Spulen angelegt wird.

Die Geräte, die in der Kläranlage Werdhölzli und im Fallbeispiel der Trinkwasserversorgung zum Einsatz kamen, sind zwar speziell für den Versuch gebaut worden, entsprechen aber im Prinzip einer kommerziell erhältlichen Version. Nach den Untersuchungen in der Kläranlage Werdhölzli wurde es dann allerdings offensichtlich, dass für diese Anwendung ein Gerät notwendig war, das ein weitgehendes Einstellen der Feldparameter erlaubt. Ein solches Gerät wurde eigens für dieses Forschungsprojekt konstruiert und gebaut.

Der Energieverbrauch der benutzten Geräte ab Netz liegt je nach Anwendung zwischen wenigen und ein paar hundert Watt (Anschlussleistung).

## Elektromagnetische Felder und wässrige Lösungen

Elektrische und magnetische Felder sind richtungsabhängige Größen und werden daher in der Physik als Vektoren bezeichnet<sup>8</sup>:

$\vec{E}$	bezeichnet das elektrische Feld
$\vec{B}$	bezeichnet die magnetische Induktion
$\vec{F}$	bezeichnet eine Kraft

Ein Wechselstrom, der durch eine Spule fließt, erzeugt ein wechselndes Magnetfeld in der Längsrichtung der Spule. Es entsteht ein elektromagnetisches Wechselfeld.

In einer wässrigen Lösung liegen gelöste Bestandteile als geladene Teilchen vor. Ein elektromagnetisches Feld übt Kräfte aus, die zu Bewegungen und/oder Drehungen der Teilchen führen.

Ein Teilchen mit einer Ladung  $Q$  erfährt im elektrischen Feld  $\vec{E}$  eine Kraft  $\vec{F}$ .

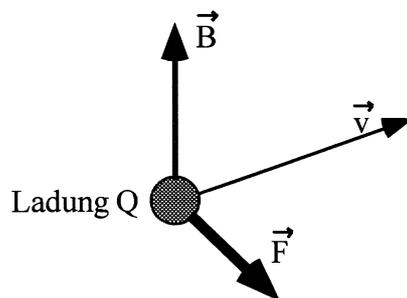
$$\vec{F} = \vec{E} \cdot Q$$

Diese Kraft ist, im Gegensatz zur Lorentzkraft (siehe unten), nicht von der Geschwindigkeit der Ladung abhängig.

Magnetische Felder üben nur dann eine Wirkung auf Ladungen aus, wenn sich diese Ladungen relativ zum Feld bewegen. Das ist beispielsweise dann der Fall, wenn das Wasser fließt.

Die Kraft  $\vec{F}$  ist in diesem Fall die sogenannte Lorentzkraft und ist der Geschwindigkeit proportional. Die Lorentzkraft steht senkrecht zum Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}$  und zur magnetischen Induktion  $\vec{B}$ . Ihre Richtung hängt vom Vorzeichen der Ladung ab.

$$\vec{F} = Q (\vec{v} \times \vec{B})$$



**Fig. 2.2.:** Räumliche Darstellung der Vektoren im Fall der Lorentzkraft

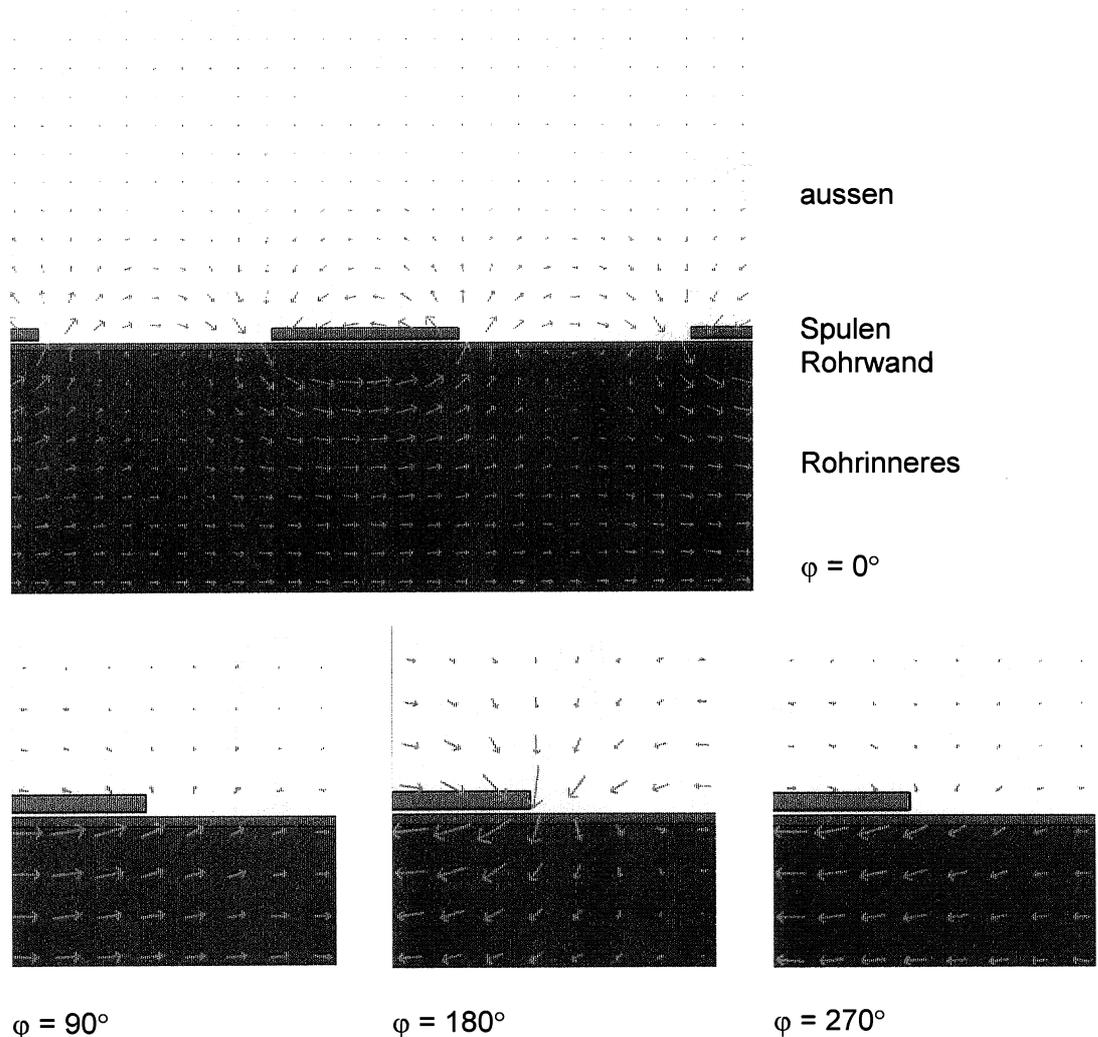
---

<sup>8</sup> Für die grundlegenden physikalischen Formeln und Kräfte und deren Herleitungen muss hier auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen werden.

24

Für die Wirkung der elektromagnetischen Felder, wie sie in den beschriebenen Fallstudien zur Anwendung kamen, sind diese zwei Arten von Kräften verantwortlich.

Es ist möglich, mit einem entsprechenden Aufwand die elektromagnetischen Felder unter den jeweilig gegebenen Verhältnissen näherungsweise zu berechnen. In der Figur 2.3. ist eine solche Simulation mit den Daten aus einer der nachfolgend beschriebenen Fallstudien (ARA Werdhölzli) dargestellt.



**Fig. 2.3.:** Vektordarstellung des Magnetfeldes als Momentaufnahmen des dynamischen Feldes für die Phasenwinkel 0, 90, 180 und 270°. Die dargestellte Fläche ist eine Schnittfläche radial durch das Rohr bis zur Mittelachse des Rohres. Die Momentaufnahmen zu verschiedenen Phasenwinkeln zeigen Drehung und Grössenänderung der magnetischen Feldvektoren im zeitlichen Verlauf und illustrieren das räumlich und zeitlich veränderliche magnetische Feld.

Der Auf- und Abbau elektromagnetischer Felder setzt Energie frei. Diesen überlagert ist die thermische Bewegungsenergie. Die thermische Bewegungsenergie äussert sich in der Brown'schen Bewegung der Teilchen und ist proportional zu  $kT$  (Produkt aus Boltzmann-Konstante<sup>9</sup> und Temperatur). Eine Temperatur von 25° C entspricht der Energie von  $kT = 4.1 \cdot 10^{-21}$  J/Teilchen. Die durch den Feldauf- und abbau freigesetzte Energie ist um Grössenordnungen kleiner als die thermische Energie. Im Gegensatz zur thermischen Energie ist die Energie der elektromagnetischen Felder aber räumlich und zeitlich strukturiert. Es scheint plausibel, dass Kristallisationsvorgänge als räumlich klar definierte Prozesse auf räumlich strukturierte Felder empfindlich reagieren.

Die mathematische Beschreibung elektromagnetischer Felder ist durch die Maxwell'schen Gleichungen formuliert. Der Zusammenhang zu spezifischen chemischen resp. mineralogischen Prozessen auf diesem Gebiet ist hingegen noch theoretisches Neuland.

### **2.3 Die Literatur zum Thema physikalische Wasserbehandlung**

#### **Allgemeine Bemerkungen**

Die ältere Literatur über den Einfluss magnetischer oder elektromagnetischer Felder auf die Kristallisation und ihre industrielle Anwendung ist überwiegend russischer Herkunft. Die Skepsis im Westen liegt in der fehlenden Kenntnis des Mechanismus und ist durch die kontroversen Aussagen bezüglich Wirksamkeit und Reproduzierbarkeit begründet.

Es gibt aber auch im Westen immer mehr Erfahrungsberichte, doch sind nur wenige Artikel in internationalen Fachzeitschriften publiziert worden. Seit den ersten Patenten<sup>10</sup> ist die Kontroverse um das Thema nicht abgebrochen. Die Erarbeitung wissenschaftlicher Beweise resp. Widerlegungen diverser Spekulationen, Erklärungsversuche und Hypothesen ist schwierig. Beim Vergleichen wissenschaftlicher Arbeiten oder von Erfahrungsberichten wird in der Regel der Tatsache, dass unterschiedliche Ergebnisse mit ganz unterschiedlichen Geräten und Versuchsbedingungen erzielt worden sind, nur in sehr beschränktem Mass Rechnung getragen. Gerade dies dürfte aber ein wichtiger Grund für die offensichtlichen Widersprüche sein.

---

<sup>9</sup>  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

<sup>10</sup> 1871 wurden in England und 1873 in den USA Patente zur Verhinderung der Kesselsteinbildung unter Einsatz von Magnetfeldern erteilt. 1888 wurde eine Methode der Wasserbehandlung mit elektrischen Feldern patentiert, 1890 wurde ein erstes Patent zur Wasserbehandlung mittels elektromagnetischer Felder angemeldet und 1945 erhielt die elektromagnetische Wasserbehandlung mit dem Patent von Vermeiren weiteren Aufschwung.

### **Verschiedene Gerätebautypen**

Die unzähligen Konstruktionsweisen lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten einteilen. Es wird hier nur eine grobe prinzipielle Einteilung vorgenommen, die sich auf die physikalischen Bedingungen der Felder stützt:

- Permanentmagnete produzieren ein statisches Magnetfeld. Auch Elektromagnete können zur Erzeugung eines statischen Magnetfeldes eingesetzt werden. Ein Magnetfeld übt auf im Wasser gelöste Ladungsträger aber nur dann eine Kraft aus, wenn sie relativ zum Feld bewegt werden.
- Elektrische Felder: Eine an Elektroden angelegte Spannung erzeugt ein elektrisches Feld. Dieses übt sowohl auf ruhende als auch auf bewegte Ladungsträger eine Kraft aus.
- Wechselstromgeräte: Ein Strom, der durch eine Spule fließt, erzeugt ein Magnetfeld. Bei Wechselstrom lässt sich das Feld zeitlich verändern und es entsteht so ein elektromagnetisches Feld. Der Auf- und Abbau von elektromagnetischen Felder wirkt auf bewegte und unbewegte Ladungsträger im Wasser ein.

Als weitere Teilbereiche physikalischer Wasserbehandlung sind Anwendungen von ultravioletter Strahlung, Ultraschall, Turbulenz u.a. zu nennen, die aber hier nicht näher beschrieben werden.

### **Laborversuche mit definierten Feldern**

Es gibt wissenschaftliche Untersuchungen, in denen ausgewählte Messgrößen ohne Feldeinfluss verglichen wurden mit den entsprechenden Verhältnissen in starken, im allgemeinen rechtwinklig zur Fließrichtung angelegten statischen Magnetfeldern. Die beobachteten Effekte können so innerhalb eines Versuchsaufbaus mit Feldparametern korreliert werden. In den meisten Fällen konnten bei verhältnismässig hohen Magnetfeldstärken Effekte festgestellt werden.

### **Erfahrungen aus der praktischen Anwendung**

Aus praktischen Versuchen werden widersprüchliche Erfahrungen beschrieben: Eliassen und Skrinde veröffentlichten schon 1957 Studien, in denen kommerziell erhältliche Geräte an Prüfständen verglichen worden waren, aber keine Unterschiede gezeigt hatten. Ähnliche Untersuchungen sind von Limpert und Raber (1985), Hasson und Bramson (1985), Wagner und Schmidt (1985), Theiler (1988), Maier und Ulmer (1991) und Lohmeyer (1992) veröffentlicht worden.

Andererseits sind aus industriellen Anwendungen viele positive Berichte publiziert worden. Auf die frühen Publikationen von Vermeiren (1957 und 1958) folgten Berichte von Kittner (1970), Donaldson und Grimes (1987), Ellingsen und Kristiansen (1979), Pandolfo et al. (1987).

Von speziellem Interesse im Zusammenhang mit dieser Arbeit ist die Literatur zum Thema des Einsatzes von Geräten zur physikalischen Wasserbehandlung in Kläranlagen. Dazu wurden nur zwei kleine Artikel (Krivoi et al. (1969); Lloyd (1991)) über Feldeinflüsse auf Ausfällungen in Kläranlagen gefunden.

### **Wissenschaftliche Tests**

Die Auswirkung magnetischer und elektromagnetischer Felder auf Kristallisationsvorgänge im Labor oder auf einfach zu bestimmende Messgrößen (wie z.B. Auszählen der Kristallisationskeime nach einer Verzögerungsphase) wurden verschiedentlich untersucht. Die Resultate sind widersprüchlich und Folgerungen daraus sind verfrüht.

### **Beobachtungen und Hypothesen**

Trotz aller Widersprüche lässt sich eine gewisse Übereinstimmung in Bezug auf die gemachten Beobachtungen finden: Bei übersättigten Lösungen kann durch geeignete Felder die Kinetik des Kristallisationsprozesses beeinflusst werden.

Jedoch ist es bisher nicht gelungen, eine quantitative Beschreibung der Abhängigkeit der Nukleation und Kristallisation vom Magnetfeld oder elektromagnetischen Feld zu formulieren.

Der Versuch, die Beobachtungen zu erklären, hat zu verschiedenen Hypothesen geführt. Insbesondere ist die Rolle von Eisen, das überall vorhanden ist, nicht geklärt.

Die Hypothesen können folgendermassen unterteilt werden:

- Direkte Beeinflussung der Ausfällung aus übersättigter Lösung (ohne Beteiligung von Eisenspezies)
- Beeinflussung der  $\text{CaCO}_3$ -Ausfällung via kolloidale Eisen-(Zink-)spezies
- Inhibition der Fällung von Calciumcarbonat durch gelöste Eisen-(Zink-)ionen

Eine übersättigte Lösung fern vom Gleichgewicht ist ein System in einem labilen Zustand. Die Auslöser der Nukleierung sind wenig verstan-

den. Die Wirkung von elektromagnetischen Feldern auf die Kesselsteinbildung kann spekulativ als Entstehung von Impfkeimen, als veränderte Kristallwachstumsrate oder als veränderte Beweglichkeit interpretiert werden. Die alte, umstrittene Hypothese, wonach die Wirkung magnetischer oder elektromagnetischer Felder eine Änderung der Wasserstruktur hervorrufe, konnte bislang nicht bestätigt werden. Ihre Überprüfung wird durch die Schwierigkeit erschwert, die Struktur flüssigen Wassers experimentell und theoretisch zu charakterisieren.

### Folgerungen

Aufgrund der Widersprüchlichkeit der Ansätze und Aussagen ist es gewagt, aus der Literatur voreilige Schlüsse ziehen zu wollen. Einige Folgerungen scheinen vertretbar zu sein:

1. Die beschriebenen Ergebnisse sind kontrovers. Unter unterschiedlichen chemischen und physikalischen Bedingungen (Geräten) werden divergierende Beobachtungen gemacht. Deshalb ist es häufig nicht möglich, zu entscheiden, ob ein getestetes Gerät keine Wirkung zeigt oder ob die eingesetzte Versuchsanordnung ungeeignet war.
2. Es ist bekannt, dass gelöste Metallionen Änderungen im Kristallwachstum, -habitus und -modifikation von Calciumcarbonat bewirken können. Andererseits gibt es Publikationen, die in reinen Systemen unter Feldeinfluss vergleichbare Effekte nachgewiesen haben (z.B. Parsons et al. 1997). Zur Zeit kann aus der Literatur zwischen den verschiedenen mechanistischen Hypothesen nicht entschieden werden. Mögliche Hypothesen über die Wirkungsmechanismen des Feldeinflusses auf Kristallisationsvorgänge können nur in reinen Laborsystemen unter definierten chemisch-physikalischen Randbedingungen überprüft werden.
3. In der Werbung wird immer wieder argumentiert, dass gleichzeitig mit dem Kesselstein auch die Korrosion verhindert würde. Dazu ist in der Literatur keine Bestätigung zu finden. Im Gegenteil haben sehr sorgfältige Versuche gezeigt, dass gewisse kommerzielle Geräte zu einer Freisetzung von Metallionen führen (Coetsee, 1996).
4. Eine Vielzahl an Gerätekonstruktionen wird zur sog. physikalischen Wasserbehandlung angeboten. Die erzeugten physikalischen Bedingungen (Feldstärken, etc.) sind sehr unterschiedlich, und es ist sehr zu vermuten, dass fallweise verschiedene Effekte (Inhibition des Kristallwachstums durch Metallionen, Beeinflussung der Nukleation etc.) für allfällige Wirkungen verantwortlich sind.
5. Die eingesetzten Feldstärken führen zu Kräften und Wechselwirkungen, die als sehr klein eingestuft werden müssen. Das bedeutet, dass die chemisch/mineralogischen Folgereaktionen nicht einfach zu

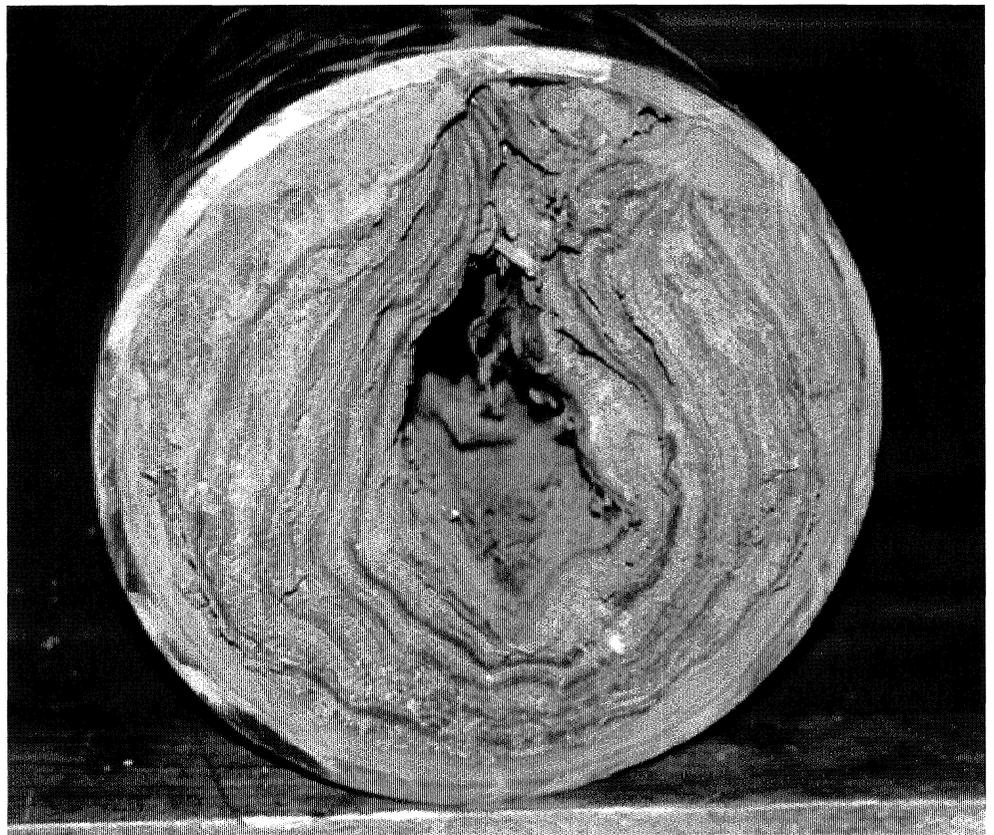
erfassen sind und es entsprechend anspruchsvoll ist, eine geeignete Messmethodik zur Aufklärung möglicher räumlich gerichteter Effekte zu entwickeln.

### 3 FALLSTUDIEN

Das Gebiet physikalischer Wasserbehandlung ist wenig erforscht. Die Hauptausrichtung der vom BUWAL unterstützten Arbeit war, im Sinn einer praxisorientierten Forschung das Anwendungspotential elektromagnetischer Felder zu untersuchen.

#### 3.1 Ablagerungen in Kläranlagen

In Kläranlagen können an verschiedenen Orten Ablagerungen auftreten. Ablagerungen in Rohrleitungen und Wärmetauschern der Schlammbehandlung führen zu grösseren Reibungsverlusten bis zu völligem Verstopfen der Leitung.



*Fig. 3.1.: Rohr aus der Kläranlage Rosenbergsau (1998)*

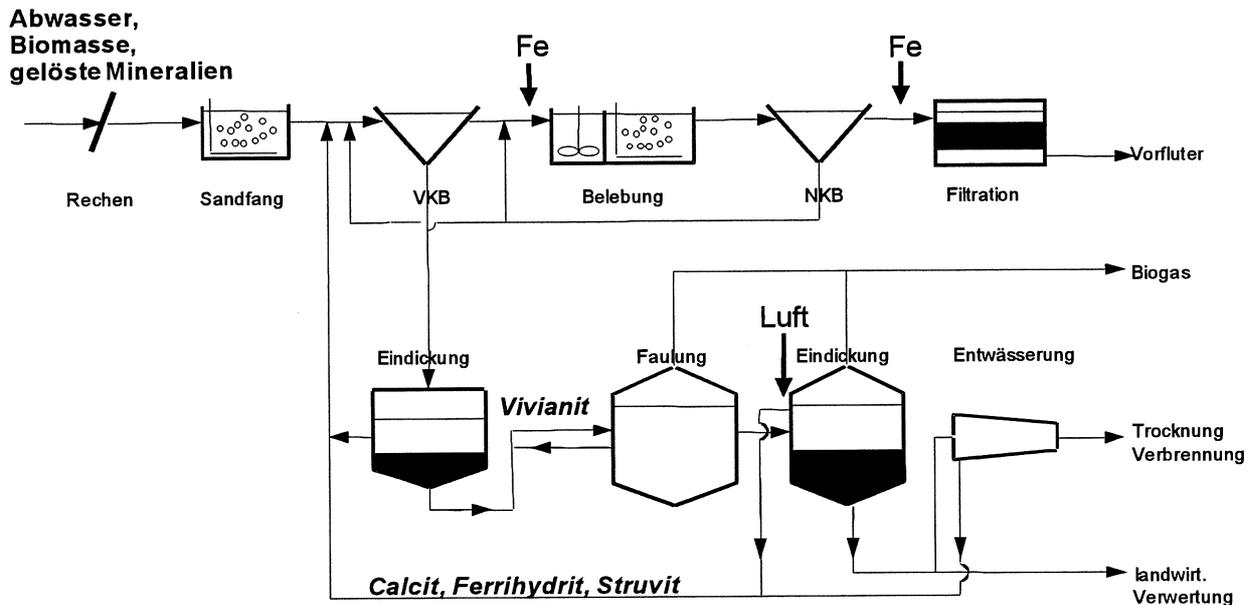
In einem Wärmetauscher führt eine Verkrustung zudem zur Verminderung des Wärmeübergangs vom Heiz- oder Kühlmedium auf den Schlamm und damit zu Energieverlusten.

Seit der Einführung des Phosphatverbots hat sich, gestützt auf Beobachtungen in verschiedenen Kläranlagen, die Tendenz zur Bildung von Kalkverkrustungen verstärkt. Zur Verhinderung von Ablagerungen werden i.a. Chemikalien eingesetzt (Tab. 3.1.) oder es müssen mehr oder weniger aufwendige Unterhaltsarbeiten geleistet werden.

Die Ablagerungen können folgendermassen unterteilt werden (nach VSA-Unterlagen):

- Anorganische, kalkhaltige oder glasartige Krusten
- Organische Krusten mit fett- bis kaugummiartiger, oft auch krümeliger Struktur
- Reine Fettablagerungen

Organische Krusten entstehen in Frischschlammleitungen und in der Hygienisierung. Sie bestehen zum wesentlichen aus Kalkseife: Gelöstes Calcium und Magnesium reagiert mit den Fettsäuren, die bei der Versäuerung des Frischschlammes entstehen, und den Seifenresten des Abwassers zu wasserunlöslicher Kalkseife. Fettablagerungen sind durch Temperaturunterschiede bedingt und finden sich in Zuleitungskanälen und Frischschlammleitungen. Anorganische Krusten entstehen vorwiegend in Faul- und Trübwasserleitungen und in Faulschlammleitungen. Die Gründe für die Entstehung dieser mineralischen Ablagerungen sind komplex und bislang kaum untersucht worden. Es liess sich zeigen, dass die Abbauprozesse der Kläranlage, sowie chemische Zusätze (Fällsalze), Ausgasen von Kohlensäure und Oxidationsreaktionen zu starken chemischen Übersättigungen führen. Auch die Prozessführung kann entscheidend zum Entstehen gewisser Ausfällungen beitragen (z.B. biologische Phosphorelimination). Das Auftreten von Ablagerungen ist jedoch ganz entscheidend von den jeweiligen chemischen und physikalischen Bedingungen vor Ort in der betroffenen Kläranlage abhängig.



**Fig. 3.2.:** Schematische Darstellung der verschiedenen Stationen einer Kläranlage. Schräggestellt im Fettdruck sind potentielle Ausfallungsprodukte angegeben. Oben ist die Wasserstrasse gezeichnet, unten die Schlammbehandlung.

### Die Prozesse in einer Kläranlage

Der Zufluss in die Kläranlage besteht aus organischem und mineralischem gelösten und partikulärem Material. Das partikuläre Material und der Überschuss an Bakterien aus der Belebtschlammanlage wird als Schlamm abgezogen. Zur Stabilisierung der Klärschlämme, welche beim aeroben Abbau in der Kläranlagen in grossen Mengen anfallen, wird eine anaerobe Schlammbehandlung (Schlammfaulung) durchgeführt. Dabei werden über 50% der organischen Bestandteile zu Methan und Kohlensäure umgesetzt, was dazu führt, dass der Restschlamm weitgehend geruchlos ist, sich leichter entwässern lässt und aufgrund seines Mineral- und Huminsäuregehaltes als Dünger verwendet werden kann.

Verschiedene mikrobielle Prozesse sowie Fällmittelreste führen in der Schlammbehandlung zu sehr hohen Ionenkonzentrationen, die zusammen mit den Redoxreaktionen der Faulung dazu führen, dass die Löslichkeit mehrerer mineralischer Phasen in der Regel überschritten wird. Die Ausfällungen bestehen i.a. aus Carbonaten, Phosphaten, Oxiden und Hydroxiden (z.B. Calciumcarbonat, Calciumphosphat, Ferrihydrit, Vivianit, jedoch nicht reiner Form).

### **Technische Massnahmen gegen Ablagerungen in Kläranlagen**

Während organische Ablagerungen und Fettablagerungen i.a. durch Spülen mit Lauge entfernt werden können, erfordern mineralische Krusten einen grösseren Zeit- und Kostenaufwand (siehe Tab. 3.1.).

Die chemischen Massnahmen werden entweder periodisch durchgeführt, oder es werden automatische Dosier- oder automatische Spülstationen eingerichtet.

**Tabelle 3.1.: Reinigungsmethoden resp. Gegenmassnahmen gegen Verkrustungen in Kläranlagen**

	Massnahme	Mechanismus	Nachteil
chemisch	Phosphorsäure	Inhibition der Calcit-ausfällung	Produktion von Schlamm, Säurekorrosion Einwirkungszeit > paar h Neutralisation nötig: Ca(OH) <sub>2</sub> oder NaOH
	organische Säuren (ca. 10%)	Komplexierung, pH-Effekt	Neutralisation nötig: Ca(OH) <sub>2</sub> , NaOH
	"Brindisäure" (HCl + Rhizinusöl)	pH-Effekt	Neutralisation nötig: Ca(OH) <sub>2</sub> oder NaOH
	Salpetersäure	pH-Effekt	Neutralisation nötig: Ca(OH) <sub>2</sub> oder NaOH
	Schwefelsäure (heiss)	pH-Effekt	Neutralisation und Sicherheitsvorkehrungen nötig
	Phosphonate	chemische Inhibition	Abbaubarkeit Gewässerschutz
	Komplexbildner (NTA)	Komplexierung	Abbaubarkeit (nur aerob) Einwirkungszeit > paar h
	automatische Spülstation	chemisches Auflösen der Ablagerungen	hohe Investitionskosten, Kosten für Chemikalien, Chemikalienabfall, Neutralisation
mechanisch	Ausschlagen, Ausbohren Kanalfräsen		Materialeermüdung Wartungsaufwand bei Bögen begrenzter Einsatz
	Spülen mit Hoch- und Höchstdruck		Wartungsaufwand
	Karborundstopfen		Wartungsaufwand
	"Kanalhexe" <sup>11</sup>		Wartungsaufwand, Materialeermüdung

Aus ökonomischer Sicht summieren sich die Kosten für die eingesetzten Chemikalien, die Energieverluste, die internen und externen Wartungsarbeiten, des zusätzlich anfallenden Schlammes und eventueller Folge-reaktionen wie säurebedingter Korrosionsschäden auf.

Aus ökologischer Sicht ist der Einsatz von Chemikalien im Sinne des Gewässerschutzes unerwünscht.

<sup>11</sup> rotierender Spülkopf mit Kettengliedern, die gegen die Rohrwand schlagen

Ein weiteres Argument ist die Sicherheit der Arbeiter der Kläranlage im Einsatz mit gefährlichen Stoffen oder Arbeiten.

### **Der Einsatz magnetischer oder elektromagnetischer Felder**

Verschiedentlich wurde schon versucht, Geräte für physikalische Wasserbehandlung, wie sie für Haushalte angeboten werden, in Kläranlagen einzusetzen. Im allgemeinen war kein Einfluss auf die Verkalkung festzustellen (siehe Auswertung Fragebogen).

Die vom BUWAL in Auftrag gegebene Untersuchung über einen geeigneten Einsatz elektromagnetischer Felder in Kläranlagen ist ein Einstieg in eine alternative technische Massnahme gegen das Auftreten von Verkrustungen. Der Einsatz von Feldern hat den entscheidenden Vorteil, dass dabei keine Chemikalien eingesetzt werden müssen und die eingesetzte elektrische Leistung gering ist.

#### **3.1.1 Kläranlage Werdhölzli**

Die Untersuchung der Frage, ob es möglich ist, die in Kläranlagen auftretenden Verkrustungen mit elektromagnetischen Feldern erfolgreich zu verhindern, wurde in der Kläranlage Werdhölzli begonnen.

Die Kläranlage Werdhölzli ist mit rund 500'000 EWG die grösste Kläranlage der Schweiz. 1980-86 wurde die Kläranlage ausgebaut. Es traten daraufhin an verschiedenen Orten der Schlammbehandlung Störungen auf, die durch Ablagerungen in Rohren Einrichtung mehrerer Dosierstationen für Phosphorsäure beheben<sup>12</sup>. Die von Verkrustungen betroffenen Leitungen sind teilweise als parallel geführte Strassen angelegt, was sich für Vergleichsuntersuchungen anbot.

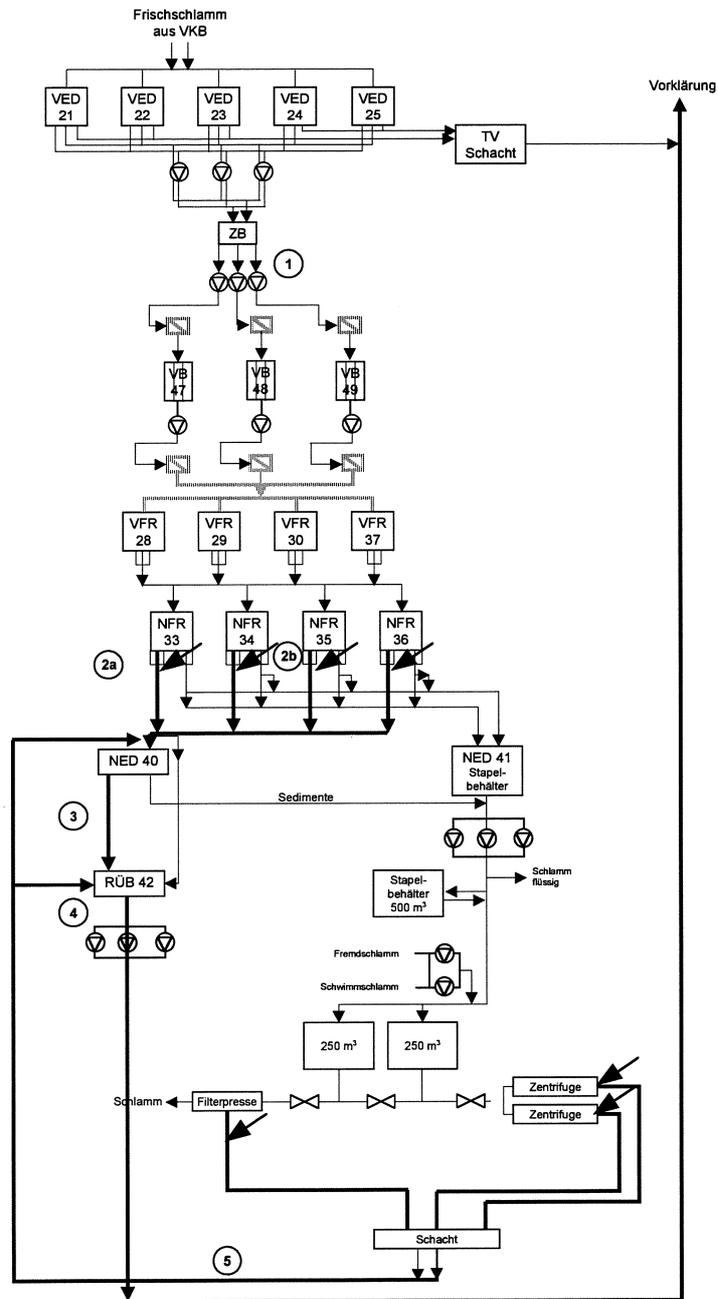
---

<sup>12</sup> Durch die Massnahme des Phosphatverbots wurde der Zulauf der ARA Werdhölzli um 200-300 t P/y entlastet (Abschätzung nach H.Siegrist et.al, (1996) auf den Zulauf der ARA Werdhölzli bezogen). Es entstand dabei aber ein neues Problem: Phosphat, das auf die Ausfällung von Calciumcarbonat inhibierend wirkt, lag nunmehr in geringerer Konzentration vor. Als technische Massnahme wurde in dieser Kläranlage dem Faulwasser Phosphorsäure zudosiert.

Die in der Kläranlage zudosierte Phosphorsäure (75 - 100 t /y für ca. 75'000-100'000.-Fr/y) entspricht bei der verwendeten Konzentration einer zusätzlichen Jahresfracht von 18 - 24 t P /y. Das Phosphat wird in der chemischen Fällung wieder ausgefällt und führt zu einer zusätzlichen Schlammfracht von ca. 100 t/y, die jährlich zusätzlichen Kosten von ca. Fr.100'000.- verursacht.

Die Problematik dieser Lösung liegt in den Mehrkosten für Phosphorsäure, zusätzlichem Fällmittel, der Entsorgung einer zusätzlichen Schlammfracht, Wartung und Unterhalt der Dosierstationen sowie je nach Materialien Korrosionsproblemen.

### Schlammbehandlung ARA Werdhölzli



**Fig. 3.3.:** Die Schlammbehandlung in der Kläranlage Werdhölzli. Die Pfeile markieren die Phosphorsäurezugaben. Die Zahlen 1 bis 5 bezeichnen die Standorte der Versuchsgерäte. In der ersten Versuchsetappe wurden die Geräte in Position 1- 4 installiert. In der 2.Versuchsetappe kam die Position 5 hinzu. Schwarze, fette Linien bezeichnen Leitungen, die gemäss der Erfahrung der ARA-Betreiber ohne Säurezugabe innert kurzer Zeit verkalken. Graue Linien stehen für Rohre, in denen sich organische Ablagerungen bilden.

Zu den verwendeten Symbolen:

	Säuredosierung
	Pumpe
	Wärmetauscher
	Schieber

Zu den Abkürzungen:

VED	=	Voreindicker
ZB	=	Zwischenbehälter
VB	=	Verweilbehälter der Pasteurisierung
VFR	=	Vorfaulraum
NFR	=	Nachfaulraum
NED	=	Nacheindicker
RÜB	=	Rückhaltebehälter
FWP	=	Faulwasserpumpen

### Die Probleme mit Verkrustungen

Die mineralischen Ausfällungen (in der Fig.3.3. dargestellt als schwarze Linien) sind durch die hohen chemischen Übersättigungen an diesen Stellen bedingt (siehe unten). Kleine Veränderungen der Bedingungen, wie sie z.B. durch das Entspannen des hohen CO<sub>2</sub>-Partialdruckes oder durch Kontakt mit Luftsauerstoff zustande kommen, führen zu den beobachteten Ausfällungen.

Durch die Einführung der P-Fällung (1985) und des P-Verbot (1986) hat die P-Konzentration und damit die chemische Inhibition der Kalkausfällung stark abgenommen. Die Massnahme der Zudosierung von Phosphorsäure führt im Faulwasser zu einer zusätzlichen Phosphatbelastung von 50-60 gP/ m<sup>3</sup>, womit einer Verkalkung der Leitungen und Pumpen vorgebeugt wird. Die Menge, die so zudosiert wird, würde, auf den Zulauf bezogen, einer zusätzlichen Phosphatkonzentration von 0.2.- 0.3 gP/m<sup>3</sup> (resp. zusätzlichen 5% Phosphat) entsprechen.

Ablagerungen aus vorwiegend organischem Material (graue Linien in Fig.3.3.) bestehen im wesentlichen aus Kalkseife. Bei den Reinigungen der Wärmetauscher der Pasteurisierung im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich dann allerdings, dass sich unter der Kalkseife auch eine Kalkschicht auf den Wärmetauscherrohren abgelagert hatte. Die Kalkseife lässt sich mit Heisswasser und NTA-Lösung entfernen.

### Die mikrobiologischen Abbauvorgänge im Abwasser und Schlamm

aerober Kohlenstoffabbau rsp. Gärung	$"\text{CH}_2\text{O}" + \text{O}_2$	→	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Schlamm}$
Methanogenese	$2"\text{CH}_2\text{O}"$	→	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{Schlamm}$
Ammonifikation	Proteine	→	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4^+ + \text{HCO}_3^- + \text{Schlamm}$
Nitrifikation	$\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2$	→	$\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ + \text{Schlamm}$
Denitrifikation	$4\text{NO}_3^- + 5"\text{CH}_2\text{O}" + 4\text{H}^+$	→	$2\text{N}_2 + 5\text{CO}_2 + 7\text{H}_2\text{O} + \text{Schlamm}$

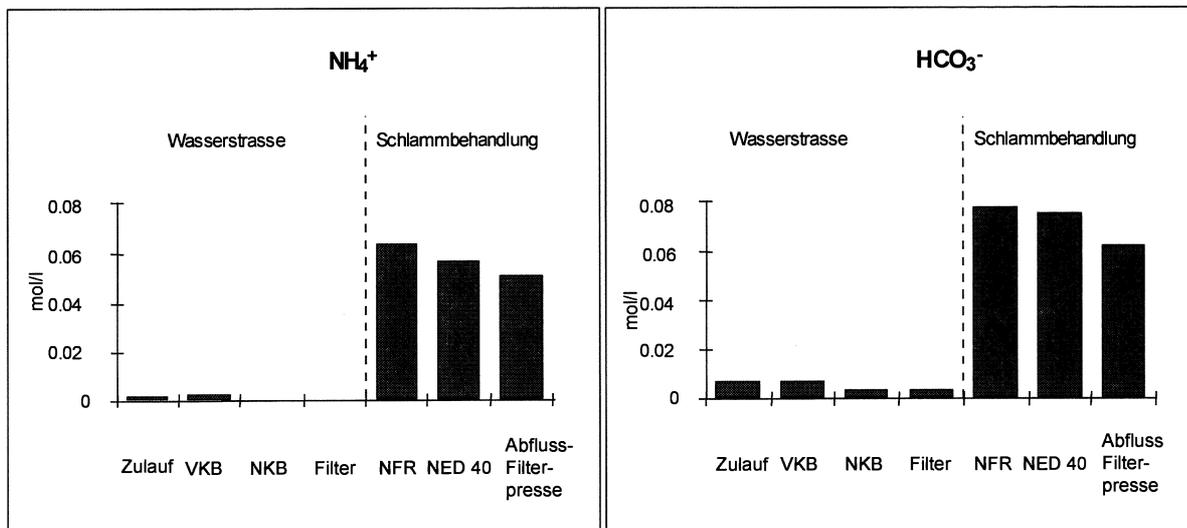
### Chemische Übersättigungen im Faulturm

Die im Abwasser enthaltenen organischen Komponenten können in gelöste und partikuläre Kohlenstoff-Quellen unterteilt werden. Die gelösten und feinpartikulären C-Quellen werden zur Hauptsache in der biologischen Stufe abgebaut. Die grobpartikulären C-Quellen, die sich im Vorklärbecken absetzen, werden in der Faulung anaerob abgebaut (Gärung, Methanogenese). Dabei bilden sich die Gase Methan und Kohlen-säure, die in die Gasatmosphäre entweichen.

In der Faulung wird der Stickstoff aus dem Abbau der Proteine in Form von Ammonium freigesetzt. Aus Gründen der Ladungsbilanz führt das zu einem entsprechenden Anstieg der Alkalinität<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> Alkalinität = Säurebindungsvermögen



**Fig. 3.4.:** Messdaten der beiden wichtigsten Ionen Ammonium und Bicarbonat.

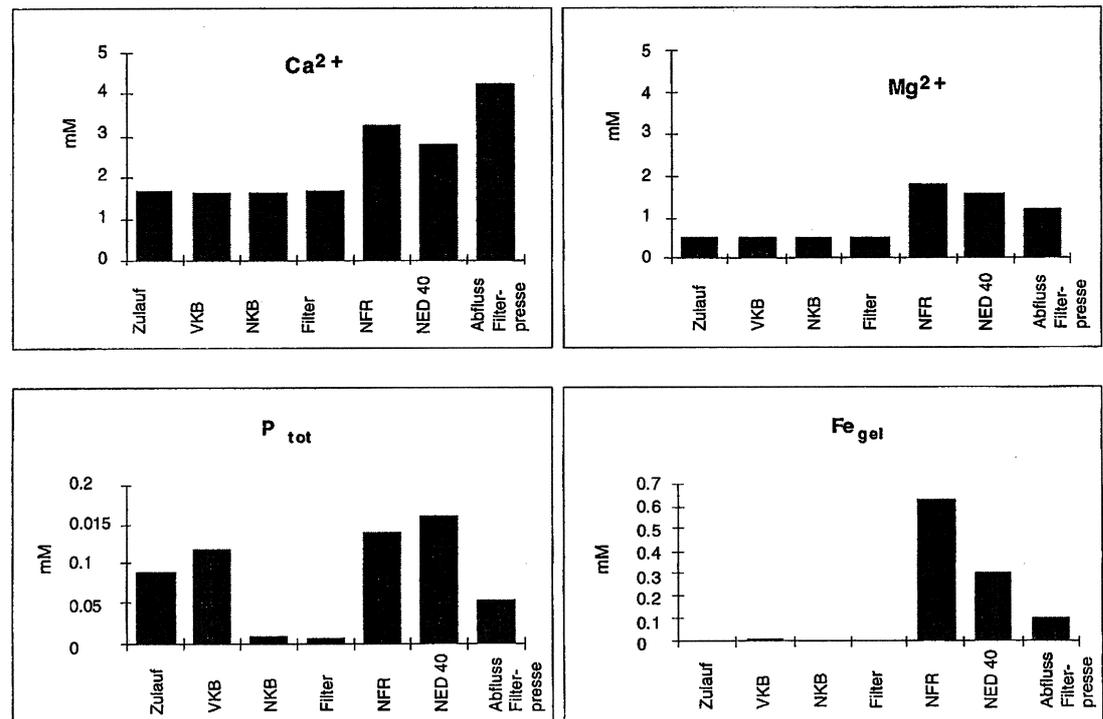
Zur Messung der gelösten Ionen wurden an verschiedenen Stellen der Wasserstrasse (Zulauf, VKB, NKB, Wasserfilter) und der Schlammbehandlung (NFR, NED 40, Abfluss Filterpresse) der Kläranlage Werdhölzli Flüssigproben entnommen. Die Analysen illustrieren den Konzentrationsverlauf von Ammonium und Bicarbonat als Funktion der Prozesse: Nach der Faulung liegen sie um eine Zehnerpotenz höher als vorher.

Das ortho-Phosphat aus dem Zulauf wird in der chemischen P-Elimination (Simultan- und Nachfällung) mit Eisensalzen gebunden. Um die gesetzlich vorgeschriebenen Ablaufwerte von < 0.8 g P/l erreichen zu können, müssen die Eisensalze im Überschuss dosiert werden: Der  $\beta$ -Wert, der das Verhältnis Fe zudosiert / P gefällt angibt, beträgt in der Kläranlage Werdhölzli ca. 2. Im Faulurm sind die Übersättigungen derart hoch, dass verschiedene Ausfällungsreaktionen (siehe p.46) stattfinden können.

- In der Faulung wird Fe(III) in Eisenverbindungen reduziert und es kommt so zu einer Rücklösung. Ein Teil des gelösten Fe(II) verbindet sich mit dem reduzierten Schwefel zu Eisensulfid. Ein weiterer Teil verbindet sich mit dem Phosphat zu Vivianit (siehe Kap. 3.1.2.).
- Die Calciumionen stammen überwiegend aus dem Trinkwasser, bedingt durch den jeweiligen Kalkgehalt des Gesteinsgrundes. Zeolite aus den Waschmitteln stellen eine weitere Ca- und Mg-Quelle dar, denn die durch den Waschprozess im Zeolit gebundenen zweiwertigen Härtebildner werden in der Faulung wieder gegen Ammonium ausgetauscht und freigesetzt. Zusammen mit der erhöhten Alkalini-

tät im Faulturm sind die Bedingungen einer Kalkübersättigung gegeben.

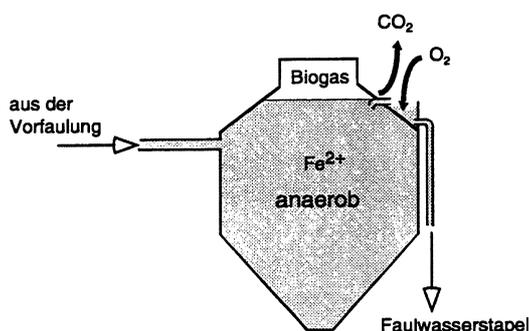
Durch die lange Aufenthaltszeit des Schlammes im Faulturm stellt sich bezüglich Calciumcarbonat ein metastabiles Gleichgewicht ein.



**Fig. 3.5.:** Gemessene Konzentrationen an Calcium-, Magnesium-, Eisenionen resp. Gesamtphosphat an verschiedenen Probenahmestellen der Wasserstrasse (Zulauf, VKB, NKB, Wasserfilter) und der Schlammbehandlung (NFR, NED 40, Abfluss Filterpresse) in der Kläranlage Werdhölzli.

### Ausfällung in den Faulwasserleitungen

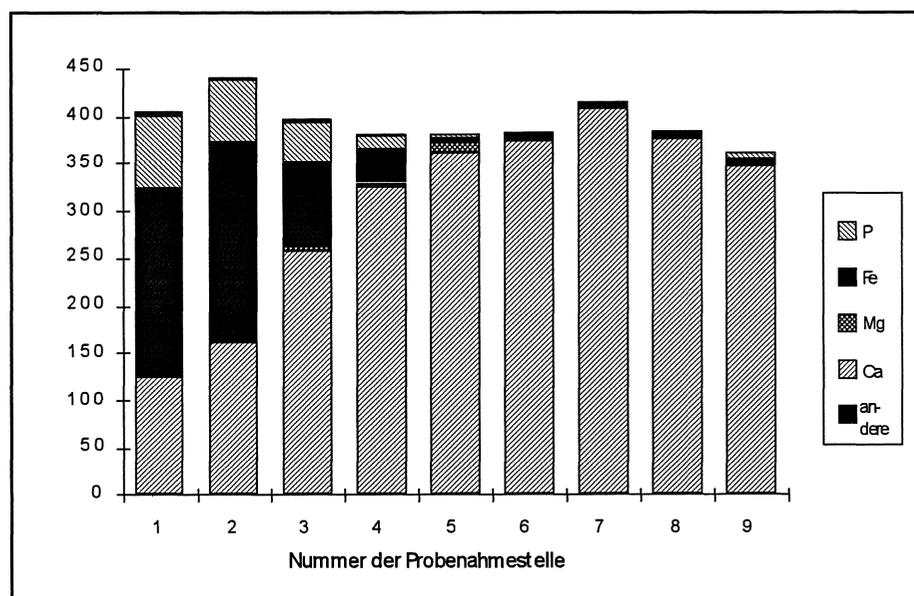
- Beim Überlauf des Faulwassers nach der Nachfaulung wird das noch gelöst vorliegende Eisen infolge des Luftzutritts wieder aufoxidiert und fällt an Rohrwänden und Schwebstoffen als Ferrihydroxid aus.
- Die Änderung des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks beim Austritt aus dem Gas-system von 0.473 atm auf 0.035 atm hat ein starkes Ausgasen der Kohlensäure zur Folge. Das führt zu einem Ansteigen des pH und damit einer starken Calciumcarbonatübersättigung. An der Stelle des Überlaufs nach der Faulung ist daher mit Eisenhydroxid- und Kalkausfällungen zu rechnen.



**Fig. 3.6.:** Schematische Darstellung eines Nachfaulraumes mit dem offenen Überlauf, der einerseits zu einem Ausstrippen der Kohlensäure und andererseits zu einer Oxidation durch Luftzutritt führt.

### Chemische Analysen der Krusten

Die Analysen der Festproben bestätigen die aus chemischer Übersättigung und Prozessführung ermittelten Vermutungen. Die gemittelten Werte lassen folgenden Trend erkennen: Bei den Abläufen der Nachfaulräume fällt das oxidierte Eisen in Form von Ferrihydrit aus. Der Calciumanteil liegt bei ca. 12%. Mit zunehmendem Abstand vom Faulwasser-Überlauf steigt der Calciumanteil bis gegen 40%, was einer reinen Kalkausfällung entspricht.



**Fig. 3.7.:** *Mengenmäßige Anteile der wichtigsten Elemente in den Verkrustungen: Auf der x-Achse sind die Probenahmestellen in steigendem Abstand vom Überlauf des Nachfaulraumes angeordnet, auf der y-Achse sind die mittleren Mengen in mg/g Krustenmaterial angegeben.*

*Die Probenahmestellen:*

- 1 = Putzdeckel NFR
- 2 = Chromstahlplättchen bei Putzdeckel NFR
- 3 = Passstück im Ablauf der NFR
- 4 = Bogenstück zwischen NED 40 und RÜB
- 5 = diverse Armaturen bei Faulwasserpumpe
- 6 = Chromstahlplättchen vor Faulwasserpumpe
- 7 = Faulwasserpumpe
- 8 = Passstück im Faulwasserrücklauf
- 9 = Chromstahlplättchen im Filtratrücklauf aus der Schlammmentwässerung

### Versuche mit elektromagnetischen Feldern

Für die Integration der Versuche in den laufenden Betrieb musste die Versuchsplanung so erfolgen, dass keine Gefährdung der Betriebssicherheit und kein Unterbruch entstehen konnte.

Um einen Einfluss physikalischer Wasserbehandlungsgeräte auf die Verkrustung in einer Kläranlage untersuchen zu können, mussten Bedingungen geschaffen werden, die zumindest eine gewisse Verkrustung erwarten liessen. Der kläranlageninterne Phosphat-Input wurde auf ca. die Hälfte der vorherigen Dosierung verringert, indem die Säuredosie-

rung in den Abflüssen der Nachfaulräume abgestellt wurde. Es liess sich aber nicht verhindern, dass über den Rücklauf aus der Schlammwässerung kurz vor dem NED 40 weiterhin Phosphorsäure in das Faulwasser gelangte (siehe Fig.3.3.). Im Verlauf der 1. Etappe der Untersuchungen (April 95 - April 96) stellte sich heraus, dass zur Erzielung klarerer Resultate in einer 2.Versuchsetappe für wenige Tage zudem auch die Säurezudosierung in der Schlammwässerung abgestellt werden musste. Im Januar - Februar 1996 wurden die Versuchsbedingungen durch zeitweises Abstellen aller Dosierstationen verschärft. So konnte die Dauer der Versuche verkürzt und die Aussagekraft verbessert werden.

Wo die Möglichkeit bestand, d.h. in der Pasteurisierung und im Ablauf der Nachfaulräume, wurden Parallelversuche durchgeführt. Die Versuchsstrecken wurden im voraus gereinigt, um saubere Rohrabschnitte miteinander vergleichen zu können.

Die zentrale Frage, nämlich der Vergleich der Proben, die unter dem Einfluss elektromagnetischer Felder entstanden waren, mit der Referenz ohne Felder wurde auf drei verschiedene Arten gemacht:

- Die Proben wurden da, wo Parallelversuche liefen, mit der Referenz verglichen: Die Befunde aus den Leitungen mit elektromagnetischen Geräten wurden den Proben aus den Referenzleitungen ohne Geräte gegenübergestellt.
- Wo hingegen keine Parallelversuche möglich waren, wurde versucht, einen qualitativen Vergleich zu den Erwartungen der ARA-Betreiber zu ziehen (siehe Tabelle 3.2.)
- In der 2.Versuchsetappe wurde die Verkalkung der einen Faulwasserpumpe nach dem RÜB in zwei direkt aufeinanderfolgenden Experimenten (ohne und mit elektromagnetischen Feldern) miteinander verglichen.

*Tabelle 3.2.: Übersicht über die Versuchsleitungen und die Art der Versuchsauslegung*

	Parallelversuch		kein Parallelversuch möglich	Erwartung der ARA-Betriebsleitung
	Versuchsleitung	Kontrolle		
Pasteurisierung	VB 49	VB 47 VB 48		Aufbau von Kalkseife. In den Wintermonaten bis zu 14-tägige Reinigungsintervalle
Ablauf Nachfaulräume <sup>14</sup>	NFR 33 NFR 35	NFR 34 NFR 36		Krustenaufbau in den Ablaufrohren (gemäss den Beobachtungen aus den Jahren vor 1993)
Sammelleitung nach den NFR			Sammelleitung NFR	keine oder höchstens geringe Verkrustungen, die nicht stören
Leitung zwischen NED 40 und RÜB			Faulwasserleitung	Verkrustung des Bogenstücks (gemäss den Beobachtungen vor 1993)
Faulwasserpumpen nach RÜB	No. 43.05.08	No. 43.05.09 No. 43.05.10		Verkalken der Faulwasserpumpen innert weniger Wochen (gemäss Beobachtungen aus den Jahren 1986-1989 und während eines Versuchs mit einem elektromagnetischen Gerät 1993/94)
Faulwasserleitung in die Vorklärung			Rücklaufleitung von Faulwasser u. Filtrat	Verkalken der Leitung (gemäss den Beobachtungen 1986-89)
Filtratrückleitung aus der Schlamm-entwässerung			Filtratrücklauf aus Schlamm-entwässerung	Verkalken der Filtratrückleitung und/oder der Förderpumpen im Schacht (gemäss den Beobachtungen von 1986-94)

Die Geräte wurden jeweils am Anfang der Leitungen, die die Bildung von Verkrustungen erwarten liessen, montiert (siehe Fig.3.3.). Eine Installation bestand aus der Montage mehrerer Spulen, die um die Leitung gewickelt wurden, und einem elektrophysikalischen Gerät.

Die Kontrollen, Beobachtungen und Probenahmen fanden am Anfang in kurzen, später in grösseren Intervallen statt. Um den Zustand der Leitungen kontrollieren zu können, müssen Putzdeckel, T-Stücke oder Passstücke vorhanden sein, die geöffnet resp. ausgebaut werden können. Auch Handklappen und pneumatische

<sup>14</sup> Die Abläufe der insgesamt vier Nachfaulräume münden in eine Sammelleitung, in der sich die Rohrinhalte vermischen.

Schieber wurden zur Sicherheit kontrolliert. Zur Kontrolle der Faulwasserpumpe musste jeweils das Pumpengehäuse geöffnet werden.

Die Beobachtungskriterien wurden folgendermassen definiert:

- Bilden sich Ablagerungen?
- Was ist die chemische Zusammensetzung der Ablagerungen ?
- Wie ist die Struktur der Ablagerungen: Amorph oder kristallin?
- Welche Schichtdicke hat sich aufgebaut ?

Der Zustand, wie er sich beim Öffnen der Rohre bot, wurde in kurzen schriftlichen Protokollen, Filzstiftmarkierungen und, wenn es sinnvoll erschien, mit Polaroidfotos festgehalten. Feste Proben wurden zur Analyse und ev. Schichtdickenbestimmung entnommen.

In der zweiten Versuchsetappe wurde als weiteres Beobachtungsinstrument ein Set aus drei verschweissten Chromstahlplättchen<sup>15</sup> ins Innere der Rohre gehängt und leitend verbunden. Die Plättchen waren so den gleichen Bedingungen wie die Rohrwand ausgesetzt und konnten später im Labor untersucht werden.

### Versuchsergebnisse

Da die Säuredosierung in den Abflussrohren der Nachfaulräume abgestellt und eine Vermischung des Faulwassers mit dem angesäuerten Filtrat aus der Schlammmentwässerung erst beim Zulauf in den RÜB stattfand, war zu erwarten, dass sich durch das Wegfallen der Säure zumindest in den Abflussrohren, an denen keine elektromagnetischen Felder angelegt waren, Ablagerungen bilden würden. In den verschiedenen beprobten Abschnitten zeigte sich aber im Verlauf eines Jahres nur ein unwesentlicher Aufbau von Kalkablagerungen. In keinem der parallel geführten Abschnitte, wo sich die Beobachtungen (mit und ohne Felder) direkt vergleichen lassen, zeigte sich ein signifikanter Einfluss auf die Bildung von Ablagerungen durch die Anwendung der zum Einsatz gekommenen elektromagnetischen Felder. Bei allen vier Abflussrohren (2 Kontrollen, 2 unter Feldeinfluss) hatte sich langsam eine folienartige, dunkle Schicht aufgebaut. Die Analyse dieser Ablagerungen ergab eine amorphe Struktur aus Eisen (mit Ca, P und einer Spur K): Es handelte sich um Ferrihydrit mit chemisorbierten Phosphationen.

Die zeitliche Streuung der chemischen Zusammensetzung war viel grösser als zwischen der jeweiligen Proben aus Versuch und Referenz: Signifikante Unterschiede liessen sich aus diesen Untersuchungen keine beobachten.

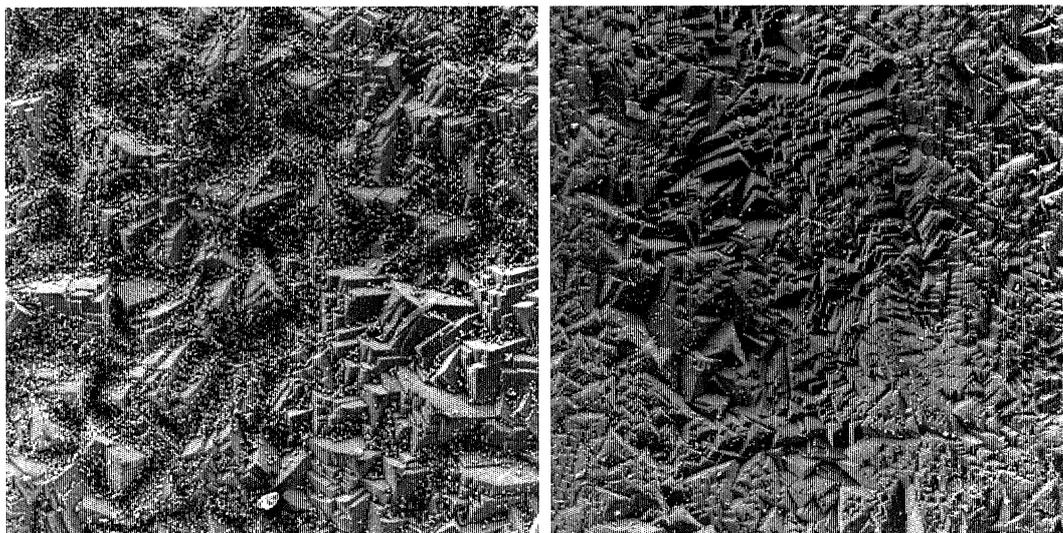
---

<sup>15</sup> Das verwendete Material war der gleiche Chromstahl (1.43.01) wie die Rohre. Die Abmessungen der Plättchen betragen 3 x 6 cm und die Blechstärke 0.3 mm. Vor dem Einsetzen wurden die Plättchen entfettet und gereinigt.

Die Versuche in der 2. Versuchsetappe wurden unter wesentlich härteren Bedingungen durchgeführt: Durch das Abstellen der Säure in der Schlammwässerung wurde ein schnelles Verkalken der Faulwasserpumpe erzwungen. Verglichen wurden die Ablagerungen, die sich innert weniger Tage in der Pumpe 43.05.08 ohne und dann gleich anschliessend mit Einfluss elektromagnetischer Felder gebildet hatten: Ohne Säure und ohne elektromagnetische Felder verkalkte die Pumpe innert 4 Tagen, wurden aber die elektromagnetischen Geräte an den Leitungen eingeschaltet, dauerte es 10 Tage.

Die an dieser Stelle gebildeten Ablagerungen bestehen aus Calcit mit Spuren von Eisen.

Interessant und möglicherweise typisch war der Unterschied in den Elektronenmikroskopaufnahmen: Die Aufnahmen der Ablagerungen aus der Etappe, als die Säuredosierung ganz abgestellt war, zeigen die Struktur verwachsener Calcitkuben, auf welchen eine grosse Anzahl scheinbar neu entstandener Kristalle aufwuchs. Diese Kristallgebilde bestehen laut Röntgenbefund und Morphologie ebenfalls aus Calcit. Unter dem Einfluss der elektromagnetischen Felder zeigte sich im Elektronenmikroskop zwar prinzipiell die gleiche Grundstruktur verwachsener Calcitkuben mit neu nukleierten Kristalliten, aber die Anzahl dieser neuen Kristalle ist unter Feldeinfluss vergleichsweise viel geringer.



**Fig. 3.8.:** *Elektronenmikroskopaufnahmen (200-fache Vergrösserung): Links der Belag, der sich nach Abstellen der Phosphorsäure innert 4 Tagen, rechts bei eingeschaltetem Gerät (ohne Säure) innert 10 Tagen im Innern der Faulwasserpumpe aufgebaut hatte. Über der gleichen Gitterstruktur liegen neu entstandene Kristalle.*

Ein Vergleich der Schichtdicken war wegen des sehr langsamen Aufbaus und der schlechten Zugänglichkeit in den Rohren nur in den seltensten Fällen möglich. Messungen an den Chromstahlplättchen lassen

(an den zugehörigen Stellen, unter den dortigen Bedingungen) auf jährliche Zuwachsraten von maximal 2 mm/Jahr schliessen.

### **Diskussion und Folgerungen**

Die Beobachtung, dass die Kläranlage bei einer halbierten Säuredosierung selbst im Verlauf eines Jahres nur unwesentlich Kalk aufbaute, war unerwartet und widersprach den Erwartungen der ARA-Betreiber. Sie hat kaum etwas mit den untersuchten Geräten zu tun. Hingegen drängt sich die Vermutung auf, dass die Dosierung der Phosphorsäure um einiges höher ist, als notwendig wäre, um die Verkrustungen im Faulwasserbereich zu verhindern und sich reduzieren liesse.

Eine wichtige Erkenntnis ist auch, dass der Referenzzustand erst verlässlich erarbeitet werden muss. Er war in dieser Kläranlage nicht zuverlässig bekannt und unter diesen Umständen erwies sich das Verkrustungsproblem dieser Anlage im Nachhinein für Versuche als zu wenig gut definiert.

In der 2. Versuchsetappe konnte beobachtet werden, wie ohne Säure und ohne elektromagnetische Felder die Faulwasserpumpe in 4 Tagen, mit eingeschalteten elektromagnetischen Geräten innert 10 Tagen verkalkte. Diese kleine Verbesserung ist in dieser Form für den Normalbetrieb der Kläranlage sicher nicht geeignet, aber insofern von Bedeutung, als sie Anlass zur Hoffnung gab, dass sich unter Umständen mit geeigneteren Geräten ein besseres Resultat erzielen liesse. Der Erfolg den späteren Versuchen in der Kläranlage Worblental (siehe unter 3.1.2) gab dieser Hoffnung Recht.

Aus Überlegungen zur Lösungsschemie lässt sich auch die Folgerung ziehen, dass gewisse Ablagerungsprobleme durch bauliche Massnahmen verhindert werden könnten: Der offene Überlauf nach der Faulung muss als Konstruktionsfehler bezeichnet werden. Durch Verhinderung des Luftzutritts liesse sich das Ausgasen und die Oxidation bis in den nächsten Stapelbehälter hinauszögern. Es wäre sogar denkbar, diesen Behälter grobblasig zu belüften, um das Ausstrippen zu fördern. Nach dem Entspannen sollte das Faulwasser möglichst nicht mehr über Pumpen befördert werden, um lokale Druckunterschiede zu vermeiden.

### 3.1.2 Kläranlage Worblental

Nach den Erfahrungen in der ARA Werdhölzli wurde eine zweite Kläranlage als Fallbeispiel einbezogen. Im Gegensatz zur Kläranlage Werdhölzli wurde für die Kläranlage Worblental ein spezielles, einstellbares Gerät entwickelt und gebaut.

Die Kläranlage Worblental reinigt das Abwasser von 150'000 EWG (Industrieabwasser: 56%).

Die Schlammbehandlung der ARA Worblental besteht aus einer zwei-stufigen Faulung und einem Stapelbehälter. Die Durchmischung des Faulschlammes und Schlammwärmerung erfolgt über eine externe Zirkulationsleitung mit Wärmetauschern. Der Frischschlamm wird chargenweise in diese Zirkulationsleitung zugemischt und zusammen mit dem Faulschlamm erwärmt (Fig.3.9.).

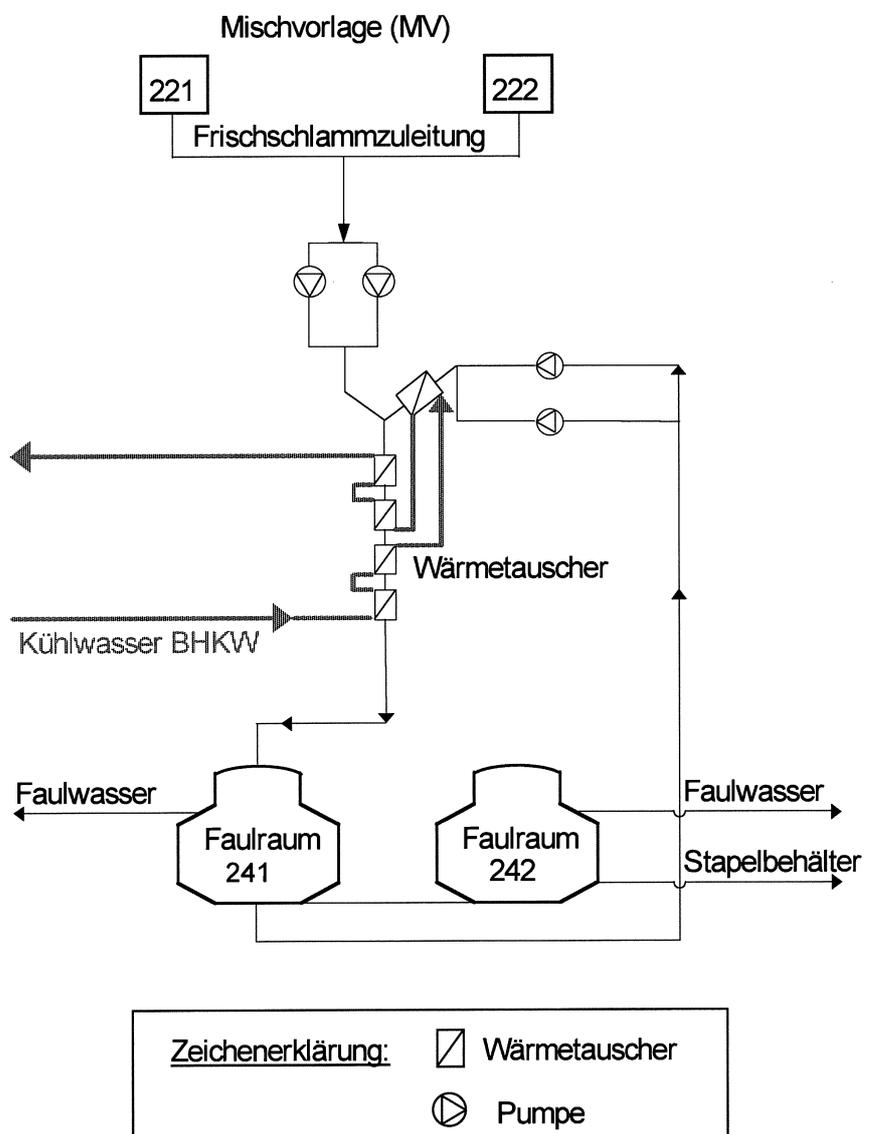


Fig. 3.9.: Die Schlammwärmerung in der ARA Worblental

### Probleme in der Schlammwärmung

Seit Jahren baute sich an den Innenwänden der Wärmetauscherrohre eine mineralische Schicht auf, die eine schlechte Wärmeübertragung zur Folge hatte. Die 5 Wärmetauscher in der ARA Worblental hatten im Winter nicht mehr ausgereicht, die Faultemperatur (und damit die Bedingungen für die Gasproduktion) zu halten. Die Folge waren periodische Reinigungen der Wärmetauscher im Abstand von 6-8 Wochen durch Aushämmern des Rohrbelags. Die mechanische Beanspruchung bei der Rohrreinigung führte mit der Zeit zu einer zunehmenden Unfallgefahr durch Materialermüdung. Auf eine chemische Rohrreinigung der Wärmetauscher wurde wegen der Gefahr von Korrosion und der möglichen Freisetzung von Wasserstoff verzichtet.

### Chemische Zusammensetzung der Ablagerungen und des Faulwassers

Die Ablagerungen bestehen aus Vivianit, verunreinigt mit organischen Anteilen. Vivianit ist ein Eisen(II)phosphat mit einem Kristallwasseranteil:  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ .

Es wurde versucht, die chemischen Gleichgewichte resp. herrschenden Übersättigungen zu berechnen. Die Konzentrationen der gelösten Substanzen im Frisch- und Faulschlamm waren nicht bekannt. Für eine Messung mussten wegen der Schlammflocken Dialysezellen eingesetzt werden: Deren Inhalt kommt nach einer Expositionszeit von einigen Tagen mit der Umgebung in Gleichgewicht und kann beprobt werden.

**Tabelle 3.3.:** Datensatz (Messungen resp. Abschätzungen) aus der ARA Worblental

		Mischvorlagen	Faulturm	Wärmetauscher
Temperatur	[°C]	15	36	40
pH		6.2	6.9	6.9
Alkalinität geschätzt	[mM]	5	50	50
Fe <sup>2+</sup> gelöst	[mM]	0.6	0.01	0.01
P anorganisch	[mM]	0.05	0.01	0.01
Ca <sup>2+</sup> gelöst	[mM]	6.67	0.78	0.78

Die Eisenionen stammen grossenteils (zu 80 %) aus der Fällmitteldosierung: Das Phosphat wird mit Eisen gefällt und es entstehen Eisenhydroxophosphat-Komplexe. Im Faulturm wird das Eisen reduziert. Ein Teil davon reagiert mit Sulfid (aus dem anaeroben Abbau schwefelhaltiger Proteine) zu FeS. Das überschüssige Fe(II) reagiert zu weiteren Eisenphosphatverbindungen wie Vivianit.

Die Alkalinität wurde aus der Konzentration des Ammoniums auf ca.50 mM geschätzt.

### Gleichgewichte und Übersättigungen

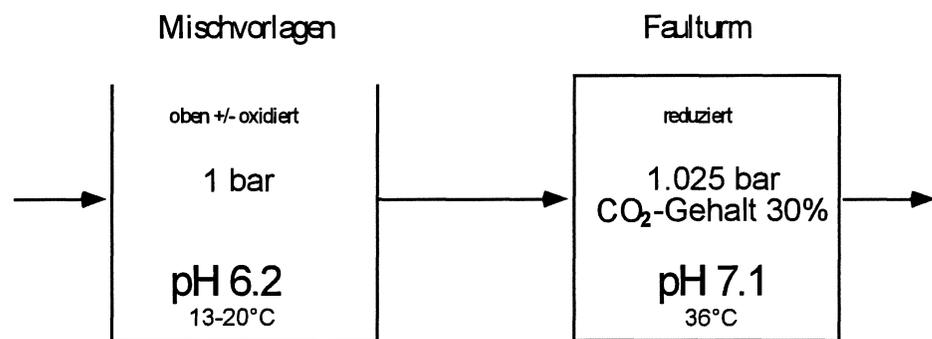
Der Faulturm kann als Gleichgewichts-Reaktor angesehen werden, dessen zeitliche Veränderungen vernachlässigbar klein sind ( $\frac{dM}{dt} = 0$ ).

Die Massenbilanz ergibt sich aus den Ein- und Austrägen ( $Q_{in}$  und  $Q_{out}$ ) sowie dem biologischen Abbau und allfälliger Akkumulation (z.B. Ablagerungen):

$$\frac{dM}{dt} = Q_{in} \cdot c_{in} - Q_{out} \cdot c_{out} + V \cdot r$$

(V = Volumen; r = Umsatzrate; c = Konzentration).

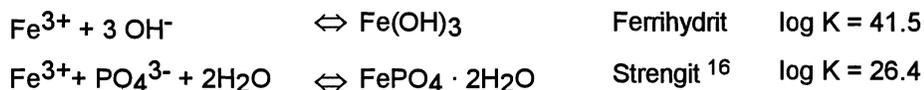
Auf dem Weg von den Mischvorlagen in den Faulturm steigt der pH-Wert, die Temperatur, der CO<sub>2</sub>-Partialdruck und der Ammoniumgehalt an. Durch diese Änderungen der Bedingungen verschieben sich die chemischen Gleichgewichte und es ist im Faulturm mit zunehmender Übersättigung und demzufolge mit Ausfällungen zu rechnen.



**Fig. 3.10.:** Die physikalischen und chemischen Bedingungen in den Mischvorlagen (offenes System) und im Faulturm (geschlossenes Gassystem). Die pH-Werte beziehen sich auf die Proben aus den Dialysezellen. Möglicherweise hat eine gewisse Ausgasung beim Beprobieren stattgefunden. Deshalb müssen die Werte tendenziell nach unten korrigiert werden.

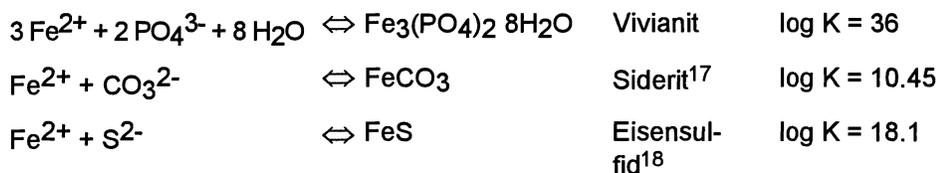
Verschiedene Fällungsreaktionen treten konkurrenzierend nebeneinander auf. Um abzuschätzen, welche der mineralischen Formen unter den gegebenen Bedingungen als erste ausfällt, müssen die einzelnen Gleichgewichte unter den herrschenden Bedingungen berechnet werden.

Unter aeroben Bedingungen (in den Mischvorlagen) sind folgende Gleichgewichte von Bedeutung:

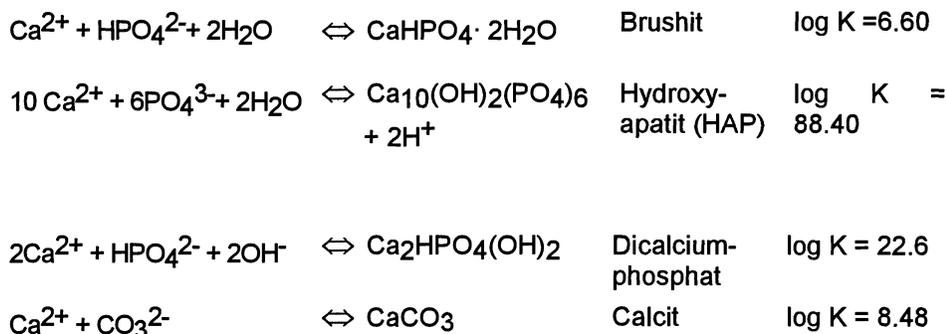


Neben diesen Löslichkeitsgleichgewichten spielen verschiedene chemischer Sorptionsprozesse eine wichtige Rolle, indem sie zu tieferen Gleichgewichtskonzentrationen - als sie durch die mineralischen Gleichgewichte gegeben sind - führen (Siegrist und Boller Vorlesungsunterlagen ETH).

Unter anaeroben Bedingungen (im Faultrum und der Zirkulationsleitung) überwiegen folgende chemische Gleichgewichte:



Neben dem Calciumcarbonatgleichgewicht spielen Calciumphosphatgleichgewichte eine wichtige Rolle in der Regulierung der freien Ionen.



Die Angaben für die Löslichkeitsprodukte<sup>19</sup> gelten für 25°C und Ionenstärke = 0. Unter erhöhten Temperaturen und Ionenstärken müssen entsprechende Korrekturen vorgenommen werden.

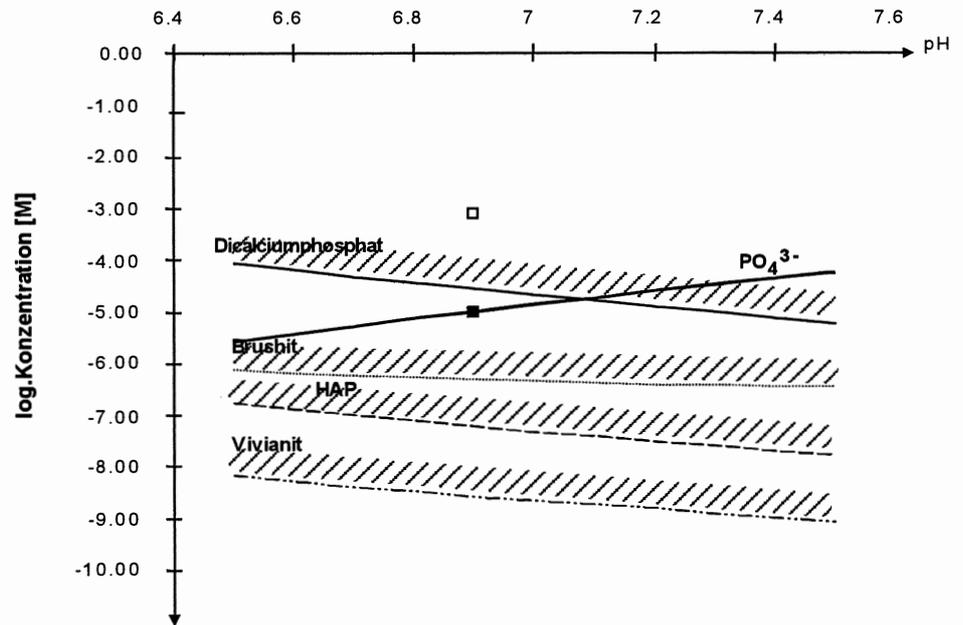
---

<sup>16</sup> Stellvertretend für die vorkommenden Eisen(III)phosphate wurden die Daten von Strengit als Modellsubstanz benutzt.

<sup>17</sup> Wert für frischgefälltes Präzipitat

<sup>18</sup> Stellvertretend für die vorkommenden Eisensulfide wurden die Daten von Troilit als Modellsubstanz benutzt.

<sup>19</sup> Aus: Martell und Smith (1982), Nordstrom et al. (1990), Lindsay (1979), Max Maurer 1997), Nancollas et al. (1979).



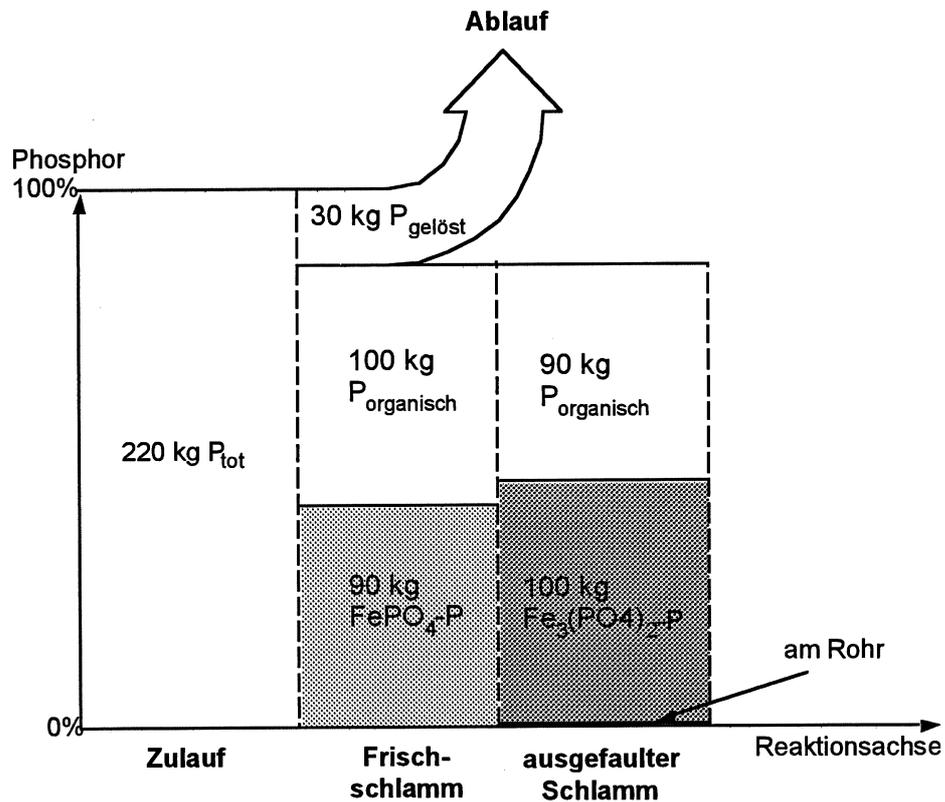
**Fig. 3.11.:** Die Löslichkeit verschiedener Phosphatmineralien für die Verhältnisse im Faulturm der ARA Worblental (alle Konstanten sind Temperatur- und Ionenstärkekorrigiert). Ausgehend von der gemessenen Phosphatkonzentration und dem pH wurde die totale Phosphatkonzentration berechnet und als konstant angenommen:

$$P_{tot\ gel} = PO_4^{3-} + HPO_4^{2-} + H_2PO_4^-$$

Die gemessenen Werte der freien Calcium- und Eisenionen sind als Punkte eingezeichnet.

■  $Fe^{2+}$  gelöst □  $Ca^{2+}$  gelöst

Durch den Wechsel der Bedingungen erfolgt eine chemische Umschichtung, die vor allem die Eisenphosphatmineralien betrifft. Die Eisenionen, die als Fe(II) in den belüfteten Sandfang zudosiert werden, oxidieren in den Belebtschlammbecken zu Fe(III). In der Frischschlammleitung, den Mischvorlagen und im Faulturm herrschen zunehmend anaerobe Bedingungen. Damit werden Fe(III)-verbindungen oberflächlich reduziert und rückgelöst. Das im Faulturm freigesetzte, vorübergehend gelöst vorliegende Eisen(II) verbindet sich zu Eisensulfid und Vivianit, und eine Restfraktion von ca. 0.8 mg Fe/l verbleibt in Lösung.



**Fig. 3.12.** Verteilung des Phosphors in den verschiedenen Abschnitten der Kläranlage. Zur Hauptsache liegt das Phosphat gebunden vor, d.h. organisch im Schlamm oder chemisch gefällt (hellgrau). In den zunehmend anaeroben Bedingungen wird das chemisch gebundene Eisen(III) reduziert. Zudem wird ein Teil des organisch gebundenen Phosphats in der Faulung abgebaut. Es entsteht neu Vivianit (dunkelgrau).  
Der Anteil des gelösten Phosphors liegt im Promillebereich, der Anteil des an den Wärmetauscherrohren auskristallisierenden Vivianits ebenfalls.

Durch das im Proteinabbau freigesetzte Ammonium steigt die Konzentration des gelösten Bicarbonats und Carbonats im Faulprozess um mehr als eine Größenordnung an. Ebenfalls dadurch bedingt ist die pH-Erhöhung um mindestens 0.7 pH-Einheiten, die die Gleichgewichte zugunsten der deprotonierten Spezies (Carbonat und Phosphat) ansteigen lässt.

Die Vivianitlöslichkeit ist bei 40°C am grössten. Die Ausfällungen in den Wärmetauschern sind daher nicht primär durch die Temperatur, sondern durch die pH-Verschiebung bedingt.

### **Versuch mit elektromagnetischer Wasserbehandlung**

Im Herbst 1996 begann man zu untersuchen, ob sich die Bildung von Vivianitablagerungen mit geeigneten elektromagnetischen Feldern beeinflussen lässt. Im November und Dezember 1996 wurden auf den entsprechenden Leitungen Spulen angebracht, über die bestimmte elektromagnetische Felder erzeugt wurden. Dieses Gerät erlaubt, im Gegensatz zu den Geräten, die in der Kläranlage Werdhölzli zum Einsatz gekommen waren, die Parameter der erzeugten Felder einzeln einzustellen.

Um den Einfluss des Gerätes zu untersuchen, wurden die zwei am stärksten gefährdeten Wärmetauscherrohre mehrmals geöffnet, begutachtet und gegebenenfalls Fotos gemacht.

Waren Ablagerungen vorhanden, wurden Festproben genommen. Allfällige Ablagerungen wurden anschliessend von den Klärwärtern in der üblichen Weise bis auf das Metall abgeschlagen.

### **Resultate**

Nachdem das Gerät seit November in Betrieb war, wurde im Januar die Rohre zum ersten Mal geöffnet. Es fand sich eine dünne, pergamentartige dunkle Schicht, die später speziell untersucht wurde, da es zuerst nicht klar war, ob sich am Schichtaufbau eventuell eine Änderung ergeben hatte, was sich aber nicht bestätigte. Die Wärmetauscher waren zuletzt im Oktober gereinigt worden, und das Gerät einen Monat später installiert. Die Schicht, die sich innerhalb eines Monats hatte aufbauen können, war demnach auch nicht messbar abgebaut worden. Die Wärmetauscher wurden daraufhin nochmals gereinigt und an den Einstellungen des Gerätes wurde eine Änderung vorgenommen. Von da an zeigten die weiteren Rohröffnungen vom 6.3., 5.5., 9.9.1997 und 11.2.1998 nur noch blanke Rohre, ohne die geringsten Spuren von Ablagerungen.

Das bedeutet, dass diese Wärmetauscherrohre, durch die täglich ca. 6000 m<sup>3</sup> übersättigter Faulschlamm gepumpt wird, durch die Anwendung geeigneter elektromagnetischer Felder von Verkrustungen gänzlich freigehalten werden können.

### Diskussion und Folgerung

Am Fallbeispiel der Kläranlage Worblental liess sich zeigen, dass sich eine Verkrustung von Wärmetauscherflächen mit Hilfe geeigneter elektromagnetischer Felder vollständig verhindern lässt.

Aus bilanzmässigen Rechnungen wird deutlich, dass das Eisen, das am Rohr ausfällt und Vivianit bildet, nur einen ganz geringen Anteil der Eisenausfällungen im Faulschlamm ausmacht (siehe Fig. 3.12.). Selbst geringste Mengen mineralischer Ablagerungen an Wärmetauscherflächen schränken wegen ihrer Wärmeisolationseigenschaften die Wärmeübertragung drastisch ein. Wegen der Verkrustungen hatten die 5 Wärmetauscher in der ARA Worblental nicht mehr ausgereicht, um die Faultemperatur halten zu können. Durch den Einsatz geeigneter elektromagnetischer Felder konnte in diesem Fall eine umweltfreundliche, nachhaltige und kostengünstige Alternative zu den häufigen, gefährlichen und materialschädigenden Unterhaltsarbeiten gefunden werden.

Eine Leitungsführung, die den Frischschlamm direkt in den Faulturm zugeht, hätte in der Zirkulationsleitung wesentlich kleinere Übersättigungen und vermutlich weniger Ausfällungen zur Folge.

## 3.2 Verkalkungsprobleme in Trinkwasseranlagen

### Die Entstehung der Wasserhärte

Die Figur 3.13. stellt schematisch die Entstehung harten Trinkwassers dar. Das Wasser, das als Niederschlag auf die Erde fällt, enthält erst jene Stoffe, die in der Atmosphäre enthalten und wasserlöslich sind (Gase, Säuren, Schwebeteilchen). Bei der Infiltration in den Boden gelangt das Wasser zuerst in die Humusschicht. Dort wird es mit Kohlensäure, die aus dem mikrobiellen Abbau stammt, angereichert. Im Boden steht das Wasser somit unter einem erhöhten CO<sub>2</sub>-Partialdruck. In grösseren Tiefen führt die im Wasser gelöste Kohlensäure zu einer Auflösung kalkhaltiger Bodenschichten. Die mineralischen Bestandteile aus der Kalkauflösung bilden die sogenannte "Wasserhärte".

Wenn das Wasser gefasst wird, werden die physikalischen Bedingungen (Druck, Temperatur) verändert. Jede Veränderung der physikalischen (wie auch der chemischen) Bedingungen hat eine Auswirkung auf das chemische Gleichgewicht (Fig.3.14.).

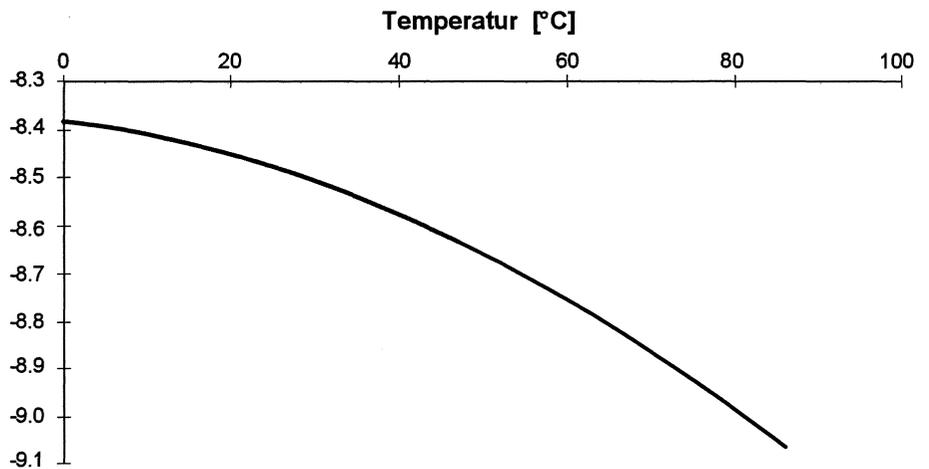


Fig. 3.13.: Die Calcitlöslichkeit zitiert nach Nordstrom et al. (1990)

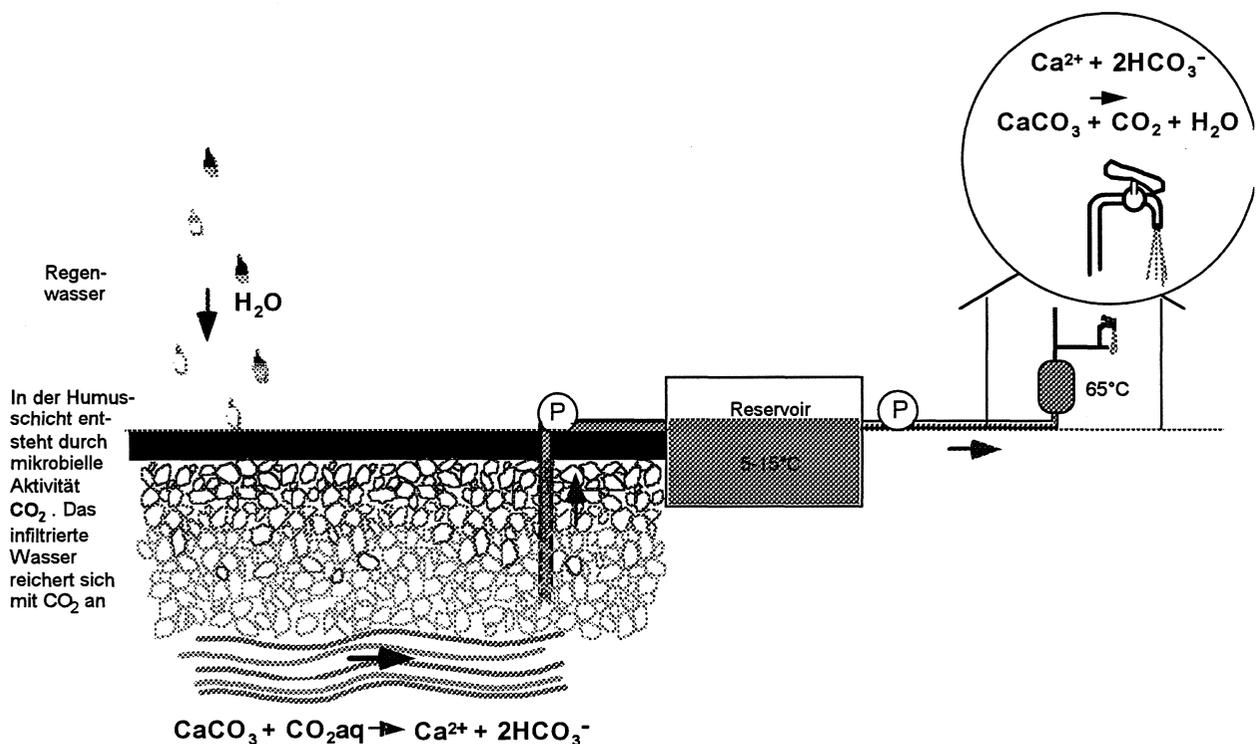


Fig.3.14.: Ausschnitt aus dem Wasserkreislauf: Die Entstehung harten Trinkwassers. Der Niederschlag reichert sich im humushaltigen Oberboden mit Kohlensäure an, die aus dem mikrobiellen Abbau freigesetzt wird. In tieferen Schichten werden durch die Kohlensäure kalkhaltige Mineralien aufgelöst. Mit dem Fassen des Wassers verändern sich Druck, Temperatur und ev. Konzentrationen und führen je nach Bedingungen zu Ausfällungsreaktionen.

### Das Entstehen von Ausfällungen

Beim Übergang vom Trinkwassernetz zu offenen Systemen (Wasserhahn, Duschebrause) oder halboffenen Systemen (Boiler, Waschmaschine) finden verschiedene Reaktionen statt: Das Wasser kommt in Kontakt mit der Luftatmosphäre und dem Luftdruck. Ein Teil der gelösten Kohlensäure entweicht und das chemische Gleichgewicht verschiebt sich in Richtung eines Ausfällens der gelösten mineralischen Bestandteile (des Kalkes).



Bei einer Temperaturänderung verändern sich die Gleichgewichtskonstanten (Henrykonstante, Löslichkeitskonstanten), was ebenfalls eine Verschiebung des chemischen Gleichgewicht zur Folge hat. Im Fall von Kalk führt eine Erhöhung der Temperatur zu einer geringeren Löslichkeit (Fig. 3.13.).



Ein weiterer Prozess, der zu einer Ausfällung beim Verbraucher führen kann, ist beispielsweise eine Aufkonzentrierung der im Wasser gelösten Ionen durch Verdunstung. Es sind somit eine ganze Reihe verschiedener Faktoren, die bestimmen, wann resp. wo im Trinkwassernetz übersättigte Bedingungen herrschen und wie gross die Härte des Trinkwassers beim Verbraucher ist. Dazu gehören die Bodenminerale, die Aufenthaltszeiten des Wassers im Boden, sowie die bei der Wasseraufbereitung und -nutzung herrschenden Bedingungen.

### Die Aufbereitung von hartem Trinkwasser

Die mineralischen Ausfällungen, der sogenannte „Kesselstein“, führen zu Energieverlusten, Überhitzung und Funktionsstörungen. Aus diesen Gründen wird hartes Wasser mit Hilfe verschiedener Methoden aufbereitet. Die meisten der zum Einsatz kommenden Verfahren führen zu einer Erniedrigung der Konzentration der gelösten, steinbildenden Stoffe und damit der relativen Übersättigung. Es gibt auch Verfahren, die die Kristallbildung direkt beeinflussen. Dazu gehören neben der Dosierung von chemischen Inhibitoren auch elektromagnetische Felder.

		Nachteile	Anwendungen
I.	Ionentauscher (als Voll- oder Teilentsalzung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufsalzung des Abwassers durch Regeneriersalze</li> <li>- Änderung der Trinkwasserzusammensetzung</li> <li>- bakterielle Gefährdung</li> <li>- erhöhte Korrosivität des Wassers erfordert Phosphatnachdosierung</li> </ul>	Labor (Trinkwasser)
	Dosierstationen Säure	<ul style="list-style-type: none"> <li>- braucht Neutralisation</li> <li>- zusätzlicher Schlammanfall</li> <li>- Nährstoffeintrag</li> </ul>	ARA Industrie
	Inhibitoren (z.B. Calgon)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewässerbelastung (gesetzliche Grenzwerte)</li> <li>- stört u.U. Korrosionsinhibitoren</li> </ul>	ARA Industrie
	Komplexbildner Fällmittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewässerbelastung (gesetzliche Grenzwerte)</li> <li>- zusätzlicher Schlamm</li> </ul>	Industrie ARA, Industrie
II.	Destillation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoher Energiebedarf</li> </ul>	Labor
	Membrantechniken: Umkehrosmose Ultrafiltration	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoher Energiebedarf</li> <li>- mengenmässig limitiert</li> <li>- erzeugt viel mineralhaltiges Abwasser</li> <li>- Veränderung der Trinkwasserzusammensetzung</li> <li>- Membranfouling, Membranscaling</li> <li>- erhöhte Korrosivität des Wassers</li> </ul>	Labor Trinkwasser Meerwasserentsalzung
	Nanofiltration	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoher Energiebedarf</li> <li>- Veränderung der Trinkwasserzusammensetzung</li> <li>- erzeugt viel mineralhaltiges Abwasser</li> </ul>	Trinkwasser Labor
	elektrische/magnetische Felder	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wirkung fallweise verschieden und wenig verstanden</li> </ul>	Trinkwasser, (ARA)

**Tabelle 3.4.:** Massnahmen in der Praxis zur Wasserenthärtung und im Umgang mit hartem Wasser. Unter I. sind chemische, unter II. physikalische Methoden aufgelistet

Der grosse Nachteil der chemischen Verfahren liegt in den Kosten und darin, dass dadurch eine zusätzliche Gewässerbelastung erfolgt. Die gängigen physikalischen Verfahren andererseits weisen i.a. einen hohen Energiebedarf auf.

Die Wasserbehandlungsmethoden via magnetische und elektromagnetische Felder sind wenig erforscht. Der Einsatz entsprechender kommerzieller Geräte führt nur in einem Teil der Fälle zu befriedigenden Resultaten und ist vorbelastet durch unseriöse Behauptungen und Versprechungen der Anbieter. Hier besteht ein grosser Forschungsbedarf zur Bestimmung des Potentials dieser Methoden sowie der Aufklärung der Wirkungsmechanismen und technischen Optimierung. Der grosse Vorteil dieser Methoden liegt darin, dass keine Chemikalien zum Einsatz kommen und gleichzeitig der Energiebedarf gering ist. Es bietet sich hier somit ein Ansatz, eine Entwicklung in Richtung nachhaltiger, kostengünstiger Wasseraufbereitung zu realisieren.

### 3.2.1 Trinkwasserversorgung mit hartem Wasser

Im Rahmen der Dissertation wurde neben den Kläranlageuntersuchungen eine Fallstudie über den Einsatz elektromagnetischer Felder in einer Trinkwasserversorgung durchgeführt. Der Trinkwasserbereich und die darin stattfindenden Ablagerungen stellen chemisch ein weit weniger komplexes System als Kläranlagen dar.

Bei der untersuchten Trinkwasser-Fallstudie handelt es sich um eine vom kommunalen Trinkwassernetz unabhängige Trinkwasserversorgung, die durch drei Fassungen mit einem äusserst harten Wasser gespeisen wird.

**Tabelle 3.5.:** *Mittlere Trinkwasserzusammensetzung*

pH	7.8 (- 8.4)
Leitfähigkeit	1000 - 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Alkalinität	4 mM (-6 mM)
Ca <sup>2+</sup>	2.6 mM
Mg <sup>2+</sup>	1.2 mM
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ca. 1.8 mM (geschätzt)

Das harte Trinkwasser führt zu grossen Kalkproblemen, die an verschiedenen Orten in der Anlage, die das Trinkwasser nutzt, regelmässige und aufwendige Unterhaltsarbeiten erforderten. Am intensivsten waren die Kalkprobleme in der Kühlung der Kältekompressoren, in der Küche (Geschirr-, Gläser- und Chromstahlreinigung) und an den Heizstäben dreier Boiler. Da konventionelle Sanierungsvorschläge (Zudosierung von Härtestabilisatoren ins Rohwasser, Gegenosmoseanlage für die Luftbefeuchter und das Trinkwasser, Enthärtungsanlagen für die Küche, oder aber Innenbeschichtung der Rohre) kostspielig und bei alternierendem Betrieb möglicherweise in bakteriologischer resp. korrosiver Hinsicht nicht unproblematisch sind, wurde ein Versuch mit elektromagnetischen Feldern unternommen.

### **Probleme in der Klimatisierung**

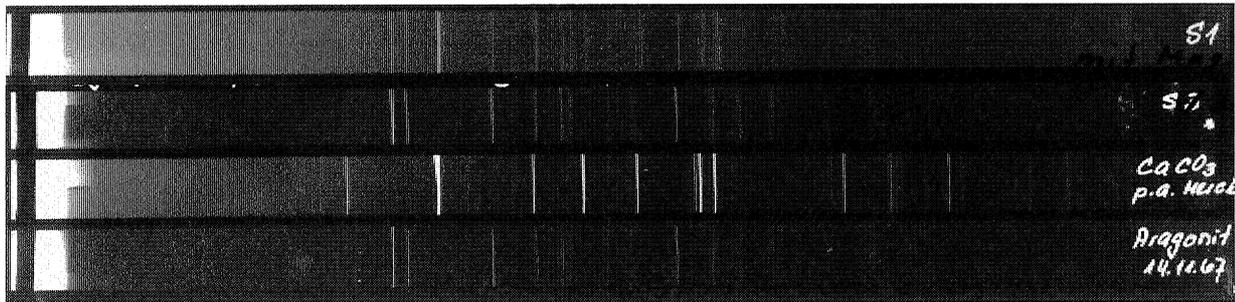
In der Kühlung der Kältekompressoren wird das Kühlwasser von ca. 10° auf 28-30°C erhitzt. Das führt zu einem 1.26-fachen Anstieg der CaCO<sub>3</sub>-Übersättigung (Fig. 3.13.).

### **Versuch mit elektromagnetischen Feldern**

Die Untersuchung der Kalkbildung in den Kühlrohren der Kältekompressoren wurde als ein Vergleich "vorher/nachher" durchgeführt: Zu Versuchsbeginn wurde ein Rohrstück, das zwei Jahre in der Leitung eingebaut gewesen war, herausgesägt und durch ein entsprechendes neues Rohr (gleiches Material aus gleicher Lieferung) ersetzt. Dieses neue Rohrstück wurde ein Jahr später wiederum herausgesägt. Somit ergab sich ein Vergleich identischer Rohre am gleichen Ort über einen Beobachtungszeitraum von 3 Jahren. Am Betrieb wurde in der Zeit, als die Rohre montiert waren, nichts geändert. Die Betriebstemperatur an der Stelle der herausgesägten Versuchsrohre liegt zwischen 28 und 30°C.

### **Resultate**

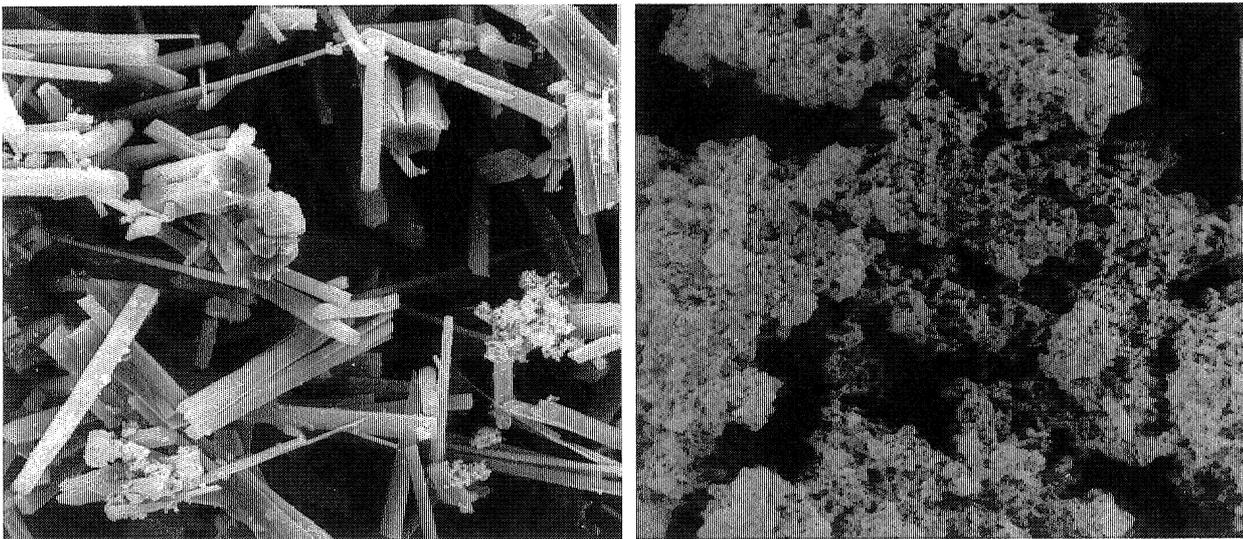
1. Optischer Befund: Auffallend ist der Unterschied in der Dicke der gebildeten Schicht. Unter der Annahme, dass die Dichte der Krusten gleich ist, hat sich unter Feldeinfluss in dergleichen Zeit sechs mal weniger Material abgelagert als unter Referenzbedingungen.
2. Chemische Zusammensetzung: Die Ablagerung besteht in beiden Fällen zur Hauptsache aus Calciumcarbonat. Im Gegensatz zur totalen ausgefallenen Calciummenge scheint der Eisengehalt durch die Felder nicht beeinflusst worden zu sein.
3. Pulverdifraktometrie: Die Untersuchungen der in den Kühlrohren gebildeten Ablagerungen ergab, dass die mineralische Zusammensetzung im Vergleich zu der Referenz anders ist: Wo vor Installation der elektromagnetischen Geräte reiner Aragonit gefunden worden war, fanden sich in der Röntgenanalyse der unter Versuchsbedingungen entstandenen Ablagerungen ca. gleich grosse Anteile an Calcit und Aragonit.



**Fig. 3.15.:** Pulverdiffraktogramm der Ablagerungen aus der Probe, die unter Feldeinfluss entstanden war (oberste Abbildung), der Referenzprobe ohne Feldeinfluss (2. Abbildung) sowie Vergleichsaufnahmen mit reinem Calcit und reinem Aragonit. Die Referenzprobe besteht aus reinem Aragonit (keine Calcitlinien). Die Probe aus dem Versuch besteht ca. hälftig aus Calcit und Aragonit.

4. REM - Aufnahmen:

Die Rasterelektronenmikroskopaufnahmen zeigen im Fall der Referenzprobe schöne Aragonitnadeln und -prismen, die zu Bündeln aggregiert oder vereinzelt vorliegen. Die unter Feldeinfluss entstandene Ausfällung zeigt (selbst bei 5000-facher Vergrößerung) nur eine poröse, unstrukturierte Anhäufung mikrokristalliner Kristalle.



**Fig. 3.16.:** Rasterelektronenmikroskopaufnahmen aus dem Kühlrohr der Kältekompressoren bei einer 200-fachen Vergrößerung: die Abbildungen links (Referenz) zeigt schöne Aragonitnadeln, die Abbildung rechts (unter Feldeinfluss entstandene Ablagerung) zeigt keine erkennbaren kristallinen Strukturen.

### Folgerungen aus der Trinkwasser-Fallstudie

Die Fallstudie im Trinkwasserbereich, einem - verglichen mit Kläranlagen - verhältnismässig reinen System, führten zu differenzierteren und aufschlussreichen Beobachtungen.

Unter den Bedingungen, die durch das örtliche Trinkwasser, das Leitungsnetz und die zum Einsatz gekommenen Felder gegeben wurden, konnten folgende Änderungen festgestellt werden:

- Die abgeschiedene Kalkmenge wurde durch das elektromagnetische Feld um den Faktor 6 reduziert.
- Die abgeschiedene Eisenmenge ist nicht feldabhängig. Durch die Verringerung der abgeschiedenen Kalkmenge ist der prozentuale Eisenanteil wesentlich grösser unter Feldeinfluss (Verdünnungseffekt).
- Die Kristallmodifikation der an der Rohrwand verbleibenden Ausfällung änderte sich unter dem Einfluss der elektromagnetischen Felder. Während die Referenz aus Aragonit bestand, besteht die kristalline Struktur aus dem Versuch aus einem ca. 1:1-Gemisch von Calcit und Aragonit.
- Im REM zeigt sich sehr eindrücklich, dass der Kristallhabitus verändert wird: Die Referenzprobe zeigt schön ausgebildete Aragonitnadeln, während in der Probe aus dem Versuch auch in hoher Auflösung keine kristallinen Formen sichtbar sind.

Die hier beschriebenen Beobachtungen dürfen nicht verallgemeinert werden. Sie wurden in der beschriebenen Situation unter diesen Versuchsbedingungen beobachtet. In der Literatur sind z.T. ähnliche Beobachtungen beschrieben worden.

## 4 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

1. Durch die Arbeit an den Fallstudien ist es nachweislich gelungen, in einfachen Systemen wie Trinkwasserversorgungen wie auch in chemisch komplexen Systemen wie der Schlammbehandlung von Kläranlagen elektromagnetische Felder so zu erzeugen und einzusetzen, dass damit eine **krustenvermindernde** und im Idealfall eine **vollständig krustenverhindernde** Wirkung auf die Ausfällung von Calciumcarbonat bzw. Vivianit die Folge war. Die zum Einsatz gelangende Technik hat den Vorteil, dass keine Chemikalien eingesetzt werden und die benötigte elektrische Leistung sehr klein (einige Watt bis einige hundert Watt) ist.
2. Die Entstehung von mineralischen Ablagerungen im allgemeinen und erst recht unter dem Einfluss elektromagnetischer Felder ist stark von den chemischen und physikalischen Bedingungen abhängig. Die Fallstudien haben gezeigt, dass nicht jedes Feld für jede Anwendung zum Erfolg führt.

Deshalb gelten die hier gemachten Aussagen der Fallstudien für die beschriebenen Geräte und Situationen. Verallgemeinerungen jeder Art sind ohne fundierte Vergleichsstudien, die noch fehlen, verfrüht.

3. Für eine technisch befriedigende Lösung in komplexen Situationen, wie sie in Kläranlagen und Industrie vorkommen, ist es daher sinnvoll, Geräte mit **einstellbaren Feldparametern** (wie in der Kläranlage Worblental) zu verwenden.  
Die Analyse der Ablagerungsprobleme in den Kläranlagen Werdhölzli und Worblental hat ergeben, dass es teilweise Ablagerungen gibt, die auch durch rein bauliche Massnahmen behoben werden können (Kap. 3.1.1. und 3.1.2.).
4. Die Fallstudie Werdhölzli hat deutlich gemacht, wie schwierig es ist, Ausmass, Ursache und Veränderungen bei Verkrustungsphänomenen zu erfassen. Um mögliche Einflüsse anderer Art auszuschliessen, ist ein solides Wissen in Chemie und Verfahrenstechnik Voraussetzung. Andernfalls ist nicht nachvollziehbar, ob eine beobachtete Veränderung durch elektromagnetische Felder oder andere Einflüsse stattgefunden hat.
5. Aufgrund der vielen offenen Fragen und der grossen Anzahl an Einflussgrössen ist unbedingt zu empfehlen, dass Geräte nur mit einer Rücknahmegarantie gekauft werden.

6. Der Einsatz elektromagnetischer Felder ist aufgrund dieser Beobachtungen technisch relevant und sollte als Alternative zu gängigen Methoden wie z.B. Ionentausch weiter erforscht werden. Verallgemeinernde Urteile über die Wirksamkeit magnetischer resp. elektromagnetischer Wasserbehandlung aufgrund von Einzelerfahrungen sind kritisch zu hinterfragen. Die komplexen und vielfältigen Wechselwirkungen unterschiedlicher Felder unter unterschiedlichen Randbedingungen sind in ihrer Auswirkung noch nicht hinreichend erforscht. Zur Erarbeitung von Resultaten, die eine Verallgemeinerung sowie eine realistische Einschätzung anderer Geräte erlauben, ist dies aber unerlässlich.

## LITERATUR

- Ellingsen O. (1982) A revue of scale Formation und scale prevention, with emphasis on magnetic water treatment. *IWSA*, SS8-12.
- Gehr R., Zhai Z. A., Finch J. A., und Rao S. R. (1995) Reduction of soluble mineral concentrations in CaSO<sub>4</sub> saturated water using a magnetic field. *Wat. Res.* 29, (3), 933.
- Kittner H. (1970) Untersuchungen zur magnetischen Wasserbehandlung. *WWT* 20 (4), 136-139.
- Klassen V. (1982) Magnetic treatment of aqueous systems. *Khimia*
- Krivoi B. A., Osipov Y. B., und Soloshenko T. E. (1969) Improvement in the clarification of industrial solutions und waste waters with the aid of magnetic treatment. *Chem. Abstract* 90596.
- Lindsay W. L. (1979) *Chemical Equilibriums in Soils*. Wiley.
- Lloyd D. J. (1991) Blockage of piggery effluent pipes - a magneto-hydrodynamic solution. *Water* feb, 39.
- Lohmeyer S. (1992) Wasserenthärtung im Magnetfeld. Was zeigen die Untersuchungen? *Galvanotechnik* 83 (9), 3078-3094.
- Martell A. E. und Smith R. M. (1982) *Critical Stability Constants: Inorganic Complexes*. Plenum Press.
- Maurer M. (1996) Erhöhte biologische Phosphorelimination. Modellierung der biologischen und chemischen Prozesse, *Dissertation ETH No.*
- Meyer H. J. (1984) The influence of impurities of the growth rate of calcite. *J. Crystal Growth* 66, 639.
- Müller, R., Azzam, N., Siegrist, H. und Wehrli, B. (1999) Application of electromagnetic fields to reduce scaling in sewage sludge treatment. *II. Intern. Symposium on anaerobic digestion of solid waste*, Barcelona, IAWQ 15.-18.6.99.
- Nordstrom D. K., Plummer L. N., Langmuir D., Busenberg E., May H. M., Jones B. F., und Parkhurst D. L. (1990) Revised chemical Equilibrium data for major watermineral reactions und their limitations. In *Chemical Modelling of aqueous Systems* (ed. D. C. Melchior und R. L. Bassett). ACS Symposium Series 416.
- Paiano, G. und Pandolfo, L (1994) Magnetic treatment of water and scaling deposit. *Annali di Chimica* 84, 271
- Pandolfo L., Colale R., und Paiano G. (1987) Magnetic field and tap water. *Chim. Ind. (Milan)* 69, 88.
- Parker D. H., Busch M. A., und Busch K. W. (1984) The magnetic treatment of water: a review of russian und other literature. *Standard Oil Co., Indiana*.

- Parsons S. A., Wang B.-L., Judd S. J., und Stephenson T. (1997) Magnetic treatment of a calcium carbonate scale - effect of pH controll. *Wat. Res.* 31 (2), 339.
- Philipenko A. T., Vakhnin I. G., Maskin V. I. und Samchenko Z. A. (1991) Methods of scale prevention in desalination of saline waters. *Sovjet J. Wat. Chem. Technol.* 13 , 45.
- Rybach, L.(1960) Untersuchungen an Epuro-behandeltem Wasser. *Schweizer Maschinenmarkt*, 44.
- Sebold B. M. E. (1996) Untersuchungen zur Frage der Wirksamkeit von stationären Magnetfeldern auf verschiedene Aspekte der Calciumcarbonatabscheidung unter besonderer Berücksichtigung der Anwesenheit von Eisen(III)-Ionen. *Dissertat Universität Karlsruhe*.
- Siegrist, H. und Boller M. (1996) Auswirkungen des Phosphatverbots auf die Abwasserreinigung. *EAWAG news* 42 D, 9.
- Theiler F. (1988) Physikalische Wasserbehandlungsgeräte. Versuche und Stellungnahme der EMPA. *Gas- Wasser- Abwasser* 11, 623.
- Venneiren T. (1957) Le traitement magnetique des liquides contre la corrosion et l'incrustation. *Cebelcor*.
- Vermeiren T. (1958) Magnetic treatment of liquids for scale and corrosion prevention. *Corrosion Technology* 5, 215.
- Wagner I. und Schmidt M. (1985) Untersuchungen zur Wirksamkeit von Geräten zur physikalischen Wasserbehandlung. *gwf* 126 (10), 519.