



Korrosionskontrolle in der Trinkwasserverteilung mit einfachen Methoden

Teil 4: Versuch zur Bestimmung der Korrosionsrate und der instationären Korrosion von niedriglegiertem Stahl

Norbert Konradt, Monika Konradt und Peter Janknecht, Trinkwasser Consulting

Zusammenfassung: Um die Auswirkungen des Absetzens eines Korrosionsinhibitors über einen längeren Zeitraum zu untersuchen, wurde ein zweiteiliges niedriglegiertes Stahlrohr aus dem Trinkwassernetz entnommen und in ein Testsystem eingebaut. Nach einer Anpassungsphase mit inhibiertem Wasser wurden die verbundenen Rohrabchnitte 600 Tage lang mit inhibitorfreiem Wasser betrieben. Während dieser Zeit wurden Stagnationsversuche durchgeführt, um die Zunahme der Trübung, den Sauerstoffverbrauch und die Eisenfreisetzung zu messen. Aus diesen Parametern wurden die Korrosions- und Eisenfreisetzungsraten berechnet. Der Vergleich der Werte zu Beginn und am Ende der Versuche zeigte, dass das Testrohr ohne den Phosphatinhibitor keinen signifikanten Anstieg der Korrosions- oder Eisenfreisetzungsraten aufwies. Die Trübungsraten deuten darauf hin, dass der gesetzliche Trübungsgrenzwert für Trinkwasser nach sechs Stunden Stagnation im getesteten Wasser erreicht wird. Unter stabilen Bedingungen stieg die Trübung linear mit der Zeit an, während der Sauerstoffverbrauch linear abnahm. Spülungen störten das Korrosionssystem erheblich und erhöhten die Trübungsrate.

Die erzielten Ergebnisse können zur Risikobewertung von Änderungen der Wassereigenschaften genutzt werden, in dieser Studie durch Beendigung der Zugabe von Korrosionsinhibitoren, aber auch bei Modifikationen der Wasseraufbereitung durch Belüftung, Enthärtung, Entsalzung. In diesen Fällen sollte die Auswirkung auf korrodierende Materialien im Vorfeld untersucht werden. Die Ergebnisse ermöglichen die Ableitung von Empfehlungen zur Optimierung der Korrosionseigenschaften des Wassers oder zur Umsetzung von Gegenmaßnahmen im Versorgungsnetz. Das Testverfahren erfordert nur minimalen Personal- und Finanzaufwand und liefert dennoch wertvolle Erkenntnisse über Korrosionsprozesse im System „Wasser-Metall“.

Stichwörter: Eisenfreisetzungsraten, Flächenkorrosion, Inhibierung, Korrosion von niedriglegiertem Stahl, Korrosionsmessung, Korrosionsrate, Sauerstoffkorrosion, Stagnationsversuch, Trübungsrate.



Copyright: © 2026 by the authors. Licensee Trinkwasser Consulting, Essen, Germany. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Vorwort: Was beabsichtigt diese Artikelreihe?

Mit dieser Artikelserie wollen wir über die Möglichkeiten der Korrosionskontrolle im Trinkwasserverteilungsnetz und in Trinkwasserinstallationen informieren. Dazu werden die Bedeutung der Korrosion für die in der Trinkwasserversorgung eingesetzten Werkstoffe und das Medium Trinkwasser dargestellt, Untersuchungsmethoden erläutert und mögliche Problemlösungsstrategien für den Korrosionsschutz diskutiert. Damit soll insbesondere Wasserversorgern, Großverbrauchern und interessierten Privatpersonen ein tieferes Verständnis der Metallkorrosion im Trinkwasser vermittelt werden.

1. Versuch zur Bestimmung der instationären Korrosion einer niedriglegierten Stahlleitung

1.1. Veranlassung

Es sollte untersucht werden, ob die Veränderung der Wassereigenschaften einen Einfluss auf die Korrosionsrate und die instationäre Korrosion hat, die zu Braunwasserbildung führt. Im vorliegenden Fall handelte es sich um die Einstellung einer Langzeitdosierung von Korrosionsinhibitoren. Aber auch Veränderungen der Wassereigenschaften durch die Erschließung weiterer Rohwasserressourcen oder Veränderungen in der Aufbereitung wie Enthärtung, Entsalzung oder Belüftung können mit dem Verfahren untersucht und bewertet werden. So führt z.B. der Einsatz von Belüftung zu einer Erhöhung der Sauerstoffkonzentration im Wasser, zu einer Verringerung des Kohlendioxidgehaltes (gemessen über die Basiskapazität) und zu einer Erhöhung des pH-Wertes, allesamt Parameter, die Korrosionsprozesse beeinflussen. Auch wenn das aufbereitete Wasser formal den Anforderungen der DIN EN 12502-5 [1] entspricht, kann nicht a priori davon ausgegangen werden, dass sich die Korrosionsgeschwindigkeit nicht wesentlich ändert, da die Norm nur eine Korrosionswahrscheinlichkeit angibt. Korrodierte Rohre, die seit Jahrzehnten im Verteilungsnetz in Betrieb sind, werden nicht berücksichtigt. Es wird daher empfohlen, das Verhalten des Korrosionssystems vor einem Wasserwechsel im Versorgungsnetz zu untersuchen.

1.2. Einsatz von niedriglegiertem Stahl in der Trinkwasserverteilung

Niedriglegierter Stahl wird seit Langem für größere Rohrdurchmesser in Trinkwasserverteilungssystemen eingesetzt. Aufgrund seiner mangelnden Korrosionsbeständigkeit gegenüber Wasser ist jedoch eine Innenbeschichtung zum Schutz erforderlich. Technologien, die vor 1970 verfügbar waren, boten keinen ausreichenden Langzeitschutz gegen innere Korrosion. Erst das Aufbringen einer Zementschicht ermöglichte einen dauerhaften Schutz gegen innere Korrosion [2].

1.3. Flächenkorrosion von niedriglegiertem Stahl

Bei niedriglegierten Stahlrohren, die bereits vor Jahrzehnten im Verteilungsnetz verbaut wurden, ist nur die **Sauerstoffkorrosion** als **Korrosionstyp** und die **Flächenkorrosion** als **Angriffsart** relevant. Da Eisen der Hauptbestandteil von niedriglegiertem Stahl ist, wird die Korrosionsrate durch die Menge des pro Zeiteinheit oxidierten Eisens bestimmt. Bei einer molaren Masse von 55,85 g/mol und einer Dichte von 7,87 kg/dm³ lassen sich die Korrosionsraten für Eisenwerkstoffe wie folgt umrechnen [3]: $1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) = 0,0464 \text{ mm}/\text{Jahr} \triangleq 46,4 \text{ }\mu\text{m}/\text{Jahr} = 1,81 \text{ mpy} (0,001 \text{ Inches pro Jahr})$.

Die typischen Korrosionsraten für ungeschützte Stahlrohre, die seit mehreren Jahren in Betrieb sind, liegen im Bereich von 0,2 g/(m²·d) bzw. 10 µm pro Jahr [4].

Bei der Flächenkorrosion erfolgt der Angriff auf die Werkstoffoberfläche gleichmäßig. Der Korrosionsvorgang ist diffusionskontrolliert und die Geschwindigkeit hängt wesentlich von der Sauerstoff-Konzentration ab. Die **Bildung einer Schutzschicht** ist nach DIN EN 12502-5 [1] wahrscheinlich, wenn das betrachtete Wasser die folgenden Anforderungen erfüllt:

- **Sauerstoff-Konzentration > 2,8 mg/l**
- **pH-Wert > 7**
- **Hydrogencarbonat-Konzentration > 122 mg/l**
- **Calcium-Konzentration > 44 mg/l**

Des Weiteren ist bekannt, dass Chlorid- und Sulfationen die Korrosion verstärken, während Bicarbonat-, Carbonat-, Hydroxid- und Calciumionen hemmend wirken. Das Ausmaß ihres Einflusses und ihre Wechselwirkungen sind jedoch noch nicht vollständig erforscht [5].

Die Flächenkorrosion ist die Ursache für die **instationäre Korrosion** mit der Bildung von „**Rostwasser**“ oder „**Braunwasser**“. Dabei tritt aus niedriglegierten Stahlleitungen nach einer Stagnationsphase von einigen Stunden braunes, trübes (partikelhaltiges) Wasser aus (siehe 3. Artikel). Durch den Austausch des Rohrinhalts (kontaminiertes Wasser und Sedimente) durch Spülen und die Anpassung der **Fließgeschwindigkeit auf > 0,1 m/s** lässt sich eine erhöhte Trübung oft verhindern.

1.4. Bestimmung der Korrosionsrate von Eisenwerkstoffen

Für die Flächenkorrosion ist der Sauerstoff im Trinkwasser das dominierende Oxidationsmittel, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Sauerstoffzehrung der Eisenkorrosion entspricht. Für Rohroberflächen, die mit Korrosionsprodukten bedeckt sind, hängt die Korrosionsrate nur von der Diffusionsgeschwindigkeit des Sauerstoffs durch die Rostschicht ab. Die Sauerstoffzehrung entspricht der Korrosionsrate des Metalls, die wiederum direkt proportional zum Sauerstoffgehalt des Wassers ist [3]. Bei fließendem Wasser beeinflussen die Fließgeschwindigkeit und die Temperatur den Übergang des gelösten Sauerstoffs an die Rohroberfläche. Bei kontinuierlichem Durchfluss ist die Sauerstoffkonzentration im Wasser an der Korrosionsoberfläche weitgehend konstant. Bei Stagnation nimmt sie ab, so dass auch die Sauerstoffzehrung abnehmen sollte. Mit steigender Temperatur nimmt die Viskosität des Wassers ab und der Diffusionskoeffizient für Sauerstoff in der Korrosionsschicht zu, so dass die Korrosionsrate ansteigt. Der Diffusionskoeffizient für Sauerstoff durch eine bestimmte Korrosionsschicht hängt auch von anderen Faktoren ab, wie z. B. der Schichtdicke, den Mineralien, aus denen die Schicht besteht, und ihrer Porosität.

Die **Korrosionsrate**, d.h. die vom Korrosionssystem pro Flächen- und Zeiteinheit verbrauchte Sauerstoffmenge, kann aus der **Sauerstoffdifferenzmessung** in einem Versuchsrohr bestimmt werden. Dazu wird die zuvor permanent mit Wasser durchströmte Rohrleitung auf Kreislaufbetrieb umgeschaltet und die Abnahme des Sauerstoffgehaltes in Abhängigkeit von der Zeit gemessen und ausgewertet [4,6,7,8]. **Aus der (negativen) Steigung der Sauerstoffkonzentrationszeitkurve sowie den spezifischen geometrischen Eigenschaften des Versuchsrohres und dem Volumen der Kreislaufapparatur kann die Korrosionsrate des Werkstoffes ermittelt werden.** Dabei gilt für Eisenwerkstoffe die Stöchiometrie nach Gleichung 1, wobei ein vernachlässigbarer Anteil an Eisen(II)-Verbindungen angenommen wird.



Bei einer molaren Masse des Eisens von 55,85 g/mol und einer molaren Masse des Sauerstoffs von 32 g/mol werden drei Mol (96 g) Sauerstoff benötigt, um vier Mol (223 g) Eisen zu zwei Mol (319 g) Eisen(III)-oxid zu oxidieren. Erfolgen die Sauerstoffmessungen in bestimmten Zeitabständen, z.B. alle 10 min, so werden die Differenzen zwischen den nachfolgenden und den vorhergehenden Messungen gebildet und auf 1 Stunde normiert: Durch Mittelung erhält man die **Sauerstoffzehrung pro Stunde** (Einheit: mg/(l*h)). Diese kann durch Multiplikation mit dem stöchiometrischen Faktor 0,55847, bezogen auf ein zirkulierendes Volumen von 10 l (0,01 m³) und einer Innenfläche des Versuchsrohres von 1 m², in die **Eisenkorrosionsrate** mit der Einheit g/(m²*d) umgerechnet werden. **Eine EXCEL-Tabelle zur Datenerfassung und Berechnung der Korrosionsparameter ist auf Anfrage erhältlich.**

Es ist bekannt, dass sich die Korrosionsrate mit jedem Temperaturanstieg um 20 °C verdoppelt oder verdreifacht, was einer Steigerung von 5–10 % pro Grad Celsius entspricht [9]. Daher ist es wichtig, die Temperatur der Testrohre während der Stagnationsphase möglichst konstant zu halten. Dies ist in der Praxis schwierig, insbesondere bei größeren Rohrdurchmessern. In diesem Fall müssen die Anfangstemperatur des Stagnationstests und der durch den Sauerstoffsensor erzeugte

Temperaturanstieg bestimmt werden. Sind Veränderungen im Wasser zu erwarten, empfiehlt es sich außerdem, den pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit zu messen.

1.5 Eisenabgaberate und Trübungsrate

Die Metallabgabe ist die Differenz zwischen dem korrodierten Metall und dem in der Korrosionsschicht eingelagerten Metall. Untersuchungen haben gezeigt, dass es keinen allgemein gültigen Zusammenhang zwischen der Korrosionsrate und der Metallabgaberate gibt [3,10]. Die **Eisenabgaberate** kann somit nur durch eine **zeitabhängige Probenahme und Bestimmung des Eisens** im Kreislaufwasser ermittelt werden. Das gelöste Eisen in (mg/l) kann durch Multiplikation mit dem stöchiometrischen Faktor 0,024, bezogen auf ein Kreislaufvolumen von 1 l über 1 h bei einer Innenfläche des Versuchsrohres von 1 m², in die **Eisenabgaberate** mit der Einheit g/(m²*d) umgerechnet werden. Die Untersuchung einer einzelnen Probe am Ende der Stagnationsphase birgt jedoch Unsicherheiten, und die Analyse einer großen Anzahl von Proben ist zeitaufwändig und kostspielig. Daher wurde die Zunahme der Trübung über die Zeit, also die Trübungsrate, mit der Einheit FNU/h bestimmt. Dabei steht FNU für „Formazin Nephelometrische Einheiten“ und ist gleichbedeutend mit nephelometrischen Trübungseinheiten (NTU).

Für die meisten Wässer besteht ein direkter linearer Zusammenhang zwischen Trübung und Eisengehalt. Bei pH-Werten über 6,5 beruht dieser Zusammenhang auf der Hydrolyse der gebildeten Eisen(III)-Spezies zu festem, fein verteiltem (kolloidalem) Eisen(III)-hydroxid-oxid gemäß dem Pourbaix-Diagramm für Eisen [9]. Durch Auftragen der Trübungswerte über die Zeit lässt sich die Trübungsrate bestimmen sowie der Zeitpunkt abschätzen, an dem der Grenzwert von 1,0 FNU überschritten wird.

1.6. Instationäre Korrosion

Der Begriff „instationäre Korrosion“ wurde von F. Kuch [6] eingeführt, um die visuell erkennbare Bildung von Korrosionsprodukten im Wasser während der Stagnation in ungeschützten Stahl- und Gusseisenrohren zu beschreiben, die in englischsprachigen Ländern als „Kuch-Mechanismus“ der Rot oder Braunwasserbildung [3] bekannt ist. Die gleichmäßige Oberflächenkorrosion kommt in stagnierendem Wasser aufgrund des sinkenden Sauerstoffgehalts zum Erliegen und macht einem anderen Korrosionsprozess Platz: An der Oberfläche der Korrosionsschicht wird das schwerlösliche γ -Eisen(III)-oxid-hydroxid (Lepidokrokit) zu Eisen(II) reduziert, welches anschließend in das Wasser übergeht. Dies entspricht einer Reduktion des Deckschichtmaterials. Zeitgleich finden an der Grenzschicht zwischen Metall und Korrosionsschicht entsprechende Oxidationsprozesse statt. Durch den vorhandenen Sauerstoff im Wasser wird das Eisen(II) schnell oxidiert und es kommt zur Ausfällung von braunen Eisen(III)-oxid-Hydroxiden. Zunächst ist ein Anstieg der Trübung messbar. Wird durch Zufluss von frischem Wasser Sauerstoff nachgeliefert, führt es zu einem hohen Eisengehalt und visuell zu braunem Wasser. Dass nicht alle Kombinationen von Wasser und Rohrmaterialien instationäre Korrosion zeigen, wird auf die unterschiedliche Zusammensetzung der Deckschichten zurückgeführt. Insbesondere die Anwesenheit von Lepidokrokit wird dabei als problematisch angesehen, während α -Eisen(III)oxid-hydroxid (Goethit) die instationäre Korrosion weniger unterstützt.

Es gibt jedoch auch mehrere Untersuchungen, deren Ergebnisse zusammengeführt wurden und die belegen, dass eine Änderung der Wassereigenschaften zu erhöhter Braunwasserbildung führt [3]. So steigt mit dem Kohlensäuregehalt und der Verringerung des pH-Wertes die Eisenfreisetzungsrate, während sie mit steigender Hydrogencarbonat-Konzentration abnimmt. Das Dissoziationsgleichgewicht der Kohlensäure ist also ein wichtiger Faktor. Andere Untersuchungen haben gezeigt, dass auch Änderungen der Sulfatkonzentration die instationäre Korrosion fördern [11].

2. Versuch zur Bestimmung der Korrosionsrate und der instationären Korrosion

2.1. Beschreibung

Änderungen der Wassereigenschaften können also die Korrosion ungeschützter niedriglegierter Stahlrohre in einem Versorgungsnetz erheblich beeinflussen. In diesem Fall wurde die Unterbrechung der Korrosionsinhibitor-Dosierung untersucht. Zu diesem Zweck wurde die Leitung zunächst mit inhibiertem Wasser betrieben und anschließend auf nicht inhibiertes Wasser umgestellt. Während des **Durchflussbetriebs** wurde der Rohrabschnitt kontinuierlich durchströmt, während der **Stagnationsphase** der Durchfluss gestoppt wurde. Um Veränderungen im Stagnationswasser zu überwachen, wurde dieses mit einer separaten Pumpe im geschlossenen Kreislauf mit geringer Durchflussrate umgewälzt. Die Umwälzung sollte die Stagnation nur geringfügig stören und wurde bereits in der Literatur beschrieben [6,7,8].

2.2. Versuchsaufbau

Im Jahr 2016 wurden zwei Abschnitte einer Stahlrohrleitung aus dem Trinkwasserverteilungsnetz entnommen. Die 1940 verlegte, niedriglegierte Stahlrohrleitung hatte einen Durchmesser von 100 mm (DN 100) und war 1978 mit einer dünnen Zementschicht versehen worden (**Abbildung 1a**). Ihr Innendurchmesser betrug 0,084 Meter, was einer Oberfläche von 0,44 Quadratmetern entspricht. Die Rohrabschnitte wurden in einen temperierten Raum des Wasserwerks transportiert, wo sie inspiziert und bis zum Beginn der Anpassungsphase eine Woche später feucht gehalten wurden. Dies diente dazu, das Austrocknen der Korrosionsschicht zu verhindern. Anschließend wurden Flansche mit Reduzierstücken auf 3/4-Zoll-Anschlüsse an die Rohrabschnitte montiert (**Abbildung 1b**). Mithilfe dieser Flansche wurden die Rohrabschnitte über Schläuche mit dem Testwasserzulauf und -ablauf verbunden.



(a)



(b)

Abbildung 1. (a) DN 100 Stahlrohr bei Anlieferung, (b) sequenzielle Anordnung von 2 * 1 m DN 100 Stahlleitungen.

Das geschlossene System umfasste eine Peristaltikpumpe (Ismatec BVP, Glattbrugg, Schweiz) mit einer Förderleistung von 50 l/h und ein Inline-Trübungsmessgerät (Sigrist Aquascat 2P, Ennetbürgen, Schweiz) mit einem Messbereich von 0 bis 100 FNU und einer Auflösung von 0,001 FNU. Die Trübungsmessungen erfolgten gemäß DIN EN ISO 7027- 1 [12] bei 880 nm und einem Einfallswinkel von 90°. Elektroden für die elektrische Leitfähigkeit (LF), den pH-Wert und eine Optode für Sauerstoff wurden in einer luftdichten 1,5-l-Kunststoff-Durchflusszelle eingebaut, die gleichzeitig als Puffervolumen

diente. Die In-situ-Parameter wurden mit einem Multi 3430 IDS gemessen und aufgezeichnet, an dem die Sensoren TetraCon® 925 (LF), SenTix® 980P (pH) und FDO® 925 (Sauerstoff) von WTW, Weinheim, Deutschland, angeschlossen waren. Sauerstoff wurde gemäß DIN ISO 17289 [13], LF gemäß DIN EN 27888 [14], pH gemäß DIN EN ISO 10523 [15] und Temperatur gemäß DIN 38404-4 [16] gemessen. Proben für die Analyse von Gesamteisen wurden unmittelbar nach Ende der Stagnation aus der Durchflusszelle entnommen und mit 5%iger Salpetersäure angesäuert. Die Elementanalyse erfolgte gemäß DIN EN ISO 17294-2 [17] mit einem Agilent 7900 ICP-MS und der Software MassHunter 4.2 (Agilent Technologies Germany GmbH & Co., Waldbronn, Deutschland).

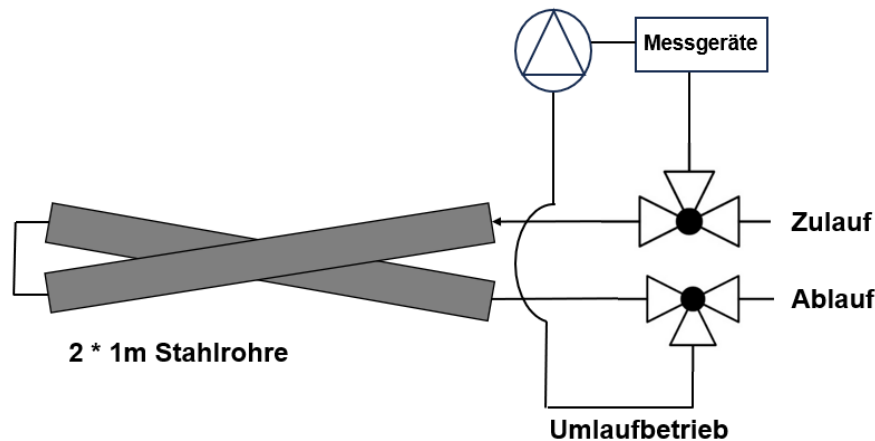


Abbildung 2. Versuchsaufbau für die beiden gekoppelten Stahlrohre für Durchflussbetrieb und Kreislaufbetrieb.

Die Schläuche des geschlossenen Kreislaufsystems bestanden aus 8 x 1 mm Silikon (Innendurchmesser x Wandstärke). Die beiden Rohre waren in einem Winkel von 20° angeordnet, um das Ausspülen fester Korrosionsprodukte zu erleichtern. Der Auslass des ersten Rohrs war mit dem Einlass des zweiten Rohrs verbunden, wodurch eine geeignete, sequenzielle Anordnung entstand ([Abbildung 2](#)). Das Zulaufwasser wurde aus dem Wasserwerk vor der Inhibitor dosierung entnommen, das Ablaufwasser im Durchflussbetrieb entsorgt.

Zwei Dreiwegeventile, je eines am Einlass und am Auslass, ermöglichten es, den kontinuierlichen Durchfluss zeitweise zu unterbrechen und mithilfe einer Schlauchpumpe in den geschlossenen Kreislaufbetrieb zu wechseln. In diesem Betrieb waren ein Trübungsmesser und eine Durchflusszelle mit Sensoren zur Messung von Sauerstoff, elektrischer Leitfähigkeit, pH-Wert und Temperatur integriert. Die Testanlage hatte ein Gesamtvolumen von 18,5 Litern. Die Daten der Sensoren und des Trübungsmessers wurden aufgezeichnet, gespeichert und später ausgewertet.

2.3. Versuchsdurchführung

Zur Einstellung des Gleichgewichts in den Testrohrabschnitten wurde die Testanlage 106 Tage lang mit inhibiertem Wasser betrieben, das 1 mg/l Ortho-/Polyphosphat (1:1) enthielt, entsprechend dem Wasser im Verteilnetz. Anschließend wurde das System auf inhibitorfreies Wasser umgestellt, mit einer Ausnahme aufgrund erhöhter Trübung und Sauerstoffaufnahme (siehe Kapitel 2.4). (siehe [Kapitel 2.4](#)). Ab dem 102. Tag des inhibitorfreien Betriebs wurden Stagnationsexperimente bis zum 600. Tag durchgeführt.

Wie [Tabelle 1](#) zeigt, wies das inhibitorfreie Testwasser eine chemische Zusammensetzung auf, die der DIN EN 12502-5 [1] entsprach. Dies deutet auf eine gleichmäßige Korrosion und die Bildung einer Schutzschicht im Inneren des Rohrs hin.

Das Wasser kann als hart, gut mineralisiert und im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befindlich beschrieben werden.

Tabelle 1. Chemische Analyse des Testwassers (Mittelwert aus 4 Proben).

Parameter ¹	Mittelwert	DIN EN 12502-5
pH-Wert	7,47	>7
Sauerstoff [mg/L]	6,7	>2,8
Elektrische Leitfähigkeit [μ S/cm]	754	-
Basekapazität bis pH 8,2 [mmol/l]	0,39	-
Säurekapazität bis pH 4,3 [mmol/l]	4,2	-
Hydrogencarbonat [mg/l]	256	>122
Kohlendioxid, frei [mg/l]	17	-
Calcium [mg/l]	95,5	>44
Magnesium [mg/l]	13,2	-
Natrium [mg/l]	32,6	-
Kalium [mg/l]	4,0	-
Nitrat [mg/l]	15	-
Sulfat [mg/l]	72,8	-
Chlorid [mg/l]	61,5	-
Phosphat, gesamt [mg/l]	< 0,08	-
Gesamter Organischer Kohlenstoff (TOC) [mg/l]	0,30	-

¹ Die angewandten Methoden entsprachen den deutschen Standardmethoden zur Untersuchung von Wasser, Abwasser und Klärschlamm.

Insgesamt wurden 29 Stagnationsexperimente ausgewertet. In-situ-Parameter und die Trübung des Testwassers wurden während jedes Experiments gemessen; die Ergebnisse sind in [Tabelle 2](#) dargestellt. Die Schwankungen des Sauerstoffgehalts (46 %) und des pH-Werts (4,6 %) wurden hauptsächlich durch die Wasseraufbereitung, einschließlich Ozonisierung und Belüftung, verursacht. Die Schwankungen der elektrischen Leitfähigkeit (19 %) und der Temperatur (27 %) waren auf Veränderungen der Eigenschaften des Rohwassers zurückzuführen. Die Temperaturschwankungen umfassten die Unterschiede zwischen Sommer und Winter und beeinflussten auch die Sauerstofflöslichkeit. Während des Testzeitraums entsprach die durchschnittliche Temperatur des Testwassers der durchschnittlichen Temperatur des Wassers im Versorgungsnetz ($14,9 \pm 1,5$ °C).

Tabelle 2. In-situ-Parameter und Trübung des Zulaufwassers.

Parameter ¹	Anzahl der Versuche	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
Temperatur [°C]	29	12,2	16,1	14,7	15,0
pH-Wert	29	7,23	7,57	7,40	7,39
Sauerstoff [mg/L]	29	5,7	9,1	7,00	7,23
Elektrische Leitfähigkeit [μ S/cm]	29	681	826	762	762
Trübung [FNU]	29	0,010	0,26	0,070	0,069

¹ Die angewandten Methoden entsprachen den deutschen Standardmethoden zur Untersuchung von Wasser, Abwasser und Klärschlamm.

Der Durchfluss betrug unter bei kontinuierlichem Betrieb bei 300 l/h, was einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,011 m/s in der DN-100-Leitung entspricht. Diese Fließgeschwindigkeit liegt im typischen Bereich für das Versorgungsnetz. Die berechnete Reynolds-Zahl betrug 818 und lag damit unter der Grenze von 2300 für den Übergangsbereich zu einer turbulenten Strömung. Im Closed-Loop-Modus wurde die Schlauchpumpe mit einer Förderrate von 30 l/h betrieben.

2.4. Ergebnisse und Interpretation

Die Untersuchung der Stahlrohre ergab eine ungleichmäßige, 5 bis 10 mm dicke Korrosionsschicht an der Innenseite, auf der sich einzelne Pusteln und einige, größere Rostaufwüchse befanden (siehe [Abbildung 1a](#)). Die später aufgebrachte Zementschicht war nicht mehr erkennbar.

Während des Durchflussbetriebs wurden im Testrohr keine Trübungsanomalien beobachtet. Das Abwasser wies eine geringe Trübung auf, die der Zulauftrübung ähnlich war (siehe [Tabelle 2](#)).

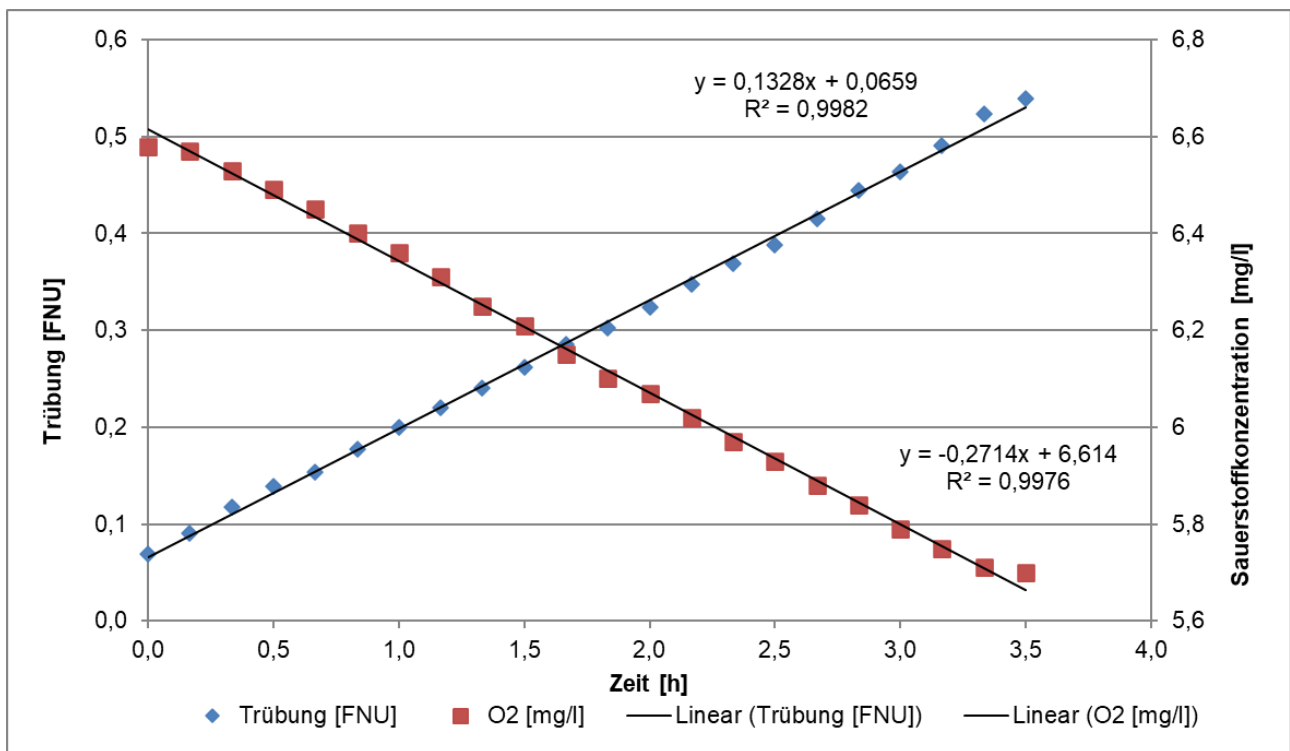


Abbildung 3. Stagnationsmessung nach 103 Tagen.

Wie im Experiment an Tag 103 ([Abbildung 3](#)) zu sehen ist, führen Stagnationsphasen von mehreren Stunden zu einem linearen Anstieg der Trübung durch Eisenfreisetzung und zu einem linearen Abfall der Sauerstoffkonzentration durch Eisenkorrosion. Dieses Verhalten wurde auch in der Literatur beschrieben [8]. Die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert zeigten hingegen keine signifikanten Veränderungen. Bei Stagnationsexperimenten stieg die Temperatur des zirkulierenden Wassers in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der Dauer der Stagnation.

Mit zunehmender Stagnationsdauer wurde der Trinkwassergrenzwert von 1,0 FNU überschritten, wie die letzte Messung an Tag 600 zeigt (siehe [Abbildung 4](#)).

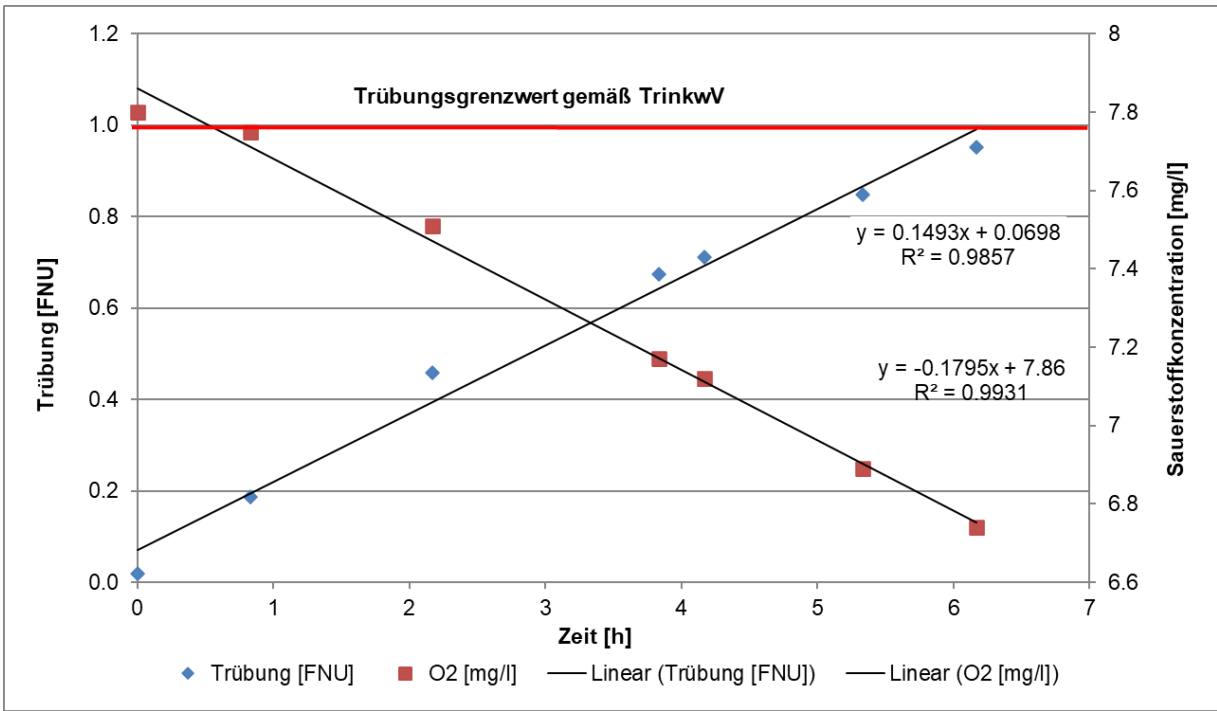


Abbildung 4. Stagnationsmessung nach 600 Tagen.

Die Betriebsparameter für die Stagnationsversuche nach 103 und 600 Tagen sind in [Tabelle 3](#) aufgeführt.

Tabelle 3. Ausgangsbedingungen der Stagnationsversuche aus [Abbildungen 3](#) und [Abbildung 4](#).

Betriebs- tage	Temperatur [°C]	pH-Wert	Elektrische Leitfähigkeit [µS/cm]	Sauerstoff [mg/l]	Trübung [FNU]
103	16,1	7,24	760	6,58	0,070
600	13,0	7,51	717	7,80	0,018

Die Korrosionsparameter mit zugehörigen Fehlern für die beiden Versuche sind in [Tabelle 4](#) dargestellt. Die Korrosions-, Trübungs- und Eisenfreisetzungsraten sind vergleichbar.

Tabelle 4. Korrosionsparameter der Stagnationsexperimente aus [Abbildung 3](#) und [Abbildung 4](#).

Betriebs- tage	Temperatur- anstieg [°C]	Sauerstoff- zehrung [mg/(l*h)]	Korrosions- rate [g/(m²* d)]	Trübungs- anstieg [FNU/h]	Eisen, gesamt im Umlaufwasser [mg/l]	Eisenabgabe- rate [g/(m²* d)]
103	0,4	0,27 ± 0,01	0,64 ± 0,03	0,133 ± 0,003	0,107 (3,5 h)	0,031 ± 0,003
600	1,3	0,18 ± 0,03	0,42 ± 0,06	0,16 ± 0,03	0,223 (6,2 h)	0,036 ± 0,003

¹ Zur Fehlerschätzung wurden die Standardabweichungen mit dem statistischen Faktor 3 multipliziert.

Ein komplexes Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Sauerstoffverbrauchs- und Trübungsmessungen aller Stagnationsexperimente (siehe [Abbildung 5](#)). Vom 102. bis zum 175. Tag lag der Sauerstoffverbrauch zwischen 0,218 und 0,326 mg/(L*h). Anschließend stieg er am 209. Tag auf 0,383 mg/(L*h) an und blieb am 251. und 280. Tag auf diesem Niveau. Am 286. Tag wurde als Gegenmaßnahme eine Spülung mit 500 l/min

durchgeführt, um die Partikel zu entfernen. Dies führte jedoch in der Folge zu einem erhöhten Sauerstoffverbrauch (Daten nicht dargestellt). Nach einer Phosphatierung (50 mg/l Phosphat für 24 Stunden) am 292. Tag stabilisierte sich der Sauerstoffverbrauch und sank langsam ab, ohne dass weitere Maßnahmen ergriffen wurden, bis am 454. Tag wieder die Ausgangswerte erreicht waren.

Die Trübungsrate sank zunächst von 0,171 FNU/h am Tag 102 auf 0,049 FNU/h am Tag 175 (siehe [Abbildung 5](#)). Anschließend stieg die Trübungsrate parallel zum Sauerstoffverbrauch an. Nach der Phosphatierung mit 50 mg/L schwankte die Trübungsrate stark und erreichte am 505. Tag ihr Maximum. Danach sank die Trübung wieder und erreichte zum Ende der Studie ihren Ausgangswert.

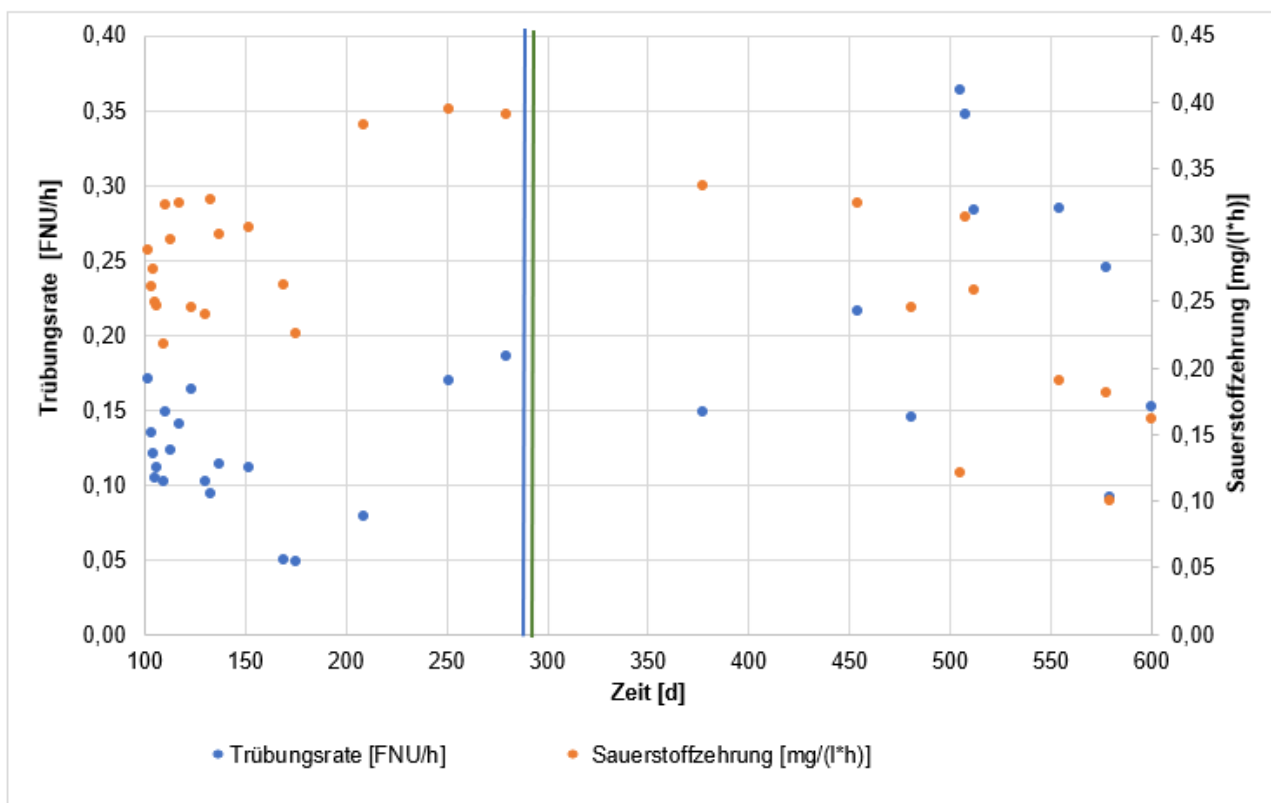


Abbildung 5. Entwicklung der Sauerstoffzehrung und der Trübungsrate während der Versuchsphase für die beiden verbundenen DN 100 St-Rohre im inhibitorfreien Betrieb mit blauer Linie (Spülung) und grüner Linie (Phosphatierung).

Historische Experimente aus dem Jahr 2004 mit neuen niedriglegierten Stahlrohren vor der Einführung von Korrosionsinhibitoren ergaben nach etwa vier bis fünf Monaten Betriebsdauer eine Korrosionsrate von ca. 2,0 g/(m²*d) Eisen im nicht inhibierten Trinkwasser. Die Eisenfreisetzungsrate blieb während dieses Zeitraums mit ca. 0,75 g/(m²*d) Eisen nahezu konstant. Durch die Verwendung einer Inhibitormischung (1 mg/l *ortho*-Phosphat, 1 mg/l *poly*-Phosphat und 4 mg/l Silikat) sank die Korrosionsrate auf ca. 0,2 g/(m²*d) [18]. Verglichen mit dem historischen Wert mit Inhibitor ist die Korrosionsrate am Ende des Testzeitraums ohne Inhibitor etwa doppelt so hoch, liegt aber immer noch in derselben Größenordnung.

Die historische Eisenfreisetzungsrates ohne Inhibitor betrug etwa $0,7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ und sank nach Zugabe des Inhibitors deutlich [18]. In der vorliegenden Studie blieb die Eisenfreisetzungsrates mit etwa $0,03 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ nahezu konstant und lag damit deutlich niedriger als in einer früheren Studie. Dies könnte auf das vor 15 Jahren in die Trinkwasseraufbereitung integrierte Belüftungssystem zurückzuführen sein. Diese Aufbereitungsstufe reduziert den Kohlendioxidgehalt und erhöht den pH-Wert sowie die Sauerstoffkonzentration, wodurch die Eisenfreisetzungsrates verringert wird.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass die Inhibitor dosierung schrittweise reduziert werden konnte, die Eisenkonzentration jedoch an verschiedenen Stellen im Trinkwasserverteilungsnetz überwacht werden sollte. Dementsprechend wurde die Dosierung wurde über drei Jahre reduziert und anschließend eingestellt. Rückblickend lässt sich feststellen, dass die Entscheidung richtig war und keine Korrosionsprobleme bei niedriglegierten Stahlrohren auftraten, sofern die Betriebsbedingungen, insbesondere die Fließgeschwindigkeit von $> 0,1 \text{ m/s}$, eingehalten wurden.

Lassen sich weitere Schlussfolgerungen hinsichtlich der Abhängigkeit der Korrosion von Wasserparametern ziehen?

Wie erwartet, wurde eine starke Korrelation ($R^2 = 0,8945$) zwischen der Eisenkonzentration im stagnierenden Wasser und dessen Trübung bis zu 1,7 FNU festgestellt (siehe [Abbildung 6](#)). Diese Korrelation wird erreicht, wenn die Probenahme unmittelbar nach dem Stagnationsexperiment und vor der Koagulation des kolloidalen Eisenoxidhydroxids zu größeren Partikeln und Sedimentation erfolgt. Wie in [Abbildung 6](#) dargestellt, entspricht der Trübungsgrenzwert von 1,0 FNU einem Eisengrenzwert von $0,200 \text{ mg/l}$ für das untersuchte Wasser. Eine ähnliche Korrelation mit einem R^2 -Wert von 0,82 wurde zwischen der Farbe und dem Gesamteisengehalt gefunden [5].

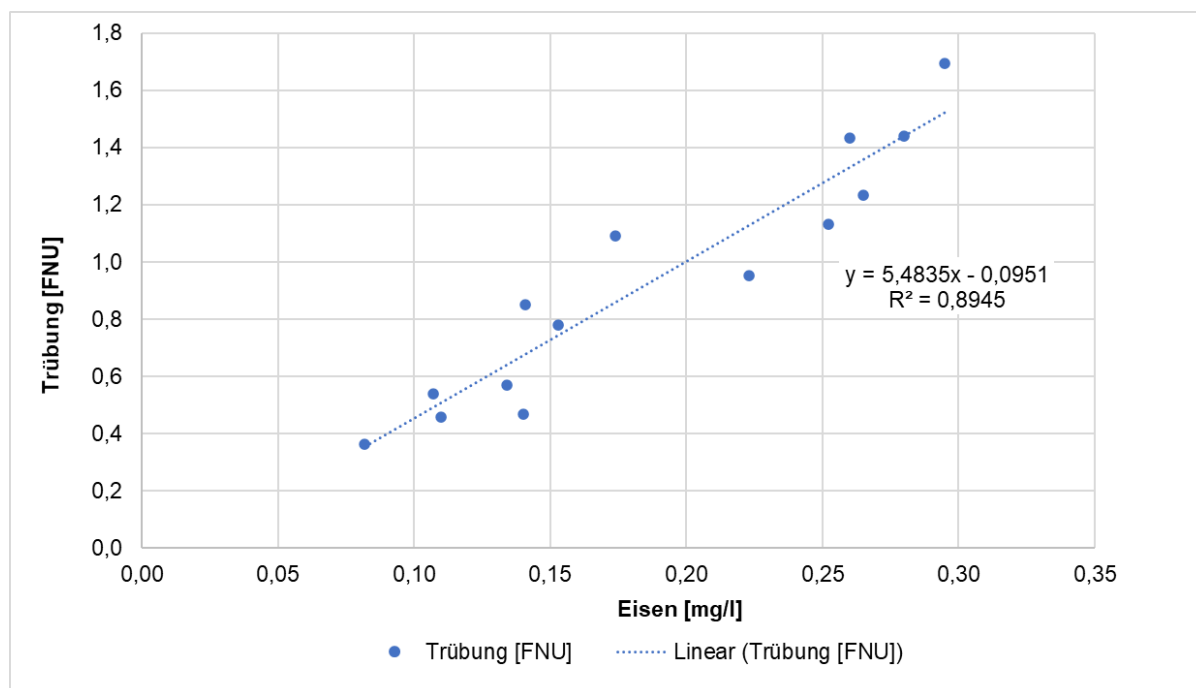


Abbildung 6. Abhängigkeit der Trübung von der Eisenkonzentration Kreislaufwasser.

Die Korrelation zwischen Gesamteisen und Trübung ist jedoch nicht präzise genug, um die Eisenfreisetzungsrates anhand der Trübung zu bestimmen. Daher wurden zur

Bestimmung der Eisenfreisetzungsraten stattdessen gemessene Eisenkonzentrationen herangezogen.

Die Trübungsmessung kann ohne aufwendige Probenvorbereitung einfach und schnell durchgeführt werden, um zu prüfen, ob das Wasser die gesetzlichen Anforderungen erfüllt. Die Analytik des Parameters Eisen ist dagegen deutlich zeitaufwendiger, da eine Probenvorbereitung erforderlich ist. Zudem lässt sich die Trübungsmessung für die Online-Überwachung nutzen.

Interessanterweise wurde eine schwache negative Korrelation zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der Trübungsrate mit einem R^2 -Wert von 0,4493 festgestellt (siehe [Abbildung 7](#)). Dies deutet darauf hin, dass die Eisenfreisetzung mit steigender Leitfähigkeit in diesem Wasser abnimmt. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass Calcium und Bicarbonat die Eisenkorrosion stärker hemmen, als Chlorid und Sulfat sie fördern (siehe [Kapitel 1.3](#) und [19]).

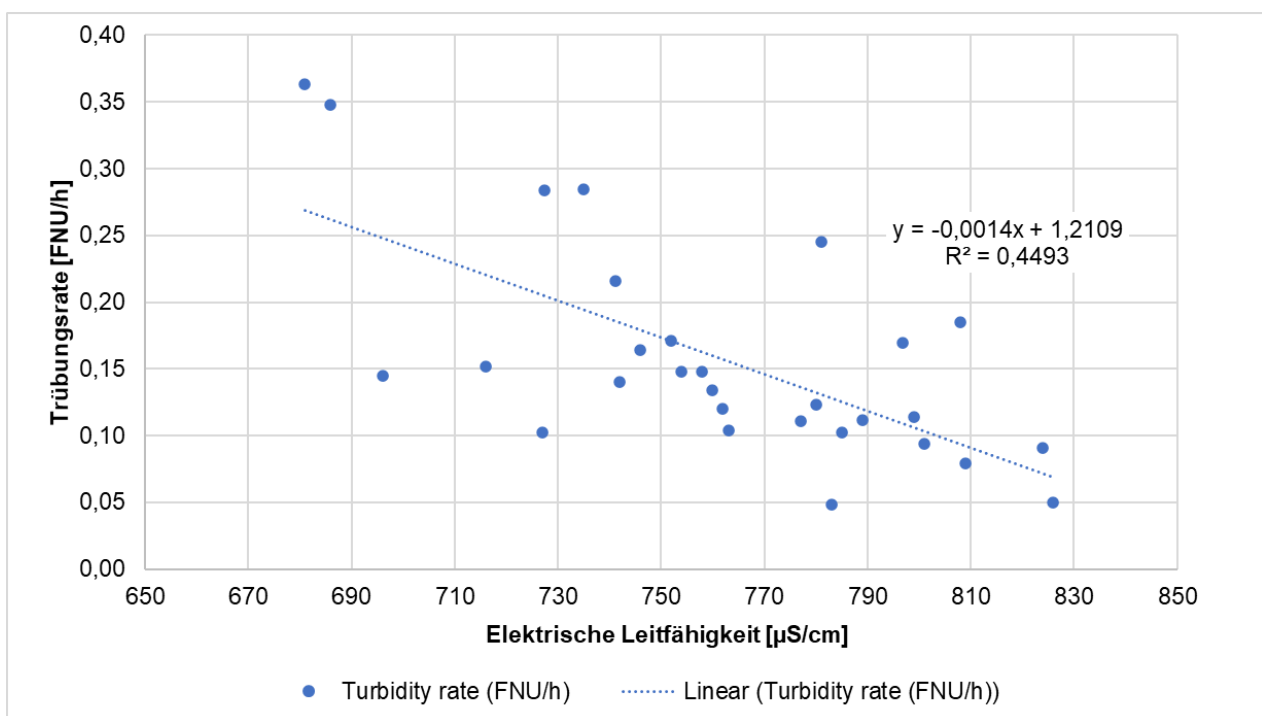


Abbildung 7. Abhängigkeit der Trübungsrate vom Temperaturanstieg.

3. Zusammenfassung

Eine Untersuchung eines alten, niedriglegierten Stahlrohres aus dem Versorgungsnetz zeigte, dass das Absetzen des Inhibitors in diesem Fall nur ein geringes Risiko darstellt. So wies das Testrohr zwischen Tag 102 und 600 ohne Inhibitor keine signifikante Erhöhung der Korrosions- oder Eisenfreisetzungsraten auf. Dies kann auf die verbesserten korrosiven Eigenschaften des Trinkwassers zurückzuführen werden, die durch den Einbau einer Belüftungsanlage in der Wasseraufbereitungsanlage resultiert. Die Auswertung der Wasserproben ergab, dass die Inhibierung schrittweise reduziert werden sollte, während die Eisenkonzentration an verschiedenen Stellen im Trinkwasserverteilungsnetz überwacht werden musste. Bei der entsprechenden Umsetzung traten keine gravierenden Probleme mit ungeschützten, niedriglegierten Stahlrohren auf.

Die Trübungsraten ergaben, dass der Trinkwassergrenzwert von 1,0 FNU nach etwa sechs Stunden Stagnation überschritten werden kann. Unter stabilen

Betriebsbedingungen steigt die Trübung linear mit der Zeit an. Unter ungünstigen Bedingungen, beispielsweise nach einer Spülung, kann der Anstieg verstärkt sein. Der Spülvorgang muss als Störung des gesamten Korrosionssystems betrachtet werden. Auf Basis der Untersuchungen von Wasser und unlegiertem Stahl kann geschlossen werden, dass das Absetzen der Inhibitor dosierung keine Probleme verursacht. Bei der Entscheidung über das Beenden einer bestehenden Inhibitor dosierung sollten jedoch auch andere Werkstoffe wie verzinkter Stahl, Kupfer und Messinglegierungen berücksichtigt werden.

Die Daten zeigen eine lineare Korrelation zwischen der Eisenkonzentration und der Trübung in stagnierendem Wasser. Im untersuchten Wasser entsprach eine Trübung von 1,0 FNU einer Eisenkonzentration von ca. 0,200 mg/l. Diese Korrelation kann für eine schnelle Bewertung oder Online-Messungen genutzt werden.

Im untersuchten Wasser wurde zudem ein umgekehrter Zusammenhang zwischen Korrosionsrate und elektrischer Leitfähigkeit beobachtet. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass Calcium und Bicarbonat eine stärkere korrosionshemmende Wirkung haben als Chlorid und Sulfat, welche die Korrosion beschleunigen.

Die Stagnationsversuche konnten den Einfluss der Temperatur auf die Korrosionsrate nicht ermitteln. Laut Literaturangaben steigt die Korrosionsrate um etwa 5–10 % pro Grad Celsius [9]. Aufgrund des Klimawandels ist zukünftig selbst bei kürzeren Stagnationszeiten mit einer Zunahme der Korrosion ungeschützter Stahl- und Gusseisenrohre zu rechnen. Diese Zunahme könnte zu instationärer Korrosion und zur Bildung von Braunwasser führen und Probleme mit den Trinkwasserleitungen verursachen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Versorgungsleitungen in geringer Bodentiefe verlegt sind, in der Nähe von Fernwärmeleitungen liegen oder wenn die Bodentemperaturen klimatisch stark erhöht sind. Daher sollten Versorger die Korrosion ungeschützter, unlegierter oder niedriglegierter Stahlrohre als Gefahr für die Trinkwasserqualität betrachten und die Korrosionsproblematik in ihre Risikomanagementpläne aufnehmen. Zu den Gegenmaßnahmen gehören die Auskleidung von Rohren, wie beispielsweise eine Zementbeschichtung oder das Inlining, sowie der Austausch gegen korrosionsbeständige Leitungsmaterialien. Auch die Betriebsbedingungen sind von Bedeutung, insbesondere die Einhaltung einer Fließgeschwindigkeit von $> 0,1$ m/s. In der Zwischenzeit wird eine kontinuierliche Überwachung der Trübung an zentralen Knotenpunkten des Versorgungsnetzes empfohlen.

4. Fazit

Die finanziellen und personellen Kosten des oben beschriebenen einfachen Korrosionstests sind relativ gering. Er liefert jedoch wertvolle Informationen über das Verhalten des Korrosionssystems bei veränderten Wassereigenschaften. Diese Informationen sind erforderlich, um die Risiken von Veränderungen der Wassereigenschaften durch Belüftung, Enthärtung oder Entsalzung bewerten zu können und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Der nächste Artikel befasst sich mit der Bestimmung der Kupferlöslichkeit von neuen Kupferleitungen in der Trinkwasserinstallation.

Finanzierung

Diese Studie wurde durch einen Wasserversorger extern finanziert.

Danksagung

Die Autoren danken allen, die zu dieser Arbeit beigetragen haben, Herrn Detlef Schroden für die ICP-MS Analytik, sowie dem Gutachter für seine wertvollen Anregungen.

KI-Unterstützung

Für die Textverarbeitung dieses Artikels wurden Google Translate und DeepL Write verwendet.

Literatur

1. DIN EN 12502-5:2005-03 Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und speichersystemen - Teil 5: Einflussfaktoren für Gusseisen, unlegierte und niedriglegierte Stähle, DIN Media GmbH, Berlin, Deutschland.
2. Schaffland, R. *Eigenschaften duktiler Gußrohre*, EADIPS FGR Guss-Rohrsysteme, **2018**, 52, 44–99.
3. AWWA Research Foundation. *Internal Corrosion of Water Distribution Systems*, 2nd Edition; American Water Works Association, Denver, 1996.
4. Kölle, W.; Sontheimer, H., Untersuchungen zur Schutzschichtbildung in Gussrohren, *Vom Wasser* **1977**, 49, 277–294.
5. Imran, S., Dietz, J., Mutoti, G., Taylor, J., Randall A., Cooper, C. Red water release in drinking water distribution system, **2005**, J. AWWA, **97**(9), 93–110.
6. Kuch, A.; Sontheimer, H.; Wagner, I. Die Messung der Aufeisung im Trinkwasser – Ein neues Verfahren zur Beurteilung von Deckschichten in schwarzen Stahlrohren. *Materials and Corrosion* **1983**, 34 (3), 107–111.
<https://doi.org/10.1002/maco.19830340304>.
7. Prakash. T.M., Scholze, R.J., Neff, C.H., Maloney, S.W., Heath, M., Smith, E.D. Development of a Pipe Loop System for Determining Effectiveness of Corrosion Control Chemicals in Potable Water Systems **1988**, U. S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL, USA. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-D103-PURL-gpo50403/pdf/GOVPUB-D103-PURL-gpo50403.pdf>, aufgerufen am 09.01.2026.
8. Lohmann, M.; Korth, A. Bewertung der Wirkung von Korrosionsinhibitoren im Verteilungsnetz **2018**, 82, 1, *Veröffentlichungen aus dem Technologiezentrum Wasser*, ISSN 1434-5765.
9. Katz, W. Eisen und Stähle in Tödt, F. *Korrosion und Korrosionsschutz*; 1961, Walter de Gruyter & Co., Berlin, Germany
10. Kuch, A. Investigations of the reduction and re-oxidation kinetics of iron(III) oxide scales formed in waters. *Corrosion Science* **1988**, 28 (3), 221–231. [https://doi.org/10.1016/0010-938x\(88\)90106-0](https://doi.org/10.1016/0010-938x(88)90106-0)
11. Kölle, W.; Streb, O.; Böttcher, J. Denitrifikation in einem reduzierenden Grundwasserleiter, *Vom Wasser*, **1983**, 61, 125–147.
12. DIN EN ISO 7027-1:2016-11 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Trübung - Teil 1: Quantitative Verfahren (ISO 7027-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 7027-1:2016, DIN Media GmbH, Berlin, Deutschland.
13. DIN ISO 17289:2014-12 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des gelösten Sauerstoffs - Optisches Sensorverfahren (ISO 17289:2014), DIN Media GmbH, Berlin, Deutschland.
14. DIN EN 27888:1993-11 Wasserbeschaffenheit; Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (ISO 7888:1985); Deutsche Fassung EN 27888:1993, DIN Media GmbH, Berlin, Deutschland.
15. DIN EN ISO 10523:2012-04 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Werts (ISO 10523:2008); Deutsche Fassung EN ISO 10523:2012, DIN Media GmbH, Berlin, Deutschland.
16. DIN 38404-4:1976-12 Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C); Bestimmung der Temperatur (C 4), DIN Media GmbH, Berlin, Deutschland.
17. DIN EN ISO 17294-2:2017-01 Wasserbeschaffenheit - Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) - Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope (ISO 17294-2:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17294-2:2016, DIN Media GmbH, Berlin, Deutschland.
18. Klinger, J., Wagner, I., Lambert, R., Konrad, N., Irmscher, R. Die Wasserversorgung von Düsseldorf – Ein Beispiel für den sinnvollen Einsatz von Korrosionsinhibitoren, *gwf Wasser | Abwasser* **2004**, 145 (5), 351–358.
19. Larson, T.E.; Skold, R.V. Studies Relating Mineral Water Quality of Water to Corrosion of Steel and Cast Iron, *Corrosion Laboratory–NACE*, **1958**, 14 (6), 285–288, aufgerufen am 09.01.2026.
[https://files01.core.ac.uk/download/pdf/158322616.pdf#:~:text=T%20h%20e%20accelerative%20effect%20of%20chlorides,at%20pH%207%20to%208%20\(Figure%201.\)](https://files01.core.ac.uk/download/pdf/158322616.pdf#:~:text=T%20h%20e%20accelerative%20effect%20of%20chlorides,at%20pH%207%20to%208%20(Figure%201.))