

VERMEIDUNG VON KORROSION IN HYDRAULISCHEN SYSTEMEN

Mani Zargari^{1*}, Dr. Oliver Opel², Marlies Wiegand²

¹ SIZenergie+, Energie- und Qualitätsmanagement, Mühlenpfordtstr. 23, 38106 Braunschweig, Deutschland
mani.zargari@stw.de

² Leuphana Universität Lüneburg, Fakultät Nachhaltigkeit, Scharnhorststr. 1, 21335 Lüneburg, Deutschland
opel@leuphana.de

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Wasserführende Kreisläufe zur Wärme- und Kältebereitstellung in Gebäuden unterliegen dem Risiko der Korrosion. Es drohen Funktionseinschränkungen und Effizienzverluste bis hin zum Totalausfall.

Im ENOB - Forschungsprojekt „Korrosion in hydraulischen Systemen“ wurden 64 Systeme in 25 Gebäuden hinsichtlich der Korrosion und ihrer Ursachen wasserchemisch untersucht. Außerdem wird ein neu entwickeltes Sensorsystem angewendet, das Korrosionsvorgänge anzeigt, bevor Schäden entstehen. Es hat sich gezeigt, dass über die Hälfte aller untersuchten Systeme von Korrosion betroffen und teilweise auch geschädigt sind. Kühlsysteme sind häufiger betroffen als Heizsysteme. Die Ursachen sind vielfältig: Sauerstoffeinträge, ungeeignete Füllwässer und mikrobiologische Aktivitäten sind die häufigsten Auslöser für Korrosion. Die Ursachen für Sauerstoffeinträge lassen sich häufig auf eine mangelhafte Wartung zurückführen, die zu einem Druckverlust und Fehlfunktionen von Anlagenkomponenten führt. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass der Chloridgehalt des Umlaufwassers eine maßgebliche Einflussgröße für das Korrosionsrisiko darstellt. Mikrobiologische Aktivitäten können ebenfalls die Korrosion massiv befördern. Auf Basis der Untersuchungen werden neue Erkenntnisse für den korrosionssicheren Betrieb von Kühl- und Heizanlagen sowie kombinierten Systemen (Flächenkühlsysteme) in Gebäuden abgeleitet.

Stichwörter:

Korrosion, Wasserkreislauf, Hydraulische Systeme, Feldstudie, Umlaufwasser, Füllwasser

1 Einleitung

Wasserführende Kreisläufe zur Wärme- und Kältebereitstellung in Gebäuden weisen häufig Anzeichen von Korrosion auf. Typische Symptome sind schwarz oder sogar braun gefärbtes Umlaufwasser, sedimentierende Bestandteile im Umlaufwasser, klemmende Ventile, frühzeitig ausfallende Pumpen oder Verstopfungen von Wärmetauschern oder anderen Anlagenteilen mit kleinen Querschnitten. Zur Schadensbeseitigung stehen kostspielige mechanische oder chemische Spülungen an, die von unternehmerischer Seite häufig in Kombination mit einer anschließenden Inhibitorbehandlung des Füllwassers angeboten werden. Die Erfolgsbilanz eines derartigen Vorgehens ist durchwachsen. Nicht immer führt eine Inhibitorbehandlung bei Vorschädigung des Systems zur gewünschten Minimierung der Korrosions- und Belagbildungsrate. Die Gebäudebetreiber sind verunsichert und im Unklaren, warum es überhaupt zur Korrosion kommen konnte und wie sie hätte vermieden werden können. Andere Systeme hingegen, die mit unbehandeltem Wasser befüllt wurden, sind über Jahrzehnte unauffällig.

Für die Planung, Inbetriebnahme und Betrieb stehen Normen- und Regelwerke zur Vermeidung von Korrosion in Wasserkreisläufen zur Verfügung. Dazu zählen die VDI 2035 Blatt 2 *Vermeidung von Schäden in Warmwasseranlagen*, die DIN EN 14868 (2005) *Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Leitfaden für die Ermittlung der Korrosionswahrscheinlichkeit in geschlossenen Wasser-Zirkulationssystemen*, sowie seit April 2017 die BTGA-Regel 3.003 *Geschlossene wassergeführte Kalt-/bzw. Kühlwasserkreisläufe in Gebäuden- Zuverlässiger Betrieb unter wassertechnischen Aspekten* zur Verfügung. In allen Regeln wird der Vermeidung des Sauerstoffeintrages, sowie die Begrenzung der Salzgehalte (bzw. der Leitfähigkeit) insbesondere bei der kombinierten Verwendung von Kupfer und Stahl besondere Beachtung geschenkt. Die VDI 2035 Blatt 1 begrenzt gemäß ihrem Anwendungsbereich für Heizungssysteme darüber hinaus den Gehalt an Härtebildnern zur Vermeidung von Steinbil-

dung. Obgleich die VDI 2035 Blatt 2 die umfangreichsten Maßgaben zur Korrosionsvermeidung in Wasserkreisläufen vorgibt, ist ihre Anwendung auf Heizungssysteme beschränkt. Für Kühlsysteme existieren mit der BTGA Regel 3.003 erst seit kurzem umfangreiche Maßgaben. Insofern bestand berechtigterweise eine hohe Unsicherheit hinsichtlich eines korrosionssicheren Betriebes von Kaltwassersystemen. Davon ausgenommen sind Anlagen mit Glykol, die -regelmäßig gewartet- ausreichend mit Inhibitoren und Bioziden versorgt und meistens korrosionstechnisch unauffällig sind.

Das mit Mittel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie im Rahmen des ENOB – Forschungsprogramms geförderte Forschungsprojekt EQM:Korrosion widmet sich der Fragestellung, nach Ursachenzusammenhängen von Korrosion und Korrosionsschäden in Wasserkreisläufen und ihrer Vermeidung. Es werden Heiz- und Kühlsysteme sowie kombinierte Systeme in großen Nichtwohngebäuden behandelt. Schwerpunkt des Forschungsprojektes bildet die Feldstudie an rund 20 Gebäuden mit 65 Systemen. Auf Basis einer chemischen Untersuchung des Umlaufwassers sowie der erhobenen betrieblichen und konstruktiven Randbedingungen erfolgt eine Beurteilung der Systeme unter korrosionstechnischen Aspekten sowie die Ursachenermittlung für das Auftreten von erhöhten Korrosionsraten. Im weiteren Verlauf wird das neu entwickelte Sensoruntersystem FeQuan angewendet, das geeignet ist, Korrosionsvorgänge zu erkennen bevor Schäden entstehen. In der letzten Phase der Feldstudie werden bereits geschädigte Systeme unter wissenschaftlicher Begleitung saniert, um die Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zu beurteilen.

2 Untersuchung von Korrosion in Wasserkreisläufen

2.1 Phase I der Feldstudie: Wasserchemische Vor-Ort Parameter und wasserchemische Analyse

Es wurden 20 Nichtwohngebäude aus der Klasse der Büro- und Verwaltungsgebäude für die Untersuchungen im Projekt akquiriert deren Umlaufwasser wasserchemisch analysiert wurden.

Mit einer mobilen Messeinheit werden die Parameter Sauerstoff, pH-Wert, Leitfähigkeit, Temperatur und Redoxpotential untersucht. Aus diesen Parametern wird der Systemzustand hinsichtlich seiner Korrosionsneigung bestimmt. Weiterhin ist es mit diesen Parametern möglich den Gehalt an gelöstem –also korrodiertem- Eisen(II) zu bestimmen. [1] Die Messeinheit wird mit Edelstahl-Wellschläuchen an das zu untersuchende System angebunden, so dass kein Kontakt zur Umgebungsluft besteht. Die Nullpunkt-Kalibration der optischen Sauerstoffsensoren ist kritisch und erfolgte in alkalischer Ascorbinsäurelösung [2]. Es wurden je Kreis mehrere Proben zur Bestimmung der unten angegebenen Parameter entnommen. Bei Vorliegen großer Mengen partikulärer Korrosionsprodukte (Sichtprüfung) wird davon ebenfalls eine Probe entnommen. In Abhängigkeit vom Füllvolumen der Anlage wird entweder ein anderer, höher liegender Beprobungspunkt gewählt, oder das Anlagewasser bis zur Erreichung einer optisch homogenen Probe abgelassen (Kriterien: Trübung, Färbung).

Je nach Untersuchungsprogramm oder zuvor festgelegten Problemstellungen werden ggf. weitere Proben entnommen, z.B. zur Bestimmung weiterer Parameter zur mikrobiellen Korrosion.

Im Einzelnen erfolgen die Analysen nach Tabelle 1.

Tabelle 1: Analysen im Rahmen der Feldstudie

Analyse	Parameter	Analysemethode
Sicht- und Geruchsprüfung	Trübung, Färbung	Vor-Ort-Beurteilung
Vor-Ort-Parameter	Gelöstsauerstoff, pH-Wert, Redoxpotential, Leitfähigkeit, Temperatur	Vor-Ort-Messung mit mobiler Messeinheit
Metall-Kationen (gelöst/partikulär)	Fe, Mn, Cu, Zn, Cr, Ni, Al	ICP-OES / ICP-MS
Mikrobielle Nährstoffe und Stoffwechselprodukte	CA, Mg, K, S, P	ICP-OES / ICP-MS / Photometrie

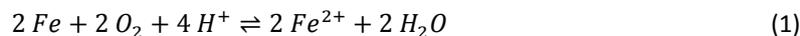
Anionen	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	IC
Kohlenstoff	C org. (NPOC) / C anorg.	TOC-Analyzer
Mikrobielle Profilanalyse	Artenzusammensetzung	16S RDNA-Analyse BlueBiolabs

Im Labor werden anhand der entnommenen Proben die enthaltenen Korrosionsprodukte (Eisenminerale, Kupfer und Legierungsmetalle) mittels elementaranalytischer Methoden bestimmt. Es werden gefilterte (0,2 µm-Spritzenfilter) und ungefilterte Proben untersucht, um gelöste und ungelöste Korrosionsprodukte und Wasserinhaltsstoffe zu unterscheiden. Zur Bestimmung des Risikos von Kalk-Ablagerungen wird der Gehalt an Härtebildnern bestimmt. Neben den Härtebildnern können auch Anionen als Nährstoffe mikrobiell induzierte Korrosion fördern. Darüber hinaus wird der Gehalt an anorganischem Kohlenstoff sowie organischer Kohlenstoff als nicht ausblasbarer Kohlenstoff (NPOC) bestimmt.

Hohe Konzentrationen der meisten der oben genannten Analyten erhöhen die Leitfähigkeit des Systemwassers, wodurch Korrosionsprozesse beschleunigt werden können.

Für eine mikrobiologische Profilanalyse in den untersuchten Systemen wurden zusätzlich 2 x 0,8 L Probe entnommen, stabilisiert und zur weiteren Untersuchung an ein mikrobiologisches Speziallabor übergeben.

Die Ergebnisse der wasserchemischen Analysen werden auf der Basis von festgelegten Grenzwerten beurteilt. Diese beruhen auf bereits bekannte Grenzwerte der VDI 2035 oder es erfolgte eine Anpassung auf Basis der Erfahrungen im Projektverlauf. Der wichtigste Wert ist der Gehalt an gelöstem Eisen, der auf aktive Korrosionsprozesse hindeutet. Eisen geht nach folgender Summenformel in Lösung bevor es in weiteren Oxidationsschritten zu partikulären Stoffen ausfällt:



Im Weiteren spielen die gemessenen Vor-Parameter sowie Salzgehalte eine entscheidende Rolle zur Beurteilung der Korrosionsgeschwindigkeit und des Korrosionsrisikos. War mehr als ein Parameter leicht erhöht, dabei gelöste oder partikuläre Metalle, oder der pH-Wert zu gering wurde die Bewertung „kritischer Systemzustand“, bei gleichzeitig stark erhöhten Metallgehalten die Bewertung „schlechter Systemzustand“ vergeben.

Folgende Bewertungskriterien wurden nach Tabelle 2 festgelegt.

Tabelle 2: Bewertungskriterien für die Beurteilung der Systemzustände

Parameter	Grenzwert für kritische Beurteilung	Grenzwert für schlechte Beurteilung
Gelöste Metalle	0,5 mg/L	>> 0,5 mg/l
Salze (Chlorid, Nitrat, Sulfat)	15 mg/l	50 mg/l
Sauerstoffgehalt	0,1 mg/l	0,1 mg/L
pH-Wert	pH < 8,2	pH < 8,2
Korrosionsrate (berechnet)	0,1 mg/(l*min)	1 mg/(l*min)

2.2 Bisherige Ergebnisse der Feldstudie

Die Anteile der gut, kritisch und schlecht bewerteten Systeme sind in etwa gleich verteilt, wobei die Kühlsysteme seltener in einem guten Zustand sind als die Heizsysteme, siehe Bild 1. Neben der Bewertung des System-

zustandes wird auf Basis wasserchemischer Parameter die vorangegangene Behandlung des Füllwassers in die Bewertung mit einbezogen. Dabei fällt auf, dass die Hälfte der Kühlturmsysteme mit enthärtetem Wasser befüllt wurden. Ein kleiner Teil der Füllwässer ist voll-entsalzt, siehe Bild 2. Es kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Art der Wasserbehandlung und dem Systemzustand ermittelt werden. Es hat sich lediglich gezeigt, dass sich die Systeme mit voll-entsalztem Wasser ausnahmslos in einem guten Zustand befinden.

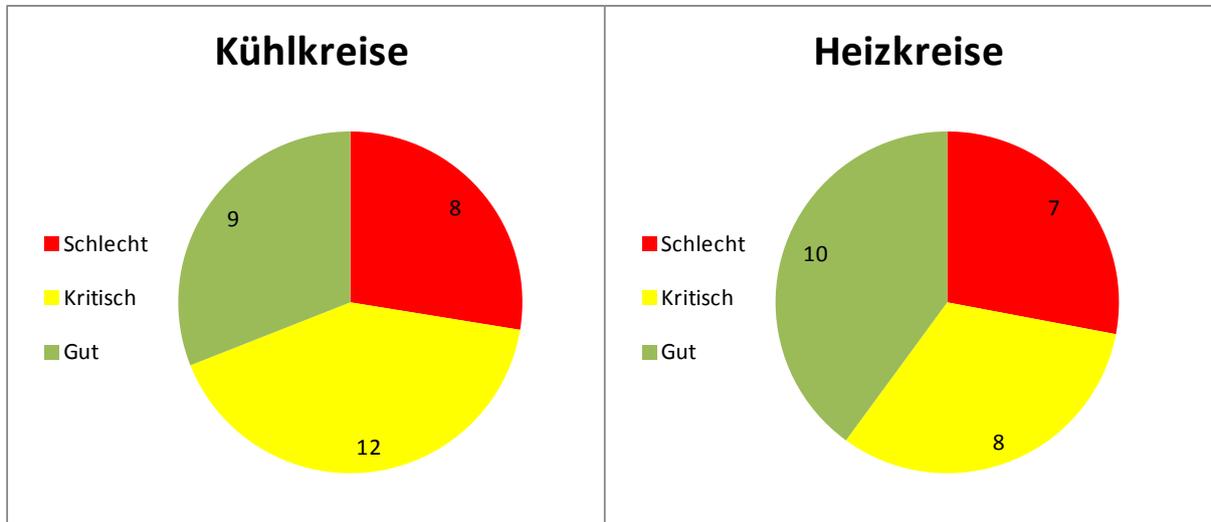


Bild 1: Bewertung der untersuchten Systeme

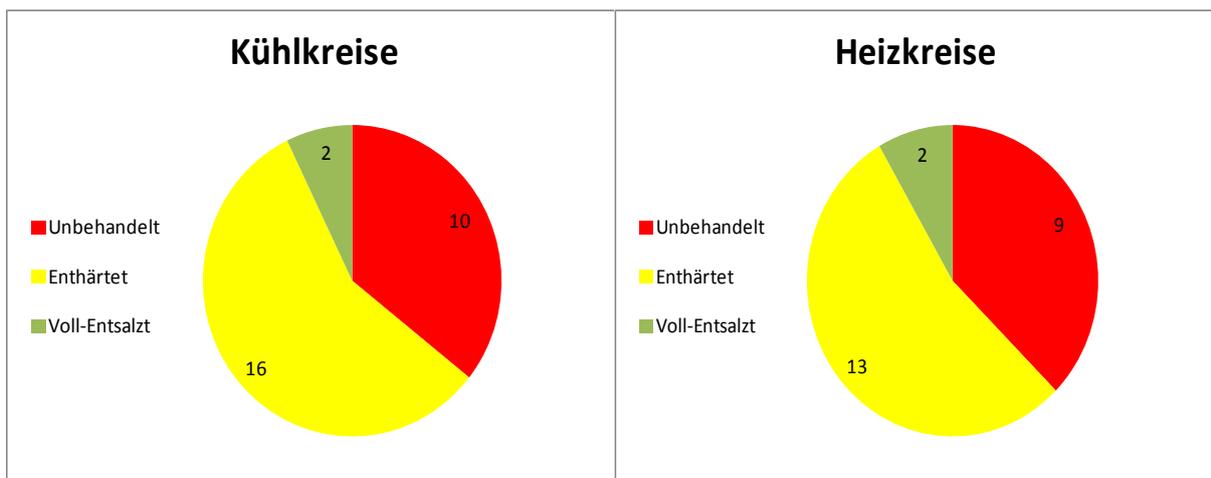


Bild 2: Behandlung der Füllwässer

Ein deutlicheres Bild zeichnet sich ab, wenn man den Gehalt an gelöstem Eisen den Chlorid-Gehalten gegenüber stellt, siehe Bild 3: Ab einem Gehalt von 15 mg/l Chlorid im Umlaufwasser nehmen Fälle mit hohen Eisengehalten deutlich zu. Unterhalb dieses Wertes kommt es kaum zu einer nennenswerten Korrosion. Einen weiteren Einflussfaktor stellt der pH-Wert dar. Ein pH-Wert kleiner 8,5 pH neben einem Chlorid-Gehalt größer 15 mg/l führt zu einem höheren Eisengehalt, als Systeme mit einem pH-Wert größer als 8,5.

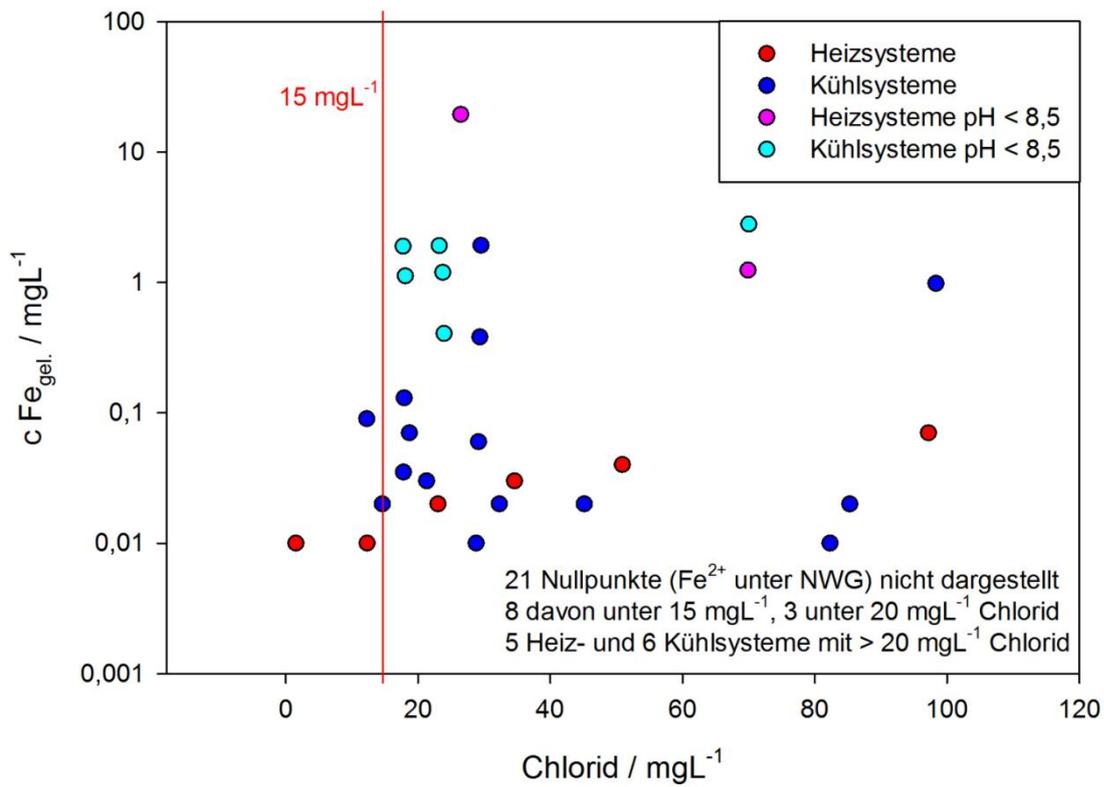


Bild 3: Gehalt an gelöstem Eisen in Abhängigkeit vom Chlorid-Gehalt des Umlaufwassers

Die Gegenüberstellung des Sauerstoffgehaltes und des Eisengehaltes führt zu keinem eindeutigen Zusammenhang. Wenn man die meisten Systeme mit einem Gehalt zwischen $0,01$ und $0,1 \text{ mg/l}$ Sauerstoff außen vor lässt, ist der zu erwartende Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und Korrosionsrate erkennbar, der jedoch nur für sehr niedrige und sehr hohe Sauerstoffkonzentrationen gilt. Für die meisten Fälle zwischen $0,01 \text{ mg/l}$ und $0,1 \text{ mg/l}$ gilt dieser Zusammenhang nicht.

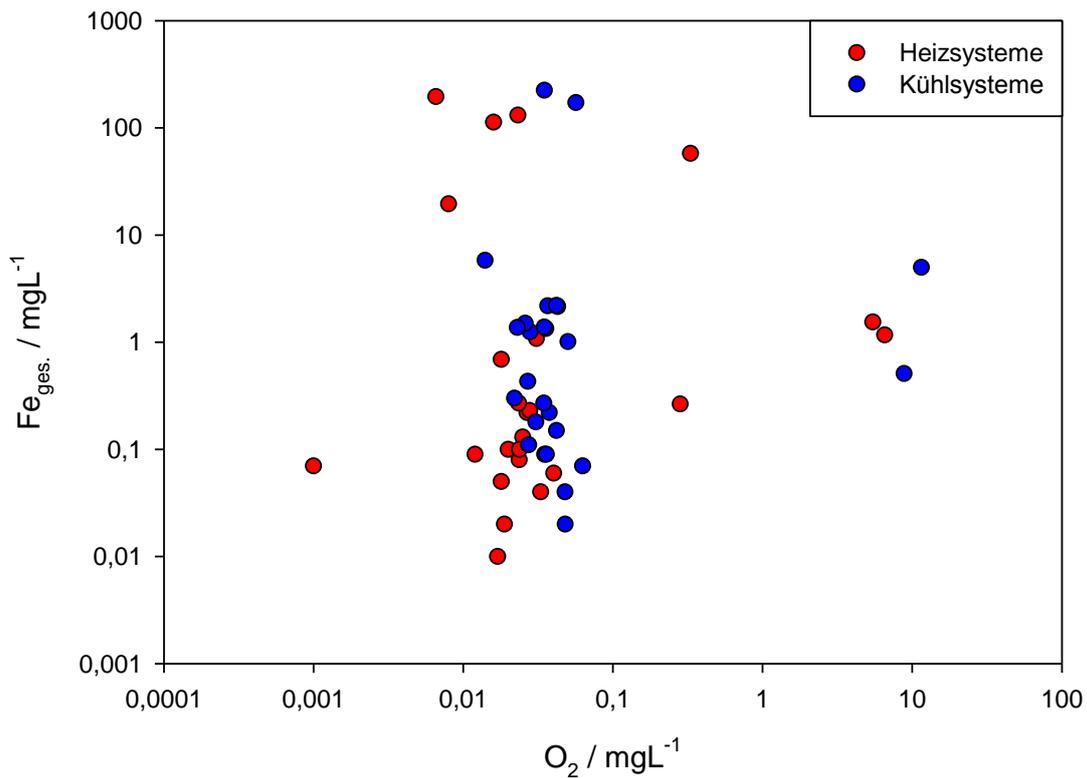


Bild 4: Gehalt an gelöstem Eisen in Abhängigkeit vom Sauerstoff-Gehalt des Umlaufwassers

2.3 Bewertung

Die vorgefundene Befüllung von Kühlsystemen mit enthärtetem Wasser überrascht, da dieses Vorgehen für Kühlsysteme nicht nur nutzlos sondern potentiell sogar schädlich ist. Härtebildner tragen im gewissen Maße durch Ihre Säure-Pufferwirkung und Ablagerungen zum Korrosionsschutz bei. Offenbar erfolgte die Befüllung mit enthärtetem Wasser in Ermangelung einer geeigneten Vorschrift für Kühlsysteme, so dass auf die Vorgaben der VDI 2035 Blatt 2 für Heizsysteme zurückgegriffen wurde, die neben einer sinnvollen Begrenzung der Leitfähigkeit auch enthärtetes Wasser vorschreibt.

Der Einfluss von Chlorid auf die Korrosionsneigung zeigt sich deutlich. Chlorid greift Schutzschichten aus Korrosionsprodukten an und ermöglicht so weitere Korrosion. Chlorid zeigt sich als der deutlichste alleinige Einflussfaktor auf die Korrosionsneigung.

Treffen hohe Chlorid-Gehalte oberhalb 15 mg/l auf niedrige pH-Werte kleiner 8,5 pH kommt es zu einer weiteren Verstärkung der Korrosionsneigung. Niedrige pH-Werte resultieren häufig aus mikrobiologischen Aktivitäten. Unter günstigen Umständen sollte das Umlaufwasser durch anfängliche Korrosionsvorgänge zum Schutz vor weiterer Korrosion ausreichend alkalisieren. Doch durch die Aktivität von Sulfat-zehrenden, fermentierenden und Stickstofffixierenden Bakterien entstehen jedoch Säuren, die die schützende Eigenalkalisierung verhindern.

Der Einfluss des gemessenen Sauerstoffgehaltes des Umlaufwassers auf die Korrosionswahrscheinlichkeit ist nicht so bedeutend, wie die Prioritätensetzung in den maßgeblichen Regeln erwarten ließe. Sehr hohe Sauerstoffgehalte über 1 mg/l führen zwar sicher zu Korrosion (Bild 4), aber ein niedrige Sauerstoffgehalt unterhalb 0,1 mg/l kann zu einer ebenso starken Korrosion führen. In dem Bereich zwischen 0,01 mg/l und 0,1 mg/l, in dem sich die meisten Umlaufwässer befinden, ist kein offenkundiger Zusammenhang zwischen der Sauerstoffgehalt und dem Eisengehalt festzustellen. Ursächlich für die Streuungen in diesem Bereich könnten unter-

schiedliche Salzgehalte der Wässer sein. Ein niedriger Sauerstoffgehalt stellt also keinen Garanten für Korrosionsfreiheit dar. Hingegen fördern hohe Sauerstoffgehalte oberhalb 1 mg/l sicher die Korrosion. In dem häufig anzutreffenden Bereich dazwischen scheinen andere Einflussfaktoren wie der Salzgehalt, mutmaßlich speziell des Chlorid-Gehaltes, bedeutender.

2.4 Einfluss der Mikrobiologie und Fallbeispiele

Es wurden mittels 16S rDNA-Analyse der Umlaufwässer rund 800 verschiedene Gattungen an Keimen identifiziert. Die identifizierten Gruppen lassen sich aufgrund ihrer Stoffwechseleigenschaften wie folgt unterteilen:

- Sulfatreduzierer und Eisenoxidierer (Reduktion und Oxidation)
- Nitratreduktion, Stickstofffixierung
- Biofilmbildner
- Fermentierende, acetogene, zum Teil komplexe, auch halogenierte Organik abbauende Organismen (Abbau von Inhibitoren möglich)

Nitrat- und Sulfat-reduzierende Bakterien begünstigen unmittelbar den Korrosionsprozess von Eisen. Dies spricht neben der Begrenzung des Chlorid-Gehaltes für eine Vollentsalzung des Füllwassers. Bakterien wird durch das Fehlen von Salzen die Nährstoffbasis entzogen. Inhibitoren und Glykolreste ohne ausreichende Bioziddosierung dienen ebenfalls als Nährstoffgrundlage für Keime. Die am stärksten betroffenen Systeme, die in der Feldstudie vorgefunden wurden, enthielten häufig ein Umlaufwasser mit Inhibitor- oder Glykolresten aus vorangegangenen Behandlungsansätzen.

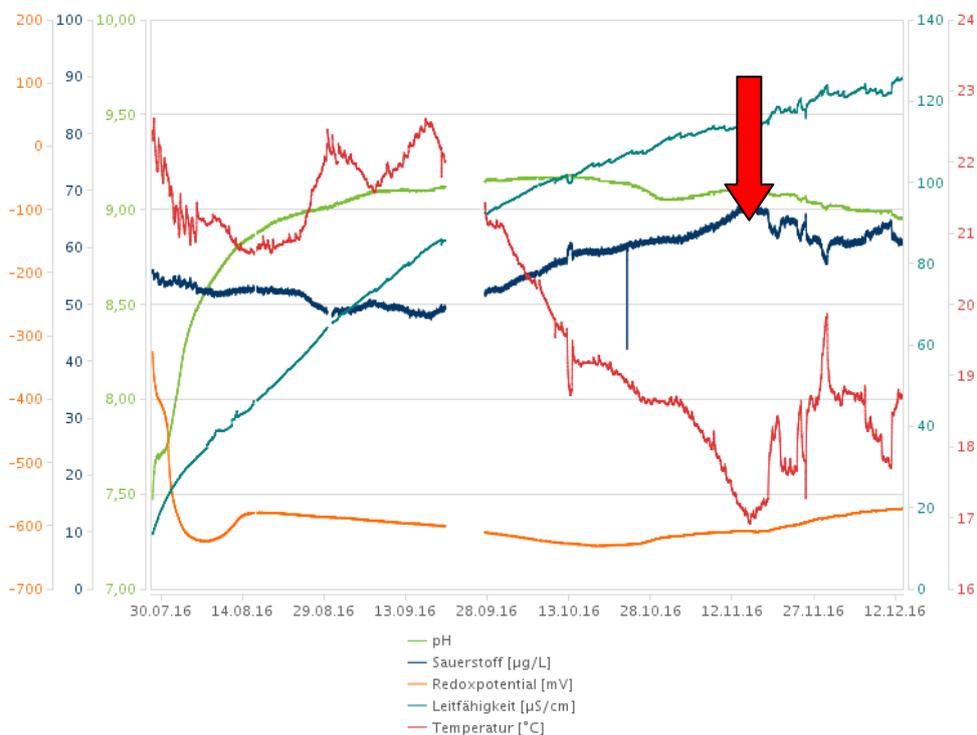


Bild 5: Gute Alkalisierung mit späterer mikrobiologischer Besiedelung

Bild 5 zeigt das wasserchemische Verhalten in einer kleinen Neu-Anlage im Labormaßstab (Systemvolumen 3 l) nach Inbetriebnahme. Der pH-Wert steigt innerhalb von zwei Monaten von 7,5 pH auf 9,2 pH während der Sauerstoffgehalt aufgrund Zehrung durch die anfänglichen Korrosionsvorgänge leicht von ursprünglich gesättigt-

ten Verhältnissen auf 50 µg/l fällt. In den folgenden drei Monaten kommt es durch Temperaturabsenkung zu einer entsprechenden Erhöhung der Sauerstoffkonzentration von 50 auf 68 µg/L innerhalb von 1,5 Monaten. Nach ca. einem Monat beginnt der pH-Wert zu sinken und fällt nach zwei weiteren Monaten unter pH 9,0. Die mikrobiologische Profilanalyse zeigt neben der stickstofffixierenden Gattung *Azospira* u.a. den nitratabhängigen Eisenoxidierer *Acidovorax*. Beide kommen im Boden und Grundwasser vor und sind an Temperaturen von 10-18 °C angepasst [3]. Die Leitfähigkeit erhöht sich in den Testsystemen mit geringem Anlagen volumen (ca. 3 L) u.a. durch die geringfügige Freisetzung von Kaliumchlorid aus den pH- und Redoxsensoren (je nach Ionenstärke des Wassers ca. 10 mg pro Monat, selbst in kleineren Gebäudeanlagen kaum messbar).

Bild 6 zeigt das wasserchemische Verhalten in einer Anlage bei stetigem Sauerstoffeintritt und Verkeimung. Der pH-Wert steigt innerhalb kurzer Zeit auf pH 9,3 pH und fällt dann stetig auf pH 8,4. Die mikrobiologische Analyse zeigt als dominierende Gattungen den aeroben Biofilmbildner *Pseudomonas* und den Stickstofffixierer *Bradyrhizobium* [3].

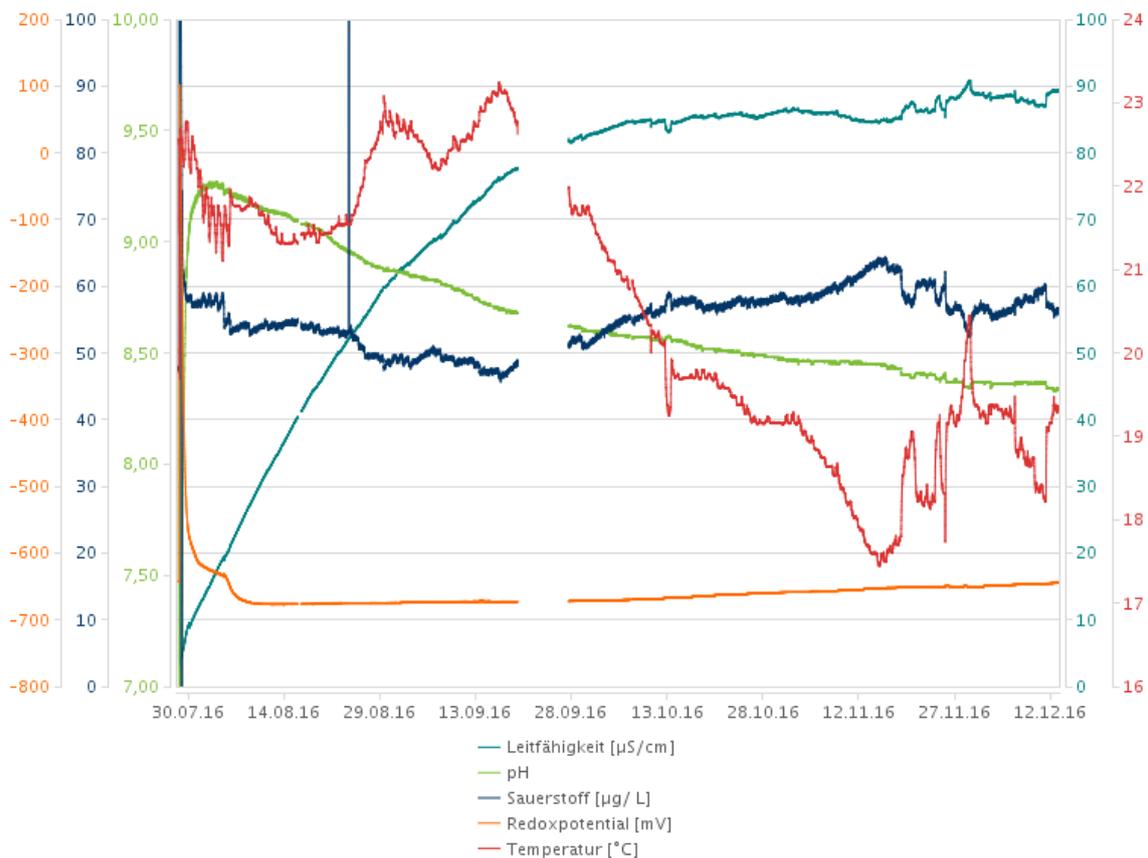


Bild 6: Schlechte Alkalisierung (Sauerstoffeintritt und Verkeimung)

2.5 Schlussfolgerung

Der überwiegende Anteil der vorgefundenen Systeme befindet sich aus korrosionstechnischer Sicht mindestens in einem kritischen Zustand, so dass dort die Wahrscheinlichkeit von Korrosionsschäden deutlich erhöht ist. Kühlsysteme sind aufgrund der Befüllung mit ungeeigneten Wässern häufiger betroffen als Heizsysteme. Ursache sind -bis vor kurzem- unklare oder fehlende Regeln für die Befüllung von Kühlsystemen. Der Chlorid-Gehalt des Füllwassers hat sich als maßgeblicher Einflussfaktor auf die Korrosionsneigung herausgestellt. Ein zu niedriger pH-Wert bedingt durch nitrat- und sulfatreduzierende Bakterien in Kombination mit einem zu hohen Chlorid-Gehalt verstärkt die Korrosionsneigung weiter. Zur wirksamen Begrenzung des Chlorid-Gehaltes und ande-

rer Salze als Nährstoffgrundlage für Keime empfiehlt es sich sowohl für Heiz- als auch Kühlanlagen die Befüllung und Nachspeisung mit voll-entsalztem Wasser (VE-Wasser). Alternativ können salzarme unbehandelte oder mit VE-Wasser verschnittene Standortwässer verwendet werden. Dementsprechende Anforderungen an das Füllwasser enthält die BTGA-Regel 3.003 in die neben der Begrenzung des Chlorid-Gehaltes unter 15 mg/l weitere Forschungsergebnisse eingegangen sind. Neben einem geeigneten Füllwasser stellt die kontinuierliche wasserchemische Überwachung des Umlaufwassers ein wirksames Mittel zur Vermeidung von Schäden durch Korrosion dar. Die Überwachung des pH-Wertes, wie sie auch durch die VDI 2035 empfohlen wird stellt die einfachste Möglichkeit dar Korrosionsrisiken rechtzeitig zu erkennen.

2.6 Ausblick

In Deutschland bestehen derzeit, auch in der neuen BTGA-Regel, keine Überwachungspflichten bezüglich des Eisengehalts im Rahmen der Inbetriebnahme und Übergabe, da die Anlagen Zeit brauchen, um in einen stabilen Zustand überzugehen. Fallen später Korrosionsschäden auf, bedarf es Laboranalysen zur Bestimmung der Eisengehalte und zum Monitoring der Anlagen, die nur mit hohem Aufwand und diskontinuierlich durchgeführt werden können. Zur vorbeugenden Überwachung bieten sich couponbasierte Korrosionsmessmethoden an, die jedoch nur die Korrosion an einem eingebrachten Werkstück in diesem Teil der Anlage darstellen und insbesondere auf Sauerstoff, den pH-Wert und korrosionsfördernde Wasserbestandteile reagieren. Die Sensitivität auf mikrobiologische Korrosion ist eingeschränkt. Die Korrosionsursache kann hierbei nicht ermittelt werden. Eine vielversprechende Alternative mit höherem Informationsgehalt stellt der FeQuan-Sensor dar, einem Sensorsystem aus 4 einzelnen Sensoren, aus deren Werten der Eisen(II) – Gehalt berechnet werden kann. Unter Laborbedingungen hat das Sensorsystem bereits seine Eignung bewiesen. In Bild 7 werden die durch den Sensor ermittelten Eisengehalten den laboranalytisch ermittelten Eisengehalten gegenübergestellt. Der mit dem FeQuan-Sensor berechnete Wert zeigt über weite Bereiche eine gute Übereinstimmung mit den Laborwerten. Der während der Inbetriebnahme erhöhte Eisengehalt wird aufgrund der Bildung reaktiverer Komplexe (vgl. [1]) ebenso wie durch mikrobiologische Aktivität hervorgerufene Wasserveränderungen (vgl. Bild 5) überhöht dargestellt. Die analytischen Eisenkonzentrationen erhöhen sich erst in der Folge des pH-Wert-Abfalls und der mikrobiologischen Besiedelung und stimmen dann mit den Sensorwerten wieder überein. Umgekehrt treten falsch negative Ergebnisse nicht auf, wie die Feldstudie in 64 Systemen mit Punktmessungen ergeben hat. Die Charakteristik lässt sich zur Früherkennung schädlicher Wasserveränderungen nutzen. Weiterhin wird durch die Messung der im Wasser gelösten Korrosionsprodukte und der Eisen(II)-Oxidationsrate ein Bild des Gesamtsystems erhalten.

In der zweiten Phase der Feldstudie kommt dieses Sensorsystem erstmalig in 8 Kreisläufen zum Einsatz. Die Daten werden auf einen Server übertragen und der Eisen (II) – Gehalt berechnet. Die Sensorwerte, der berechnete Eisen(II)-Gehalt sowie die daraus abgeleitete Korrosionsrate werden in Echtzeit auf einem webbasierten Dashboard dargestellt und sind mit einem Browser einsehbar, siehe Bild 8. Dies ermöglicht die Anwendung als Überwachungstool zur Überwachung von Korrosionsvorgängen in einem wasserführenden Kreislauf.

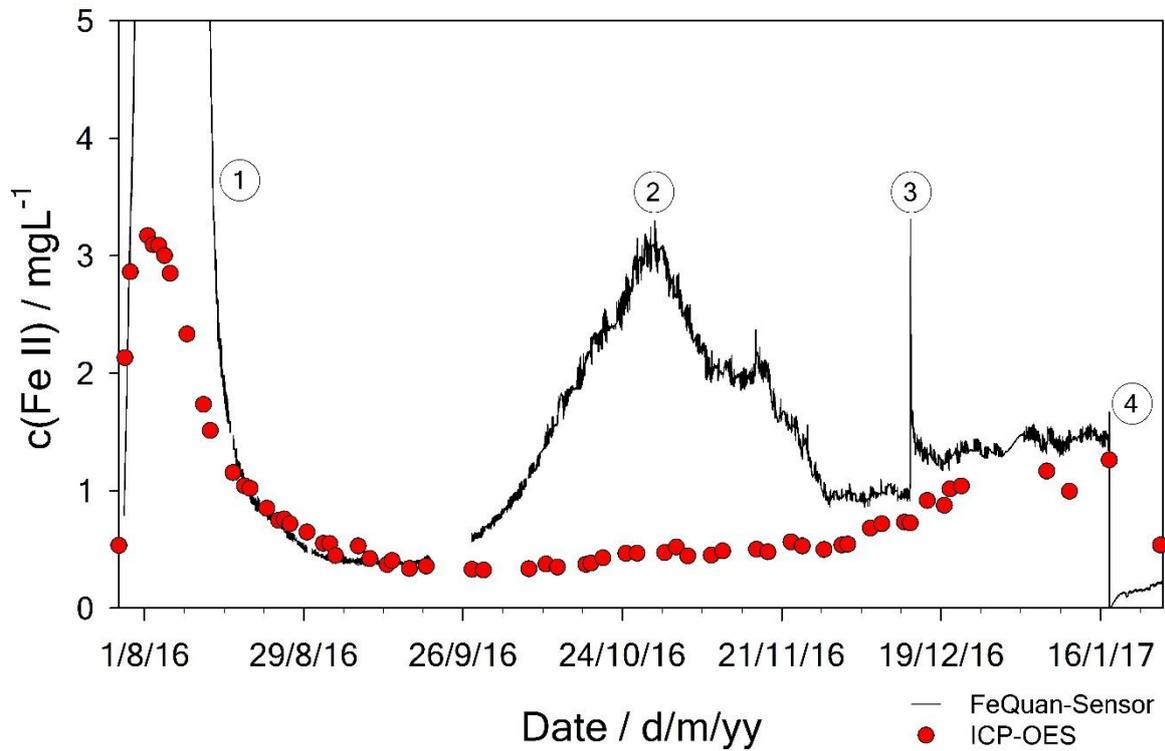


Bild 7: Bestimmung des Gehalts an gelöstem Eisen mit dem FeQuan-Sensor und durch Laboranalysen. (1) zeigt erhöhte Eisenwerte kurz nach Befüllung, (2) durch mikrobiologische Besiedlung hervorgerufene Wasserveränderungen; (3) Arbeiten an Sensoren und (4) eine Probenahme zur Untersuchung der Mikrobiologie.



Bild 8: Dashboard zur Überwachung des Systemzustandes

3 Literaturverzeichnis

- [1] Opel, Oliver: Detektion von Verockerungsprozessen, Korrosion und Belagbildung - Monitoring der Eisenoxidation in Brunnen, Gebäuden, Leitungen und technischen Anlagen mithilfe des Redoxpotentials. SVH Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, ISBN: 978-3-8381-3472-7 (Dissertation, Leuphana Universität Lüneburg, 2013)

- [2] DIN ISO 17289:2014-12 „Wasserbeschaffenheit – Bestimmung des gelösten Sauerstoffs – Optisches Sensorverfahren“

- [3] Wiegand, Marlies: Untersuchungen zum Korrosionsverhalten geschlossener hydraulischer Anlagen moderner Installationssysteme mithilfe von wasser- und elektrochemischer Analytik freigesetzter Metallionen. Masterarbeit, Leuphana Universität Lüneburg, 2017