



Korrosionskontrolle in der Trinkwasserverteilung mit einfachen Methoden

Teil 6: Versuche zur Bestimmung der Korrosionsrate und der Abgabe von Kupfer

Norbert Konradt, Monika Konradt, Detlef Schroden und Peter Janknecht, Trinkwasser Consulting

Zusammenfassung: Korrosion von Kupfer oder Kupferlegierungen hat negative Auswirkungen auf die Haltbarkeit von Leitungsbauteilen sowie auf die Trinkwasserqualität in den entsprechenden Leitungen. In diesem Artikel werden mehrere Methoden zur Untersuchung dieser Aspekte vorgestellt. Zunächst wird eine vereinfachte Methode zur Bestimmung der Kupferabgabe von Bauteilen an benetzendes Wasser erläutert. Mit dieser Methode können die Korrosionsrate, die Abtragsrate und die Bildungsrate der Deckschicht ermittelt werden. Zweitens wird ein Versuch mit einem genormten Prüfstand gemäß DIN EN 15664-1 zur Beurteilung der Eignung von Kupferrohren und Rohrverbindern aus Kupferlegierungen für ein bestimmtes Trinkwasser vorgestellt. Zwar ist dessen Anwendung aufwendig, er liefert jedoch relevante Informationen zur Eignung von Kupfer und Kupferlegierungen im Kontakt mit Trinkwasser. Der Versuch ist bei korrodierenden Metallwerkstoffen für die behördliche Notifizierung sowie bei Unsicherheiten hinsichtlich der Werkstoffeignung mit einem örtlichem Trinkwasser vorgesehen. Zudem wird eine vergleichbare, vereinfachte Methode mit einer im Durchfluss betriebenen Kreislaufapparatur präsentiert. Dabei wird ein Kupferrohr wöchentlich unter Stagnationsbedingungen untersucht, um das Stagnationsverhalten und die Kupferabgabe zu ermitteln. Die beiden vereinfachten Verfahren können mit geringem personellen und finanziellem Aufwand im Labor durchgeführt werden und liefern wertvolle Erkenntnisse zur Kupferkorrosion und zur Kupferabgabe an das Trinkwasser.

Stichwörter: Deckschichtbildungsrate, Flächenkorrosion, Korrosionsrate, Kreislaufapparatur, Kupferabgabe, Kupferabtragsrate, Kupferfreisetzung, Kupferkorrosion, Sauerstoffkorrosion, Stagnationsversuch.



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/>).

1. Einsatzbereiche von Kupfer in der Trinkwasserinstallation

Kupfer und Kupferlegierungen wie Messing sind aufgrund ihrer guten Verarbeitungseigenschaften und geringen Korrosionsneigung beliebte Materialien in der Trinkwasserinstallation. Obwohl Kupfer als edles Metall gilt, ist es in sauerstoffhaltigem Trinkwasser nicht stabil und korrodiert. Die dabei entstehende Flächenkorrosion führt dazu, dass permanent Kupfer an das Wasser abgegeben wird. Dabei wird der Grenzwert von 2 mg/l gemäß Trinkwasserverordnung (TrinkwV) nach 16 Wochen Betriebszeit meist nicht überschritten [1]. Welche Werkstoffe in der Trinkwasserinstallation eingesetzt werden können und welche wasserseitigen Bedingungen gelten müssen, ist in der „Bewertungsgrundlage für metallene Werkstoffe im Kontakt mit Trinkwasser“ des Umweltbundesamtes (UBA) festgelegt. **Für Trinkwasserrohre aus Kupfer wird hochreines, sauerstoffarmes Kupfer mit einem Gehalt von $\geq 99,90\%$ gefordert.** An das

Trinkwasser werden zudem folgende Anforderungen gestellt: **pH $\geq 7,4$ oder $7,0 \leq \text{pH} < 7,4$ sowie ein Wert für den gesamten organischen Kohlenstoff (TOC) von $\leq 1,5 \text{ mg/l}$.**

Grundlage für diesen Einsatzbereich war eine empirische Untersuchung bei deutschen Wasserversorgern. Dem gegenüber nennt Norm DIN EN 12502-2 [2] folgende Faktoren, die die Korrosionswahrscheinlichkeit für die Flächenkorrosion im Trinkwasser beeinflussen:

- **die Konzentrationen der Kohlensäurespezies, (Kohlendioxid, Hydrogencarbonat und Carbonat), erfassbar über den gesamten anorganischen Kohlenstoff (TIC),**
- **die Stagnationsdauer,**
- **die Betriebsbedingungen,**
- **und das Alter der Installation.**

Dies deutet darauf hin, dass der gesamte anorganische Kohlenstoff und der pH-Wert – welcher die Konzentrationen der Kohlensäurespezies bestimmt – die für Kupfer korrosionsbestimmenden Parameter sind. Die gleichmäßige Flächenkorrosion in Wasser gilt als gering, wenn der pH-Wert über 7,5 liegt und die Hydrogencarbonat-Konzentration 1,0 mmol/L übersteigt.

Gemäß den Vorgaben der TrinkwV gilt ein pH-Wert von $\geq 6,5$ und $\leq 9,5$ sowie eine Calcitlösekapazität von weniger als 5 mg/l, berechnet nach DIN 38404-10.

Für Wasserversorger besteht keine Verpflichtung geeignete Rohrwerkstoffe zu benennen. Allerdings muss der Wasserversorger den Verbrauchern nach § 46 Untersuchungsergebnisse gemäß DIN EN 12502-1 zur Verfügung stellen, die eine Werkstoffauswahl ermöglichen. Wasserversorgern wird empfohlen, das Korrosionsverhalten von Kupfer zu untersuchen, da sie für auftretende Schäden haftbar gemacht werden könnten. Die Bewertungsgrundlage für metallene Werkstoffe des UBA [4] besagt zudem, dass bei der Werkstoffauswahl spezifische Prüfergebnisse zur Kupferfreisetzung für das jeweilige Versorgungsgebiet berücksichtigt werden müssen, sofern diese vorliegen. Auch diese Daten müssten von Versorger zur Verfügung gestellt werden.

2. Korrosionsprüfungen von Kupfermaterialien

Man unterscheidet zwischen innerer und äußerer Korrosion. Die innere Korrosion wird durch den Kontakt des Metalls, beispielsweise Kupfer, mit dem salz- und sauerstoffhaltigen Trinkwasser verursacht. Die äußere Korrosion resultiert aus der Einwirkung der jeweiligen Umweltbedingungen (Luft, Feuchtigkeit, Erdreich, Baumaterialien und Schadstoffe) auf die Außenseite der Leitung. In der Trinkwasserinstallation ist meist nur die Innenkorrosion relevant. Ungünstige Außenbedingungen für Kupferleitungen liegen jedoch bei erhöhter Feuchtigkeit sowie bei direktem Kontakt mit Gipsmaterialien vor, da diese aufgrund ihres hohen Sulfatgehalts korrodierend wirken. In diesen Fällen müssen die Kupferrohre vor Kontakt geschützt werden.

2.1. Prüfungen nach geltenden Normen

Für die Prüfung von Kupferrohren für die Trinkwasserinstallation gibt es verschiedene Normen, die den aktuellen Stand der Technik abbilden und ständig erweitert und aktualisiert werden. Nahtlose Rundrohre aus Kupfer sind gemäß DIN EN 1057 [5] für Wasser- und Gasleitungen in Sanitär- und Heizungsanlagen geeignet. In Deutschland muss bei der Anwendung Kupfer und Kupferlegierungen in der Trinkwasserinstallation zusätzlich das DVGW-Merkblatt GW 392 [6] eingehalten werden. Die Prüfverfahren beziehen sich auf die Materialanalyse, die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften (Zugversuch, Härteprüfung, Biegeprüfung usw.) sowie auf die Bestimmung des Kohlenstoffanteils und die Kohlenstofffilmprüfung.

Neben Kupfer finden auch seine wichtigsten Legierungen Bronze, Messing und Rotguss in der Trinkwasserinstallation breite Anwendung. Armaturen, Zählergehäuse, Rückschlagventile und Pumpenlaufräder werden oft aus Bronze oder Messing hergestellt, Übergangsstücke und Fittings aus Rotguss. Sie sind in der DIN EN 1982 [7] klassifiziert. Bei Messing, einer Kupfer-Zink-Legierung ist die Entzinkung die wichtigste Korrosionsart und die Prüfung, findet mit dem zu besprechenden Prüfstand nach DIN EN 15664-1 [8] in Verbindung mit einer Exposition nach DIN EN ISO 6509-1 [9] statt. Für passive Materialien, wie beispielsweise nichtrostende Stähle gibt es andere Prüfverfahren, beispielsweise die elektrochemische Prüfung gemäß DIN EN 16056 [10].

In der Norm DIN EN 15664-1 [8] wird ein Prüfstandversuch für die Beurteilung der Abgabe von Metallen beschrieben. Diese Norm ist das Referenzverfahren für die Ermittlung der Metallabgabe für alle deckschichtbildenden Metalle und Metalllegierungen. Sie wird entsprechend auch in der Bewertungsgrundlage für metallene Werkstoffe im Kontakt mit Trinkwasser als Prüfgrundlage vorgeschrieben [4]. Gemäß DIN EN 15664-2 [11] kann damit die Eignung des Metalls oder der Legierung für die Verwendung im Trinkwasserbereich durch Prüfung mit drei Referenzwässern nachgewiesen werden, was insbesondere für die Materialhersteller wichtig ist. Andererseits kann die Eignung eines örtlichen Wassers mit zertifizierten, kommerziellen Werkstoffen untersucht werden, was für die Wasserversorger und Verbraucher von Interesse ist. Die Anwendung dieses Prüfstandversuchs nach DIN EN 15664-1 wird in [Kapitel 4](#) beschrieben.

2.2. Weitere Prüfungen zu Kupfermaterialien

Neben dem aufwendigen Normverfahren erbringen auch einfache Versuche in Durchlauf- oder Kreislaufapparaturen aussagekräftige Daten zur Bewertung der Eignung von Materialien mit einem spezifischen Wasser [12]. Ein entsprechender Versuch zur Bestimmung von Korrosionsrate, Kupferabgaberate und Deckschichtbildungsrate bei Langzeitexposition durch Untersuchung von wasserexponierten Kupfersegmenten in einer Durchflussapparatur wird in [Kapitel 3](#) vorgestellt. In [Kapitel 5](#) wird die Messung der kurzzeitigen Kupferabgabe in einer Kreislaufapparatur beschrieben. Dabei werden drei reale Trinkwässer anstelle der in DIN EN 15664-2 spezifizierten Kontaktwässer genutzt, um deren praktische Eignung für zertifizierte Kupfermaterialien zu prüfen.

3. Vereinfachter Versuch zur Bestimmung der Langzeit-Korrosionsrate von Kupferrohrsegmenten [12,13]

3.1 Beschreibung

Die Korrosionsrate kann durch den Gewichtsverlust von Kupfersegmenten ermittelt werden, die kontinuierlich in Durchflussapparaturen im zu prüfenden Wasser exponiert waren [12,13]. Der Versuch sollte über einen Zeitraum von mindestens einigen Monaten erfolgen, um eine stabile Korrosionsrate zu erreichen. Dabei sollten die Bedingungen, wie Durchfluss und Temperatur, möglichst konstant gehalten werden, da diese den Korrosionsprozess beeinflussen. Abhängig von der Fragestellung werden eine Anzahl von Rohrsegmenten aus dem gleichen Material hergestellt, gewogen und gemeinsam im zu untersuchenden Wasser exponiert. In bestimmten Zeitintervallen werden einzelne Segmente entnommen und gewogen, wobei sich das Gewicht aus dem Kupfer und der Deckschicht besteht. Diese setzt sich aus anhaftenden Korrosionsprodukten und aus dem Wasser abgeschiedenen Feststoffen zusammen. Die Deckschicht wird durch Ätzen entfernt. Dabei kann entweder der zweistufige Prozess mit Ammoniakwasser und Salzsäure [14] oder die einstufige Ätzung mit EDTA [15] zum Einsatz kommen. Beim zweistufigen Prozess werden durch Ammoniakwasser Kupfer(II)-Verbindungen gelöst, während die Salzsäure Kupfer(I)-oxid gut löst. Aus dem Gewicht des geätzten Segmentes und der Länge des Expositionsintervalls lässt sich die Korrosionsrate ermitteln. Mit den analytisch bestimmten Kupferkonzentrationen in den Ätzlösungen können die mittlere

Abtragsrate für Kupfer, die Bildungsrate der Deckschicht und der Kupferanteil in der Deckschicht ermittelt werden.

3.2. Versuchsaufbau

Die drei Durchflussapparaturen bestanden aus je einem vertikalen, Kunststoffzylinder (Länge 40 cm, Innendurchmesser 35 mm), der oben und unten mit Flanschen versehen war, die mit Deckeln und integrierten Zu- und Ablaufanschlüssen verschlossen werden konnten. Der Wasserzulauf erfolgte von unten, der Wasserablauf oben. Über ein nachgeschaltetes Versuchsrohr für Stagnationsversuche (siehe [Kapitel 5](#)), einen Durchflussmesser und einen Wasserzähler wurde das Wasser abgeleitet ([Abbildung 1](#)).

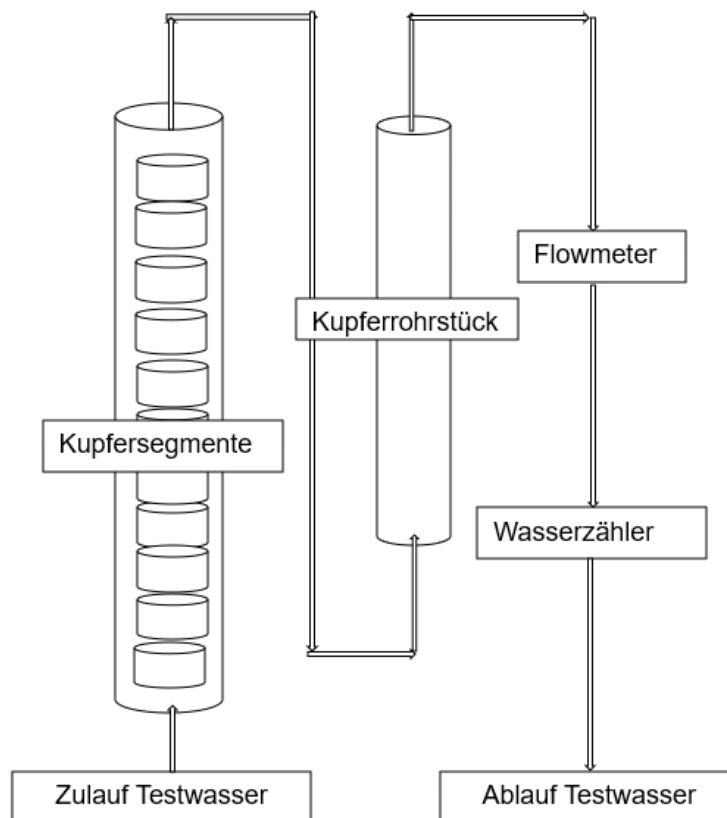


Abbildung 1. Schematischer Aufbau der Apparatur zur Exposition von Rohrsegmenten.

Drei baugleiche Testapparaturen wurden kontinuierlich mit drei verschiedenen Wässern beschickt. Um Algenwachstum zu vermeiden, wurden die Apparaturen durch lichtundurchlässige Mäntel geschützt. Der Raum war temperiert. Im Zulauf waren an drei Messstationen des Typs Liquisys M CPM253 der Fa. Endress+Hauser Messtechnik GmbH + Co. KG, Hannover, Düsseldorf zur kontinuierlichen Bestimmung des Sauerstoffgehaltes (OXYMAX W COS61), der elektrischen Leitfähigkeit (Condumax W CLS21) und des pH-Wertes (Memosens CPS11E) installiert. Die Temperatur war an allen Sensoren verfügbar. Sauerstoff wurde gemäß DIN ISO 17289 [16], LF gemäß DIN EN 27888 [17], pH gemäß DIN EN ISO 10523 [18] und Temperatur gemäß DIN 38404-4 [19] bestimmt.

Für die Gewichtsbestimmung wurde die Analysenwaage XS 204 Delta Range, Genauigkeit: 0,1 mg der Fa. Mettler Toledo verwendet.

Die Elementanalyse erfolgte gemäß DIN EN ISO 17294-2 [20] mit einem Agilent 7900 ICP-MS und der Software MassHunter 4.2 (Agilent Technologies Germany GmbH & Co., Waldbronn, Deutschland).

Die drei Testwässer stammten aus derselben Rohwasserquelle, wurden jedoch nach unterschiedlichen Verfahren aufbereitet. Wasser 1 wurde mittels Ozonung und Aktivkohlefiltration behandelt. Wasser 2 wurde ausschließlich durch natürliche Verfahren aufbereitet, darunter Belüftung, Tiefenfiltration und Aktivkohlefiltration. Wasser 3 war teilentsalzt und wurde durch Mischen und Entsäuerung von Wasser 1 mit 40 % Permeat aus einer Umkehrosmoseanlage. Die Mittelwerte der Wasserparameter sind in [Tabelle 1](#) aufgeführt.

Tabelle 1. Mittelwerte der Testwässer.

Parameter	Wasser 1 (oxidativ aufbereitet)	Wasser 2 (naturnah aufbereitet)	Wasser 3 (teilentsalzt)
Temperatur [°C]	14,8	14,0	15,8
pH-Wert	7,5	7,6	7,5
Sauerstoff [mg/l]	6,4	8,4	8,5
Elektrische Leitfähigkeit bei 25°C [µS/cm]	769	798	554
Säurekapazität [mmol/l]	3,6	3,4	2,5
Gesamthärte [mmol/l]	14	14	9,6
TOC [mg/l]	0,4	0,3	0,3
Calcium [mg/l]	83,4	83,8	56
Magnesium [mg/l]	11,8	11,8	8,0
Natrium [mg/l]	42,9	42,1	28,9
Kalium [mg/l]	4,3	4,4	3,1
Hydrogencarbonat, berechnet [mg/l]	220	207	153
Chlorid [mg/l]	85	88	58
Nitrat [mg/l]	15	13	11
Sulfat [mg/l]	61	59	41
Phosphat [mg/l]	0,2	0,1	0,2
Kieselsäure [mg/l]	8,2	7,9	5,6

3.3. Versuchsdurchführung

Aus einem nahtlosen Kupferrohr aus Cu-DHP (EN 1057, halbhart, von KME – Sanco R250) wurden dreißig Kupfersegmente zugeschnitten. Jedes Segment war 17 bis 20 mm hoch und wies einen Innendurchmesser von 26 mm sowie einen Außendurchmesser von 28 mm auf. Anschließend wurden sie entgratet, mit Pentan gereinigt, getrocknet und auf einer Analysenwaage auf 0,1 mg genau gewogen. Danach wurden sie zu jeweils zehn Stück in Plexiglassäulen übereinandergestapelt. Nach dem Verschließen der Deckel wurden die Apparaturen 207 Tage lang mit den Wässern 1 bis 3 mit einer Flussrate von 130-140 l/h drucklos durchflossen, wobei die Segmente von innen und außen turbulent umströmt wurden. Während des Versuchs betrugen die Wassertemperaturen im Mittel (15 ± 1) °C. Alle vier Wochen wurde ein Kupfersegment entnommen, 24 Stunden bei Raumtemperatur luftgetrocknet, gewogen und der Gewichtsverlust nach Exposition bestimmt.

Nach Entnahme wurden die Deckschichten aller Segmente getrennt voneinander aufgelöst (geätzt), die Segmente getrocknet und gewogen. Dazu wurden sie einzeln zuerst für 7 Minuten mit 15 ml 25%iger Ammoniaklösung behandelt und anschließend mit Deionat gespült. Die Ätzlösung wurde mit der Spüllösung vereinigt, mit Salzsäure angesäuert und im Messkolben auf 200 ml aufgefüllt. Im zweiten Schritt wurden die Segmente 6 Minuten lang mit 15 ml 32%iger Salzsäure behandelt und anschließend mit Deionat gespült. Die Ätz- und Spüllösung wurden vereinigt und im Messkolben auf

200 ml aufgefüllt. Die beiden Lösungen wurden gemäß DIN EN ISO 17294-2 [20] auf ihre Kupfergehalte untersucht. Die geätzten Kupfersegmente wurden getrocknet und gewogen, um den Kupferabtrag zu bestimmen.

3.4. Ergebnisse und Interpretation

Bereits nach einer Woche waren die zu Beginn blanken Segmente visuell mit einer rot-braunen Schicht bedeckt, die vermutlich aus Kupfer(I)-oxid bestand (Abbildung 2). Ab der fünften Woche dominierten bei den Wässern 1 und 2 hellblaue Beläge, die von Kupfer(II)-Verbindungen stammten. Die Segmente aus dem enthärteten Wasser 3 wiesen ab der siebten Woche eine ungleichmäßige Oberfläche mit streifigen Ablagerungen in Fließrichtung auf. Die Gewichtsbestimmung nach der Exposition ergab für jedes Segment einen Masseverlust. Dies belegt, dass der Kupferabtrag in das Wasser ein wichtiger Prozess ist. Um die Korrosionsrate zu ermitteln, muss die Deckschicht noch entfernt werden, da diese neben dem korrodierten Kupfer auch die Reaktionspartner, wie beispielsweise Sauerstoff und Kohlenstoff, sowie abgelagerte Mineralien aus dem Wasser, wie beispielsweise Calcit oder Huminstoffe, enthalten kann.

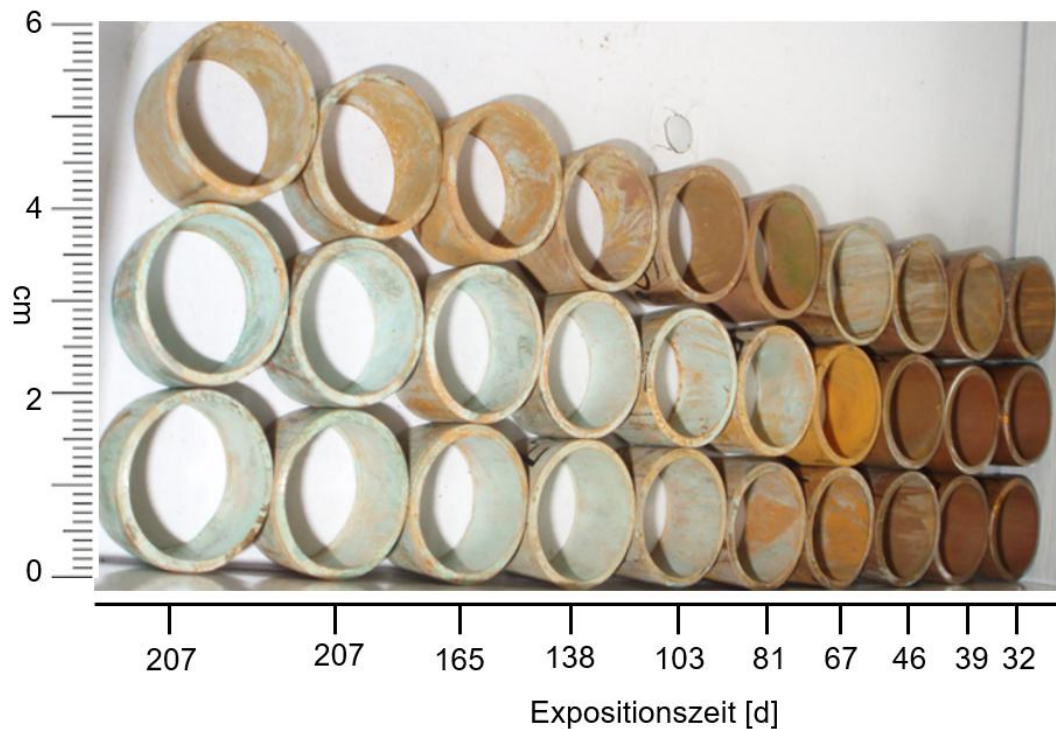


Abbildung 2. Korrodierte Kupfersegmente nach 1 bis 10 Wochen Exposition in Wasser 1 bis 3 (von unten nach oben).

Die durch Korrosion verlorene Kupfermasse ergibt sich somit als Differenz des Anfangsgewichts des Segmentes und dem Gewicht nach Korrosion und Entfernung der Deckschicht durch Ätzen (Gleichung 1). Um das Kupfergewicht in den Deckschichten zu ermitteln, wurden die Kupfergehalte der Ätzlösungen bestimmt und mit den Volumina der Ätzlösungen nach Gleichung 2 multipliziert.

$$\text{Gewichtsverlust Kupfer, Segment [g]} = \text{Gewicht Segment, Start [g]} - \text{Gewicht Segment, geätzt [g]} \quad (1)$$

$$\text{Gewicht Cu Deckschicht, Segment [g]} = \text{Konzentration Cu Ätzlösung [g/l]} \times \text{Volumen Lösung [l]} \quad (2)$$

$$\text{Gewicht Deckschicht, Segment [g]} = \text{Gewicht Segment, nach Exposition [g]} - \text{Gewicht Segment, geätzt [g]} \quad (3)$$

$$\text{Abtrag Cu Segment [g]} = \text{Gewicht Segment, Start [g]} - \text{Gewicht Kupfer Deckschicht, Segment [g]} \quad (4)$$

$$\text{Korrosionsrate Cu [g/(m}^2\text{×d)] = Gewichtsverlust}_{\text{Kupfer, Segment [g]} / (\text{Fläche}_{\text{Segment [m}^2\text{]} \times \text{Kontaktzeit [d]}} \quad (5)$$

$$\text{Abtragsrate Cu [g/(m}^2\text{×d)] = Abtrag Cu}_{\text{Segment [g]} / (\text{Fläche}_{\text{Segment [m}^2\text{]} \times \text{Kontaktzeit [d]}} \quad (6)$$

$$\text{Deckschichtbildungsrate Cu [g/(m}^2\text{×d)] = Cu}_{\text{Deckschicht, Segment [g]} / (\text{Fläche}_{\text{Segment [m}^2\text{]} \times \text{Kontaktzeit [d]}} \quad (7)$$

$$\text{Anteil Cu in der Deckschicht [\%] = (\text{Gewicht Cu}_{\text{Deckschicht, Segment [g]} / \text{Gewicht}_{\text{Deckschicht, Segment [g]}} \times 100 \quad (8)$$

Das Gewicht der Deckschicht pro Segment kann durch Differenzbildung der Gewichte der nach Exposition und Ätzen gemäß [Gleichung 3](#) errechnet werden. Der Kupferabtrag, also das mit dem Wasser abtransportierte Kupfer berechnet sich aus der Differenz der Gewichte des Segmentes beim Start und dem des Kupfers in der Deckschicht gemäß [Gleichung 4](#). Um die Korrosionsrate zu bestimmen, wird der Gewichtsverlust der Segmente auf die jeweilige Segmentfläche und die Expositionsdauer bezogen ([Gleichung 5](#)). Entsprechend werden die Abtragsrate ([Gleichung 6](#)) und die Deckschichtbildungsrate ([Gleichung 7](#)) berechnet. Nach [Gleichung 8](#) wird der Gewichtsanteil des Kupfers in der Deckschicht ermittelt. Die [Abbildung 3](#) veranschaulicht die beteiligten Stoffe und Prozesse bei der Korrosion eines Kupfersegments.

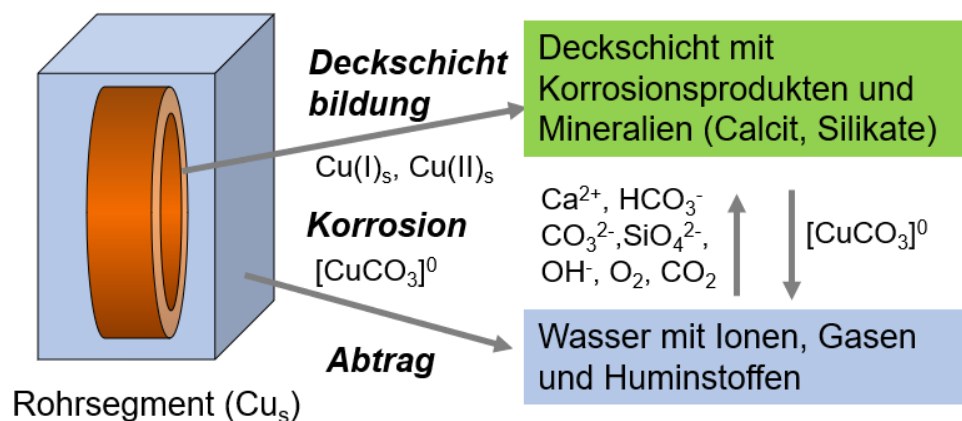


Abbildung 3. Schema der Korrosion eines Kupfersegmentes in Wasser mit beteiligten Stoffen und Prozessen, (s: Feststoff).

Die Unterschiede bei den Korrosionsraten zwischen den beiden letzten Probekörpern betrugen 4,0 % für Wasser 1, 0,1 % für Wasser 2 und 2,4 % für Wasser 3. Diese Unterschiede lassen sich allein durch die variierenden Oberflächengrößen erklären, die aus den Höhenunterschieden der Probekörper resultieren und bis zu 4,0 % betragen können; dies belegt die Reproduzierbarkeit der Bestimmung der Korrosionsrate.

Die Untersuchungen ergaben wasserspezifische Korrosionsraten in den drei Testwässern, die sich im Zeitverlauf veränderten (siehe [Abbildung 4a](#)). Selbst nach 207 Tagen (ca. 30 Wochen) waren noch keine stabilen Korrosionsraten erreicht; allerdings näherten sich die Kurven gegen Ende des Expositionszeitraums einander an und lagen im Bereich von 0,99 bis 1,15 g/(m²×d). Somit nahm der Einfluss der verschiedenen Behandlungsverfahren auf den Korrosionsprozess mit zunehmender Expositionsdauer ab. Diese Werte liegen im Bereich bekannter Korrosionskonstanten von 0,68 bis 1,86 g/(m²×d) [16]. Für Frisch- und Trinkwasser wurden weitere Werte im Bereich von 0,12 bis 0,61 g/(m²×d) berichtet [17]. Da die Korrosionsraten bei Trinkwasser abhängig von den Kohlensäureparametern und dem pH-Wert, dienen veröffentlichte Daten lediglich als Richtwerte. **Eine Korrosionsrate von 1 g/(m²×d) bei Kupfer entspricht einem Materialverlust von etwa 0,04 mm pro Jahr.** Bei den ermittelten Korrosionsraten würden Kupferrohre innerhalb von 20 Jahren 0,8 bis 1 Millimeter an Wandstärke verlieren, was ihrer Gesamtwandstärke entspricht. Die Kurvenverläufe deuten jedoch darauf hin, dass die Korrosionsraten weiter sinken werden.

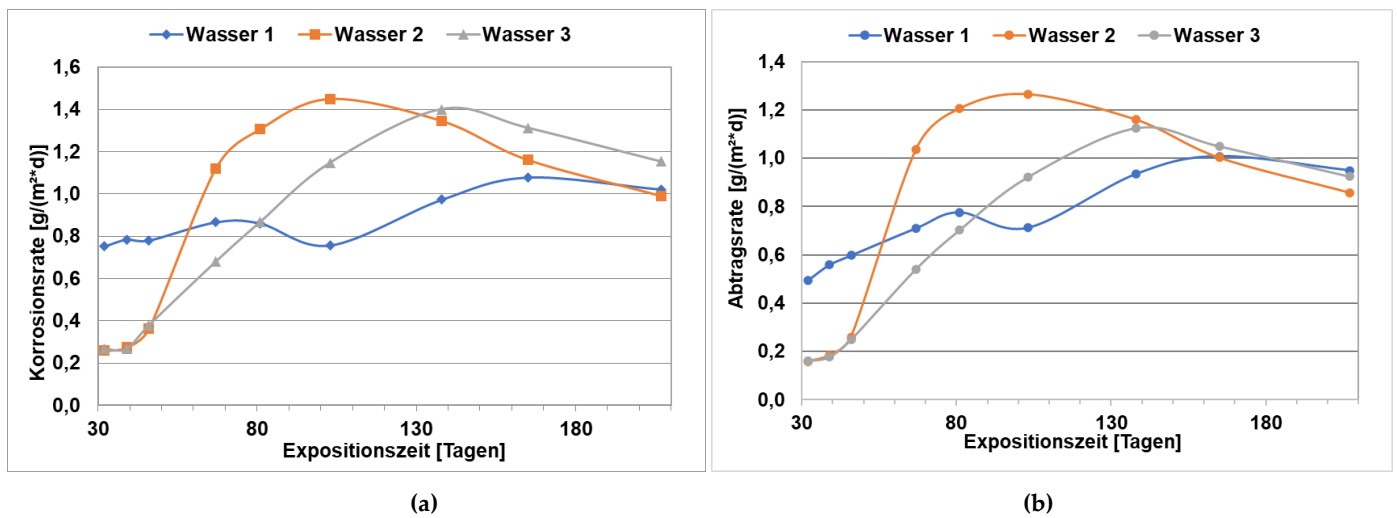


Abbildung 4. Zeitliche Entwicklung der (a) Korrosionsraten und (b) der Abtragsraten von Kupfer in drei Trinkwässern.

Die Kupferabtragsraten entsprachen im Verlauf den Korrosionsraten, waren jedoch etwas niedriger, da in der Deckschicht gebundenes Kupfer nicht berücksichtigt wurde ([Abbildung 4b](#)).

Bei Kupfer zeigten die Raten der Deckschichtbildung jedoch ein anderes Verhalten (siehe [Abbildung 5](#)). Bei dem oxidativ behandelten Wasser 1 sank die Bildungsrate von einem hohen Niveau bis zum 138. Tag ab, stieg leicht an und blieb dann konstant. Im Gegensatz dazu begannen die Bildungsraten bei Wasser 2 (natürlich behandelt) und Wasser 3 (teilentsalzt) erst am 67. Tag zu steigen. Sie erreichten ihre jeweiligen Maxima nach 103 bzw. 138 Tagen und sanken anschließend leicht ab, ohne jedoch einen Endzustand zu erreichen. Insgesamt waren die Deckschichtbildungsraten geringer als die Abtragsraten. Dies belegt, dass die Deckschichtbildung in den untersuchten Wässern ein untergeordneter Prozess ist und der Großteil des Kupfers in das Wasser übergeht.

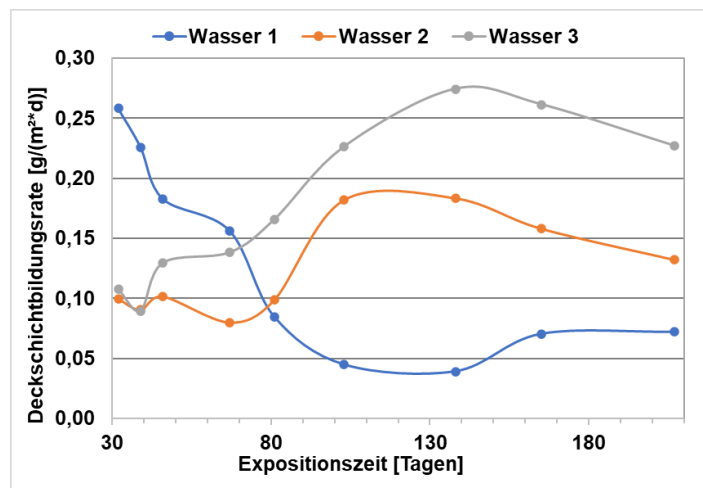


Abbildung 5. Zeitliche Entwicklung der Deckschichtbildungsraten von Kupfer in den Testwässern.

Die Raten der Deckschichtbildung waren niedriger als die Raten der Kupferabgabe. Bei Wasser 1 sank die Rate der Kesselsteinbildung im Laufe der Zeit von 34 % auf 7 %. Bei Wasser 2 verringerte sie sich von 39 % auf 13 % und bei Wasser 3 von 40 % auf 20 %. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Deckschichtbildung ein untergeordneter Prozess ist und der

Großteil des Kupfers in das Wasser übergeht. Die zunehmende Dominanz der Kupferabgabe deutet darauf hin, dass sich keine passivierende Oberflächenschicht bildet.

Der Anteile des Kupfers in den Deckschichten lässt sich nach [Gleichung 8](#) errechnen und ist für die drei Wässer in [Tabelle 2](#) aufgeführt.

Tabelle 2. Zeitliche Variation der Kupferanteile in den Deckschichten.

Exposition in Tagen	Kupferanteil in %		
	Wasser 1	Wasser 2	Wasser 3
32	32,7	37,3	39,0
39	27,7	31,8	32,6
46	22,4	26,7	33,0
67	17,4	6,9	19,6
81	9,4	7,3	18,3
103	5,7	12,1	19,0
138	3,9	13,2	18,8
165	6,3	13,1	19,2
207	6,8	12,3	18,9

Wie erwartet, nahmen die Kupfergehalte in den Deckschichten mit zunehmender Expositionsdauer ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass neben Kupfer(I)-oxid auch Kupfer(II)-Verbindungen mit einem geringeren Kupferanteil eingebaut werden. Zudem ist die Ausfällung von Calciumcarbonat und Silikaten möglich. Wäre Kupfer(I)-oxid die einzige Komponente der Deckschicht, ergäbe sich aus dem Quotienten der Molgewichte ein Anteil von 44,4%, dem der Coupon im Wasser 3 nach 32 Wochen mit 39% nahekam. Auch bei der längsten Expositionszeit im enthärteten Wasser 3 wurde der höchste Anteil an Kupfer(I)-oxid gefunden, was mit der rötlichen Farbe der Deckschicht in [Abbildung 1](#) übereinstimmt. **Die Versuche zeigen, dass der Kupfer(I)-Anteil mit abnehmender Härte des Wassers zunimmt und mit zunehmender Expositionszeit wieder abfällt.**

3.5. Zusammenfassung

Das beschriebene Prüfverfahren liefert umfassende Daten zur Kupferkorrosion bei minimalem Personal- und Materialaufwand. Anhand der über mehrere Monate durchgeführten Korrosionsversuche an Rohrsegmenten lassen sich die Korrosionsrate, die Abtragsrate sowie die Rate der Deckschichtbildung ermitteln. Das Verhältnis dieser Größen gibt Aufschluss darüber, ob die Korrosionsschicht passivierend wirkt. Zudem lassen sich Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Deckschicht ziehen. Darüber hinaus können die Kupfersegmente einer visuellen oder mikroskopischen Untersuchung unterzogen werden. **Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Korrosionsrate nicht konstant ist, sondern von den Eigenschaften des Wassers, der Kupferoberfläche, den Betriebsbedingungen und insbesondere dem Alter der Kupferrohre abhängt.**

4. Bestimmung der Kupferabgabe gemäß DIN EN 15664-1

4.1 Beschreibung

Die DIN EN 15664-1 beschreibt die Auslegung und den Betrieb einer Anlage zur Korrosionsprüfung von korrodierenden Metallen und Legierungen [8]. Im Anschluss an die Prüfung kann die Metallfreisetzung aus korrodierenden metallischen Werkstoffen gemäß den Metallbewertungskriterien des UBA (Anhang 1) [4] bewertet werden. Die Prüfung simuliert das Entnahmeverhalten in einer Trinkwasserinstallation für vier Personen; dies erfolgt durch einen Betriebszyklus, bei dem sich Stagnations- und

Entnahmephasen abwechseln. Die Prüfung umfasst die parallele Untersuchung von drei Prüfrohren. Gemäß der Norm muss die Prüfung bei einer Raumtemperatur von $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ und einem Wasserdruck von mindestens 3 bar durchgeführt werden. Um die Anforderungen – insbesondere hinsichtlich der Probenahme – zuverlässig zu erfüllen, ist ein mikroprozessorgesteuerter Prüfstand erforderlich, der die Ventile für den Wasserdurchfluss in den Prüfrohren und Leitungen steuert sowie die Vorgänge protokolliert.

Gemäß DIN EN 15664-1 werden die Metallkonzentrationen im Kontaktwasser nach 4, 8, 12, 16, 21 und 26 Wochen bestimmt. Hierzu werden die Konzentrationen von acht Proben für die jeweiligen Stagnationszeiten analysiert (zwei Proben nach 0,5 und einer Stunde sowie je eine Probe nach 2, 4, 8 und 16 Stunden). Anschließend werden die mittleren Elementkonzentrationen (MEPa(T)) der drei Rohre berechnet.

Zusätzlich zu diesen vollständigen Probenahmen werden während des gesamten Prüfzeitraums wöchentlich Proben nach vier Stunden Stagnation aus jeder Prüf- und Kontrollleitung entnommen und analysiert. Für die untersuchten Elemente werden anschließend die arithmetischen Mittelwerte aus den drei Rohrleitungen berechnet.

MEP(T) -Werte sind von Bedeutung, da sie auf mehreren Proben basieren und jeder Wert durch die grafische Darstellung der Metallkonzentrationen in Abhängigkeit von der Stagnationszeit verifiziert werden kann (siehe [Kapitel 4.4](#)). Andererseits lässt sich anhand der wöchentlichen Entwicklung der Metallkonzentrationen in den Proben nach vierstündiger Stagnation erkennen, ob der Referenzwert für ein bestimmtes Metall nach einer gewissen Betriebsdauer eingehalten wird. Enthält die Kontrollleitung aus Edelstahl (DIN EN 10088-1, Werkstoff-Nr. 1.4401) gelöste Metalle, so sollten diese aus dem Testwasser stammen. In diesem Fall müssen die Werte der Stagnationsproben korrigiert werden. Des Weiteren legt die Norm DIN EN 15664-1 Höchstwerte für Kupfer, Eisen, Mangan und Zink im Prüfwasser fest.

Die Bewertungskriterien des Umweltbundesamtes (UBA) für Metalle definieren Referenzwerte für Elemente, die von den in der EU-Trinkwasserrichtlinie (DWD) festgelegten Parameterwerten abweichen. So beträgt beispielsweise der Referenzwert für Kupfer 1,8 mg/l, während der Parameterwert bei 2,0 mg/l liegt.

Gemäß den Metallbewertungskriterien des UBA [4] sind Kupferrohre bei einem Referenzwert von 1,8 mg/l Kupfer und einem Gewichtungsfaktor von $A = 1$ für das lokale Wasser geeignet, sofern die beiden Kriterien A und B erfüllt sind:

Kriterium A gilt als sicher erfüllt, wenn:

(I) der Mittelwert MEPa(T) $\leq 1,8$ mg/l für die Probenahmezeitpunkte (T) bei 16, 21 und 26 Wochen beträgt.

Kriterium B gilt als sicher erfüllt, wenn die Elementkonzentration nicht wieder ansteigt. Eine der folgenden Anforderungen muss erfüllt sein:

(II) der MEPa(T) sinkt innerhalb der Paare von Probenahmezeitpunkten {12, 16}, {16, 21} und {21, 26} Wochen ab; oder

(III) eine Ausgleichsgerade für 4-h-Stagnationsproben nach der 12. Woche zeigt keinen steigenden Trend; oder

(IV) der Mittelwert der 4-h Stagnationsproben für die Wochen 16 bis 26 ist kleiner oder gleich der halben Referenzkonzentration (0,9 mg/l für Kupfer).

Falls Kriterium B nicht erfüllt ist, kann die Prüfung auf bis zu ein Jahr verlängert werden.

4.2. Versuchsaufbau

Für die Versuche wurde ein Prüfstand gemäß DIN EN 15664-1 vom DVGW-Technologiezentrum Wasser in Karlsruhe verwendet. Der Prüfstand wurde für jedes Wasser mit zwei parallelen Prüfrohren aus Kupfer sowie jeweils einer Kontrollleitung aus Edelstahl aufgebaut. Der entsprechende Korrosionsprüfstand ist in [Abbildung 6](#)

dargestellt. Er enthielt zusätzlich Prüfleitungen für Messingprüfstücke aus unterschiedlichen Legierungen, über deren Ergebnisse hier nicht berichtet wird.

Die Kupferrohre gemäß DIN EN 1057 [5] hatten bei einer Länge von 5 m und einem Innendurchmesser von 13 mm eine Innenfläche von 0,204 m² sowie ein Volumen von 0,663 l.



Abbildung 6. Korrosionsprüfstand gemäß DIN EN 15664-1 des TZW, Karlsruhe.

4.3. Versuchsdurchführung

Nach der Montage und dem Spülen wurde der Prüfstand eingehend auf Dichtheit und Funktionsfähigkeit überprüft. Anschließend wurde die Anlage mit jeweils zwei Rohren pro Wasserqualität – anstelle der in der Norm DIN EN 15664-1 vorgesehenen drei Rohre – in Betrieb genommen und über einen Zeitraum von 28 Wochen betrieben; dabei wurde jedes Testrohr täglich mit 145 Liter Testwasser beaufschlagt. Es kamen dieselben drei Wasserqualitäten zum Einsatz wie im ersten Versuch (siehe Tabelle 1). Während der Versuchsdauer entsprach die Durchschnittstemperatur der Prüfwässer (15 ± 1 °C) den Anforderungen der Norm.

Im Rahmen dieses Tests wurde die Kupferfreisetzung durch Analyse des Kontaktwassers in automatisch entnommenen Proben untersucht. Die Metallkonzentrationen in den Kontaktwasserproben wurden nach einer Betriebsdauer von 4, 8, 12, 16, 20, 24 und 28 Wochen bestimmt, was geringfügig von der Norm abweicht. Zusätzlich wurde für jedes Rohr wöchentlich eine 4-h Stagnationsprobe auf dasselbe Elementspektrum hin untersucht.

Nach jeder automatisierten Probenabmesequenz wurden die Proben mit Salpetersäure stabilisiert. Die anschließende Elementanalyse erfolgte gemäß DIN EN ISO 17294-2 [20] mit einem Agilent 7900 ICP-MS und der Software MassHunter 4.2 (Agilent Technologies Germany GmbH & Co., Waldbronn, Deutschland). In dieser Versuchsreihe wurden die Stagnationsproben auf die Konzentrationen von Kupfer, Phosphor, Silicium und weiteren zur Wassercharakterisierung relevanten Elementen

untersucht. Da die Proben der Referenzleitungen keine signifikanten Kupferkonzentrationen enthielten, war keine Korrektur nötig.

4.4. Ergebnisse und Interpretation

Der Korrosionsprüfstand arbeitete störungsfrei. Die zeitlichen Konzentrationsverläufe von MEPn(T) wurden anhand der acht Konzentrationen der Probenabmesequenz erstellt (siehe [Abbildung 7](#)). Die arithmetischen Mittelwerte der Kupferkonzentrationen (MEPa(T)) wurden aus den beiden MEPn(T)-Werten der beiden Testrohre berechnet.

Stagnations-zeit [h]	Cu im Wasser 2, Rohr 2.1 [mg/l]	Cu im Wasser 2, Rohr 2.2 [mg/l]	Cu im Wasser 3, Rohr 3.1 [mg/l]	Cu im Wasser 3, Rohr 3.2 [mg/l]
0.5	0.61	0.59	1.02	1.02
0.5	0.57	0.56	0.96	0.96
1	0.98	0.93	1.6	1.61
1	1.11	1.07	1.8	1.78
2	1.57	1.53	2.63	2.64
4	2.46	2.38	3.66	3.86
8	3.17	3.1	4.24	4.35
16	3.16	3.57	4.1	3.7
MEPn(T)	1.70	1.72	2.50	2.49
MEPa(T)	1.71		2.50	

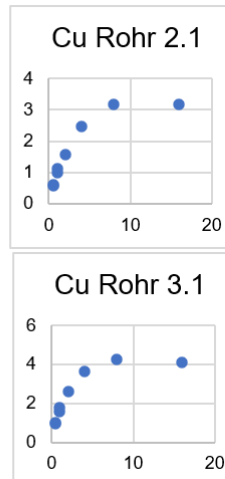


Abbildung 7. Beispielrechnung der MEPn(T)- und MEPa(T)-Werte für die Wässer 2 und 3 nach 16 Wochen Betriebsdauer. Die Stagnationskurven zeigen auf der Abszisse die Zeit in Stunden und auf der Ordinate die Kupferkonzentration in mg/l.

Die zeitliche Entwicklung der MEPa(T)-Werte für die drei Testwässer ist in [Abbildung 8](#) dargestellt. Die erhöhte Kupferfreisetzung während der ersten Wochen ist deutlich erkennbar. Nach 16 Wochen lag lediglich Wasser 2 unter dem Referenzwert; Wasser 1 und Wasser 3 unterschritten diesen nach 20 Wochen. Nach 24 Wochen wies Wasser 3 den niedrigsten MEPa(T)-Wert auf. **Gemäß Kriterium A I war nur Wasser 2 für die Verwendung mit Kupferrohren geeignet.**

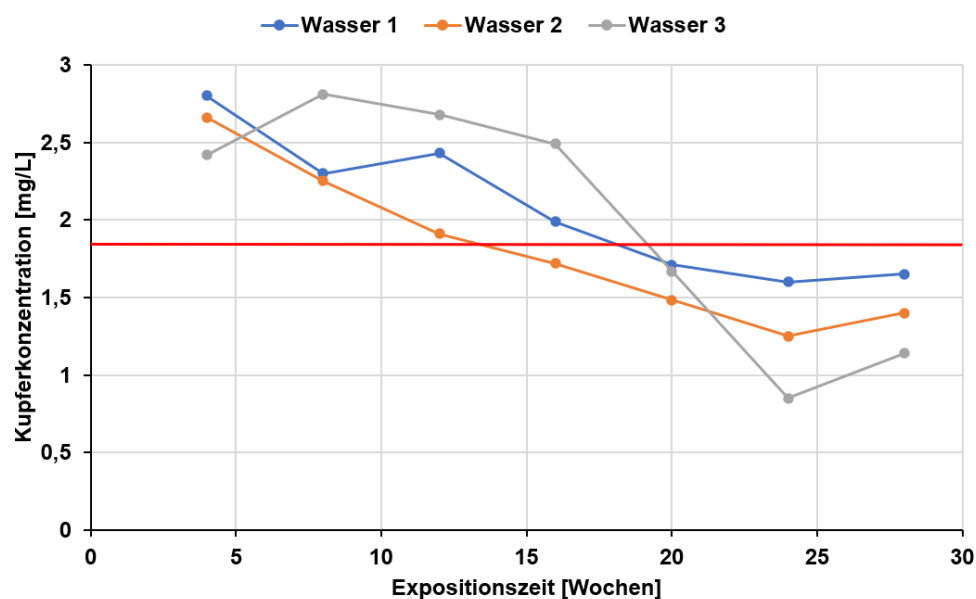


Abbildung 8. Grafische Darstellung der arithmetischen Mittelwerte für Kupfer gemäß DIN EN 15664-1; rote Linie: Referenzwert gemäß UBA [4].

Für das Kriterium B II wurden die MEPa(T)-Werte für Wasser 2 ab der 12. Woche paarweise verglichen. Während die Trends für die Paare {12, 16}, {16, 20} und {20, 24} fallend waren, stieg der Trend für {24, 28} an. **Somit erfüllte Wasser 2 das Kriterium B II nicht.**

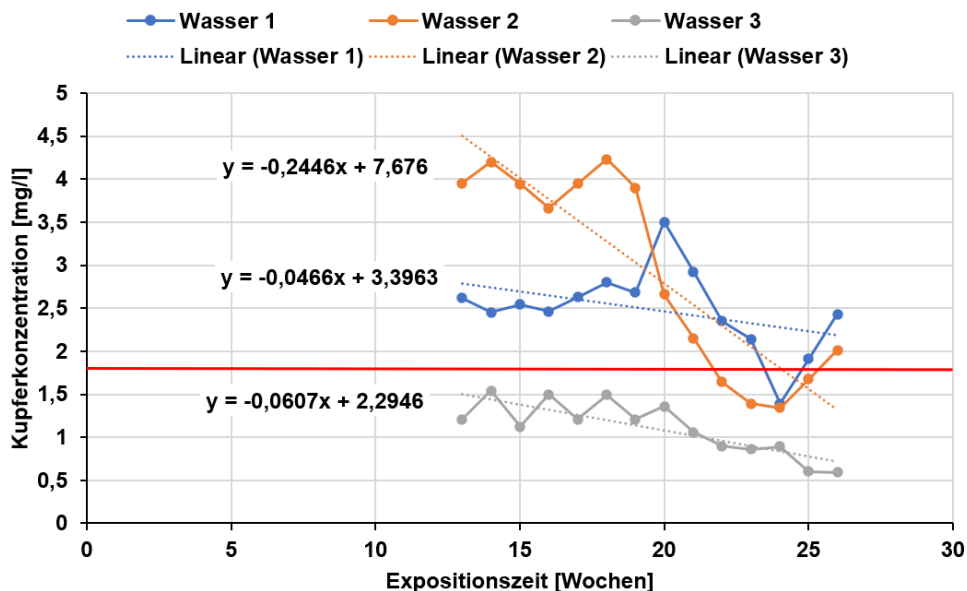


Abbildung 9. Grafische Darstellung von 4-Stunden-Stagnationsproben > 12 Wochen gemäß UBA-Bewertung; rote Linie: Referenzwert gemäß UBA.

Gemäß Kriterium B III lässt sich der Trend der mittleren 4-Stunden-Stagnationskonzentrationen beurteilen, wie in [Abbildung 9](#) dargestellt. **Die Kurve für Wasser 2 wies ab der 13. Woche eine negative Steigung aus und erfüllte somit das Kriterium B III.**

Alternativ kann Kriterium B IV zur Bewertung von Wasser 2 herangezogen werden. Der Mittelwert der zwischen der 16. und 26. Woche entnommenen 4-Stunden-Proben betrug 1,07 mg/L. Dieser Wert liegt über der Hälfte des Parameterwerts für Kupfer (0,9 mg/L). **In diesem Fall erfüllte das Wasser 2 das Kriterium B IV nicht.**

Da die Wasser 2 und 3 nach der 24. Woche in der Kupferkonzentration stark anstiegen, wurde der Versuchszeitraum erweitert. Dabei zeigte sich, dass der Referenzwert für Kupfer auch nach 52 Wochen nicht sicher eingehalten wurde. Somit war Kupfer für die drei Testwässer als Installationsmaterial nicht geeignet, obwohl die Wässer die Anforderungen der Metallbewertungsrichtlinie hinsichtlich pH-Wert und TOC einhielten.

4.5. Zusammenfassung

Die normgemäße Untersuchung nach DIN EN 15664-1, Anhang 1 zur Bestimmung der Eignung des lokalen Trinkwassers mit handelsüblichen Kupfermaterialien oder Kupferlegierungen ist sehr aufwendig. Dabei müssen regelmäßig zahlreiche Proben im Zulauf- und Stagnationswasser untersucht werden. Ein Vorteil besteht darin, dass die Prüfung im Allgemeinen zuverlässige und anerkannte Ergebnisse hinsichtlich der Metallfreisetzung liefert. Zudem schützen die aus diesen Ergebnissen abgeleiteten Empfehlungen den Wasserversorger vor Regressansprüchen bei Korrosionsproblemen in der Trinkwasserinstallation. Darüber hinaus lassen sich die Kupferwerkstoffe nach

Abschluss der Prüfung entnehmen und für Untersuchungen mittels Oberflächenanalysetechniken, wie etwa der Mikroskopie, aufbereiten. Im vorliegenden Fall zeigen die Ergebnisse, dass Kupfer wahrscheinlich nicht für die Verwendung für die drei Testwässer geeignet war, obwohl die Anforderungen an die Wasserqualität hinsichtlich pH-Wert und gesamtem organisch gebundenen Kohlenstoff (TOC) – basierend auf den Bewertungsgrundlagen des Umweltbundesamtes (UBA) für Metalle [4] – erfüllt wurden. Damit werden die hohen Kupferabgaberraten des 1. Versuchs bestätigt.

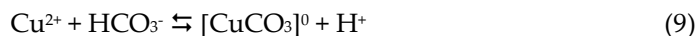
5. Bestimmung der Kupferabgabe unter Stagnation in einer Kreislaufapparatur [12]

5.1 Beschreibung

Neben der im vorigen Kapitel beschriebenen Bestimmung der Kupferabgabe kann auch ein Versuchsrohr, das dauerhaft im Testwasser exponiert ist, zu bestimmten Zeitpunkten ausgebaut und untersucht werden. Dabei erfolgt die Stagnationsphase in einem geschlossenen Kreislauf bei sehr geringer Durchflussrate, um Veränderungen im Untersuchungswasser präzise überwachen zu können, ohne die Korrosionsvorgänge signifikant zu beeinflussen [21,22,23].

Die zeitabhängige Änderung der Metallkonzentration im Prüfwasser wird meist durch diskontinuierliche Probenahmen und analytische Untersuchungen verfolgt [24,25].

Eine bessere Alternative ist die kontinuierliche Inline-Messung von Kupfer(II), da sich so das Verhältnis von Metall zu Stagnationswasser nicht verändert und der Sauerstoffverbrauch durch die Korrosion durch Ausschluss von Luftkontakt sicher bestimmt werden kann. Zur Kupferbestimmung bietet sich die fotometrische Auswertung der Absorptionsbande des neutralen Kupfercarbonat-Komplexes $[\text{CuCO}_3]^0$ bei 280 nm an [26]. Kupfercarbonat ist als fester Stoff nicht bekannt, in Hydrogencarbonathaltigen Wässern ist es jedoch im pH-Bereich von 6 bis 8 die konzentrationsmäßig wichtigste Kupferspezies (siehe Gleichung 9) [27].



Da die Variation der Ionenkonzentrationen, insbesondere die des Hydrogencarbonats, sowie der pH-Wert die Bestimmung beeinflussen, sollte diese im Messwasser kalibriert werden. Dazu werden die Absorptionswerte in Abhängigkeit von der Kupfer(II)-Konzentration bestimmt. Zudem wird eine Bestimmung der Kupferkonzentration nach Ende der Stagnation mit einer Referenzmethode (z. B. ICP-MS) empfohlen.

5.2. Versuchsaufbau

Es wurde eine Kreislaufapparatur aufgebaut, die aus den folgenden Komponenten bestand:

- einer Peristaltikpumpe mit 0,76 mm Innendurchmesser Tygon-Schlauch,
- einem Thermostaten für das zu prüfende Kupferrohr,
- einem UV/VIS-Spektrometer mit Durchflussküvette,
- und einem 4-Halskolben als Wasserreservoir mit den Messsonden für Sauerstoff (O₂); pH-Wert, Leitfähigkeit (LF) und Temperatur sowie einem durchbohrten, gasdichten Stopfen mit Zulauf und Ablauf zur Pumpe,
- ein elektronisch geregelter Magnetrührer,
- und zwei mit Teflon-Schläuchen versehene Silikonstopfen zum Einbinden des Testrohrs.

Abbildung 10a zeigt das Schema der Kreislaufapparatur, Abbildung 10b den Laboraufbau bei geöffnetem Thermostatgehäuse.

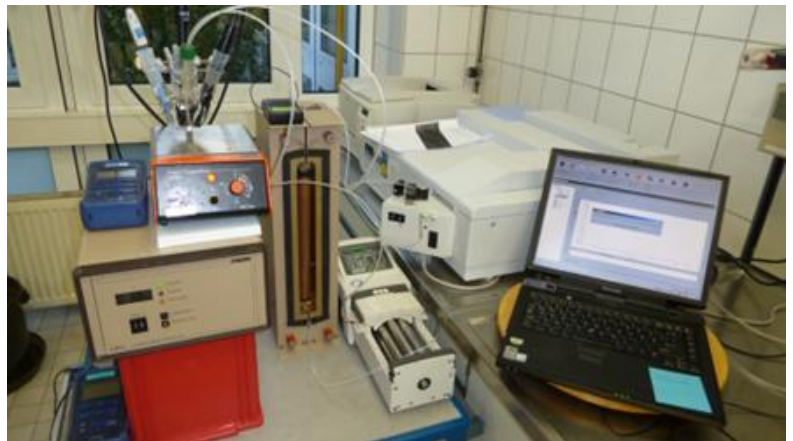
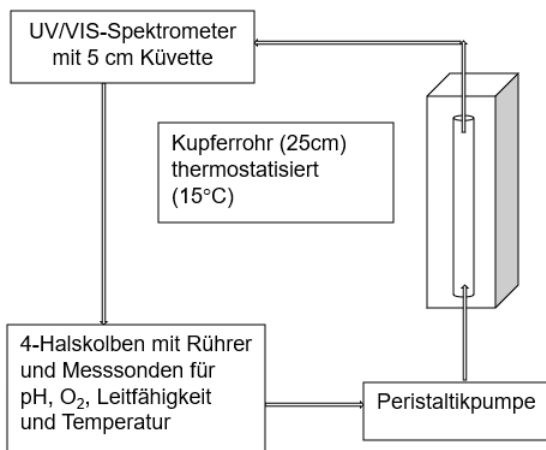


Abbildung 10. Kreislaufapparatur zur Messung der Kupferabgabe bei Stagnation, (a) schematischer Aufbau, (b) Laborinstallation.

Das geschlossene System umfasste eine Peristaltikpumpe (Modell 205U Watson Marlow, Rommerskirchen, Deutschland) mit einer Förderleistung von 0,54 l/h, einen Säulenthermostaten S4010 mit Thermokontroller der Firma Sykam, Fürstfeldbruck und ein UV/VIS-Spektrometer (Lambda 35 Spektralphotometer mit WIN-LAB Software, Version 6.0.3, PerkinElmer Life and Analytical Sciences, Shelton, CT, USA). Die quantitativen UV-Messungen erfolgten bei 280 nm unter Verwendung einer 50 mm Durchflusszelle (Hochleistungsquarzglas 200 - 2500 nm, Kat.-Nr. 176700, Volumen 2,25 ml, Hellma GmbH & Co. KG, Müllheim, Deutschland). Die Elektroden für die elektrische Leitfähigkeit (LF), den pH-Wert und eine Optode für Sauerstoff (O₂) wurden gasdicht in einen 100 ml 4-Halskolben eingebaut, der gleichzeitig als Puffervolumen diente. Die In-situ-Parameter wurden mit einem Multi 3430 IDS gemessen und aufgezeichnet, an dem die Sensoren FDO® 925 (O₂), TetraCon® 925 (LF) und SenTix® 980P (pH) und von WTW, Weinheim, Deutschland angeschlossen waren. Sauerstoff wurde gemäß DIN ISO 17289 [16], LF gemäß DIN EN 27888 [17], pH gemäß DIN EN ISO 10523 [18] und Temperatur gemäß DIN 38404-4 [19] gemessen. Proben für die Analyse von Gesamtkupfer wurden unmittelbar nach Ende der Stagnation aus dem 100 ml-Kolben entnommen und mit konzentrierter Salpetersäure auf 5 Massen-% angesäuert. Die Elementanalyse erfolgte gemäß DIN EN ISO 17294-2 [20] mit einem Agilent 7900 ICP-MS und der Software MassHunter 4.2 (Agilent Technologies Germany GmbH & Co., Waldbronn, Deutschland).

Für die Versuche wurden drei nahtlose Kupferrohre der Firma KME, Sanco R250, je 25 cm Länge, Innendurchmesser 26 mm, weich nach DIN EN 1057 [5] verwendet. Daraus berechnen sich eine Innenfläche von 0,0196 m² und ein Volumen von 0,123 l.

5.3 Kalibrierung der photometrischen Bestimmung von Kupfer

Eine Kupfer(II)-Stammlösung ($c = 1.000 \text{ mg/L}$) wurde durch Lösen von 0,532 g Kupfer(II)-chlorid-Dihydrat (Merck, Reinheitsgrad p.a.) in 250 ml entionisiertem Wasser hergestellt. Kupfer-Kalibrierlösungen mit Konzentrationen im Bereich von 0,2 bis 2,0 mg/L wurden durch Zugabe von Aliquoten der Stammlösung zu Testwasser zubereitet. Die entsprechenden Extinktionen wurden photometrisch bei 280 nm (Spaltbreite 1 nm) bestimmt. Die erhaltenen Daten wurden linear angepasst, und die in [Tabelle 3](#) aufgeführten Methodenparameter wurden berechnet.

Tabelle 3. Photometrische Bestimmung von Kupfer über den $[\text{CuCO}_3]^0$ -Komplex.

Verfahrensparameter	Wert
Kalibrierbereich [mg/l]	0,2 - 2,0
Empfindlichkeit (Steigung) [l/mg]	0,1779
Reststandardabweichung	0,0061
Nachweisgrenze [mg/l]	0,077
Bestimmungsgrenze [mg/l]	0,27
Verfahrensvariationskoeffizient [mg/l]	0,034
Korrelationskoeffizient	0,9986

5.4. Versuchsdurchführung

Die Rohrstücke wurden in die Versuchsanlage ([Abbildung 1](#)) eingebaut und mit den in [Tabelle 1](#) beschriebenen Wässern bei einem Durchfluss von jeweils 130 - 140 l/d beaufschlagt. Nach einer dreiwöchigen Anpassungsphase wurden die Abschnitte erstmals entnommen, in die Kreislaufanlage eingebaut und auf Kupferfreisetzung untersucht. Für die Stagnationsphasen wurden vor Beginn der ersten Messung 10-Liter-Proben der jeweiligen Wässer entnommen. Die Proben wurden bei 5 °C im Kühlschrank gelagert, um Veränderungen der Wassereigenschaften während der Stagnationsversuche zu minimieren.

Der Durchfluss in der Durchflussapparatur wurde gestoppt; das zu untersuchende Rohrstück wurde entnommen, entleert, in den Thermostaten der Kreislaufapparatur eingesetzt und auf eine Temperatur von $(15,0 \pm 0,1) \text{ °C}$ gebracht. Der Kolben wurde mit Testwasser gefüllt, und das Photometer wurde unter Verwendung des Testwassers auf Null abgeglichen. Anschließend wurde das Rohrstück mithilfe der Schlauchpumpe mit Testwasser gefüllt. Ein Magnetrührstab wurde in den Kolben gegeben, dieser mit Testwasser aufgefüllt und mittels der Messsonden sowie des Stopfens für Zu- und Ablauf luftdicht verschlossen. Der Rührmotor unter dem Kolben wurde auf 200 U/min eingestellt, und die UV-Messung sowie die In-situ-Messungen wurden gestartet. Die Parameter des UV/VIS-Spektrometers im kinetischen Modus waren wie folgt: Wellenlänge: 280 nm, Spaltbreite: 1 nm, Messintervall: 60 s, Messdauer: 8 h.

Nach der Messung wurde das Stagnationswasser beprobt und die Kupferkonzentration mit ICP/MS analysiert. Anschließend wurde das Kupferrohr wieder in den Prüfwasserstrang eingebaut. Die Daten des Fotometers (zeitabhängige Extinktionen) sowie die Parameter der Sensoren zur Auswertung zusammengeführt und ausgewertet.

5.5. Ergebnisse und Interpretation

5.5.1. Wasser 1 (oxidativ aufbereitet)

[Abbildung 11](#) zeigt den zeitlichen Verlauf der fotometrisch bestimmten Kupferkonzentration und der In-situ-Parameter im Wasser 1 in der zweiten

Stagnationsphase (4. Woche). Zu Beginn stieg die Kupferkonzentration annähernd linear an. Anschließend verringerte sich die Steigung, und der Kupferwert erreichte nach etwa fünf Stunden (18.000 s) ein Maximum von 1,92 mg/l, bevor er langsam wieder abfiel. Nach acht Stunden (28.800 s) wurde ein Wert von 1,85 mg/l Kupfer erreicht. Nach 4 und 8 Stunden Stagnation ergaben sich die in [Tabelle 4](#) aufgeführten Konzentrationen.

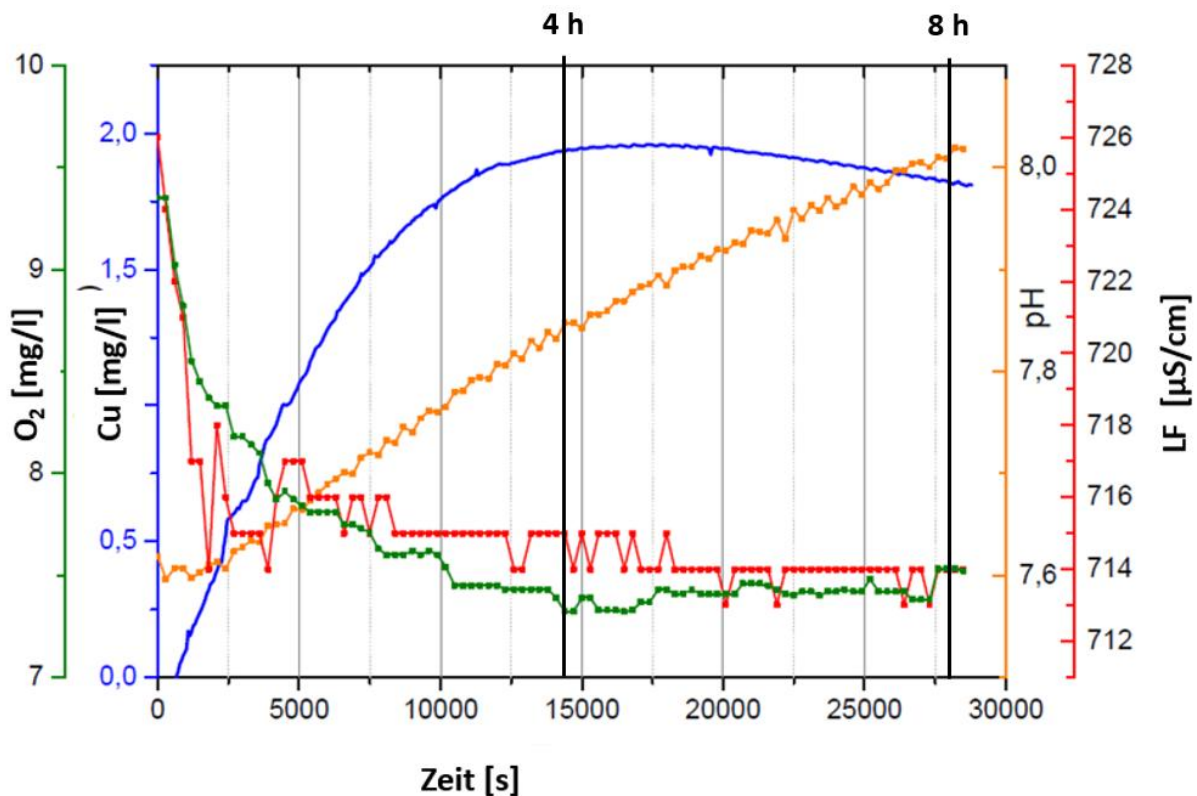


Abbildung 11. Stagnationsphase des Kupferrohrs nach 4 Wochen kontinuierlicher Exposition im Wasser 1.

Dieser Konzentrationsverlauf für Kupfer ist als Maximumkurve aus der Literatur bekannt [13, 21] und lässt sich wie folgt erklären: Anfangs dominierte die Abgabe von Kupfer an das Wasser. Ab 5 Stunden überstieg der Einbau von Kupferionen in die Deckschicht die Löslichkeit der Kupferkorrosionsprodukte, sodass die Kupferkonzentration in der Lösung abnahm. Die Sauerstoffkonzentration fiel nach 5 h ab und blieb dann bis zu 8 h mit 7,5 mg/l auf einem hohen Niveau nahezu konstant. Die anfängliche Leitfähigkeit des Wassers betrug 726 µS/cm und fiel auf 714 µS/cm ab. Dies kann zu Beginn durch die Komplexbildung zum neutralen, gelösten Kupfercarbonat-Komplex und anschließend durch den Einbau von Ionen in die Deckschicht erklärt werden. Durch die Korrosion wird Sauerstoff reduziert und es werden Hydroxid-Ionen gebildet, wodurch der pH-Wert ansteigt ([Gleichung 10](#)). Der annähernd lineare Anstieg von 7,6 auf 8,1 erklärt sich aus der Definition des pH-Wertes als logarithmischer Wert.



5.5.2. Wasser 2 (naturnah aufbereitet)

Für Testwasser 2 wurde das Maximum der Kupferkonzentration nach 20.500 s (6,56 h) bei 2,2 mg/l erreicht. Anschließend fiel die Konzentration wieder leicht ab (siehe [Abbildung 12](#)). Der kontinuierliche Abfall der elektrischen Leitfähigkeit von 717 µS/cm auf 704 µS/cm kann durch die Aufnahme ionischer Wasserinhaltsstoffe in die Deckschicht erklärt werden.

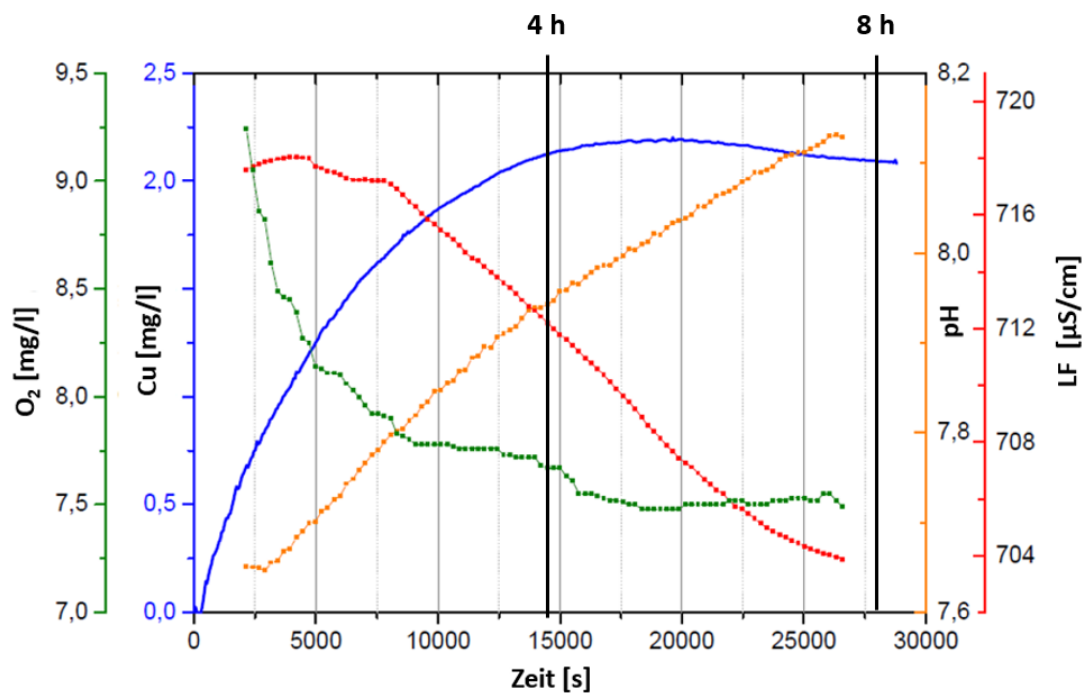


Abbildung 12. Stagnationsphase des Kupferrohrs nach 4 Wochen kontinuierlicher Exposition im Wasser 2.

5.5.3. Wasser 3 (teilentsalzt)

Während der achtstündigen Stagnationsphase erreichte das enthärtete Wasser 3 kein Plateau der Kupferkonzentration (siehe [Abbildung 13](#)). Bereits nach drei Wochen Einbauzeit ergaben sich jedoch geringere Kupferkonzentrationen als bei den Wässern 1 und 2 (siehe [Tabelle 4](#)). Der Anstieg des pH-Wertes von 7,7 auf 8,3 ist der höchste der drei vorgestellten Messungen, da das ionenärmere Wasser schwächer gepuffert ist.

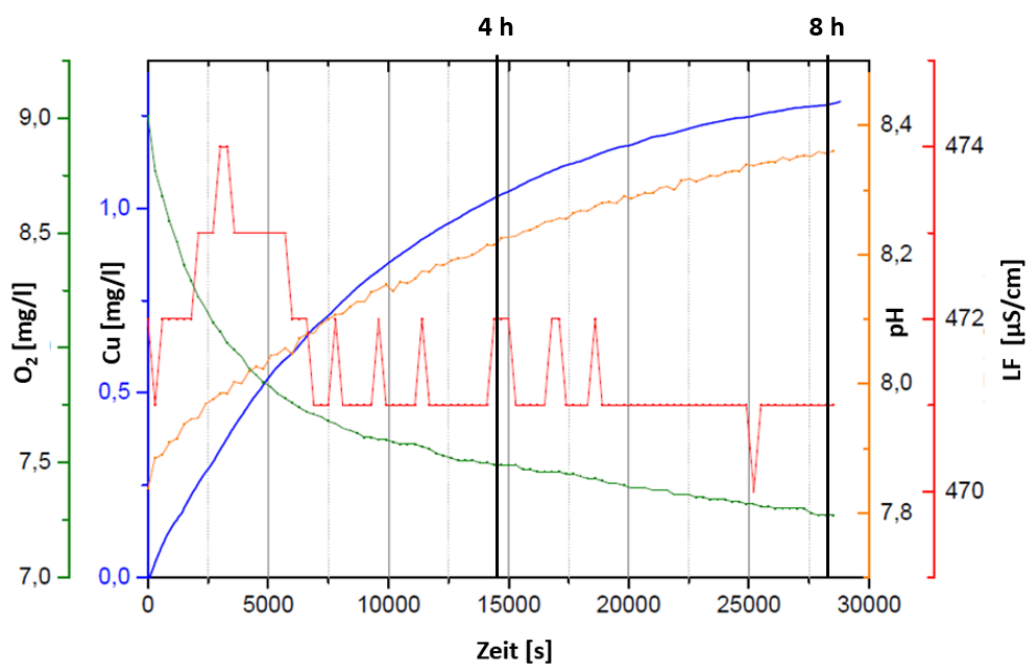


Abbildung 13. Stagnationsphase des Kupferrohrs nach 3 Wochen kontinuierlicher Exposition im Wasser 3.

In der [Tabelle 4](#) sind die Kupferkonzentrationen nach 4 h und 8 h Stagnation für alle Stagnationsphasen zusammengestellt.

Tabelle 4. Kupferkonzentrationen im Kreislaufwasser bei 4 und 8 h Stagnation.

Woche	Stagnations- zeit [h]	Kupfer im Wasser 1 [mg/l]	Kupfer im Wasser 2 [mg/l]	Kupfer im Wasser 3 [mg/l]
3	4	1,93	1,95	0,91
3	8	1,81	2,02	1,29
4	4	1,92	2,12	-
4	8	1,85	2,08	-
5	4	1,80	1,95	1,12
5	8	1,84	2,02	1,31

Ein Vergleich zeigt, dass enthärtetes Wasser 3 deutlich weniger korrosiv gegenüber Kupfer ist als die Wässer 1 und 2, selbst wenn der Gleichgewichtswert nach achtstündiger Stagnation noch nicht erreicht wurde. Dies ist auf die geringere Ionenkonzentration im Wasser 3 zurückzuführen. Die beiden Trinkwässer 1 und 2 unterscheiden sich im Stagnationsverhalten dagegen nicht signifikant voneinander. Daraus kann in diesem Fall auf einen geringen Einfluss der oxidativen Aufbereitung auf das Korrosionsverhalten der Kupferrohre geschlossen werden.

5.6. Vergleich von DIN-Verfahren und vereinfachtem Verfahren zur Kupferabgabe

Um die Ergebnisse des Verfahrens nach DIN EN 15664-1 mit denen der Kreislaufapparatur zu vergleichen, müssen die unterschiedlichen Oberflächen-Volumen-Verhältnisse berücksichtigt werden. Das Verhältnis für den DIN-Prüfstand betrug $307,7 \text{ m}^{-1}$, während es bei der Kreislaufapparatur bei $153,8 \text{ m}^{-1}$ lag. Die Division dieser Werte ergibt einen Korrekturfaktor von 2, der zu Vergleichszwecken auf die Ergebnisse der Kreislauf-Messwerte angewendet werden muss (siehe [Tabelle 5](#)).

Tabelle 5. Vergleich der Kupferkonzentrationen von DIN-Verfahren und Kreislaufapparatur.¹

Kupfer Konzentrationen nach 4 Wochen [mg/l]						
Stagnations- zeit [h]	Wasser 1,			Wasser 2,		
	Wasser 1, DIN	Kreislauf, auf DIN normiert	Differenz [%]	Wasser 2, DIN	Kreislauf, auf DIN normiert	Differenz [%]
4	3.66	3.84	4.89	3.93	4.24	7.9
8	4.04	3.69	-9	3.72	4.16	11.9

¹ Die Messung von Wasser 3 in der 4. Woche konnte nicht ausgewertet werden.

Nach der Korrektur stimmen die Messwerte aus der Kreislaufapparatur mit den Werten gemäß DIN EN 15664-1 innerhalb einer Unsicherheit von $\pm 10 \%$ überein. Die Werte nach der DIN-Methode gelten jedoch als zuverlässiger. Ein möglicher Grund für die Abweichung ist, dass das Testrohr aus der in [Abbildung 1](#) dargestellten Apparatur ausgebaut wurde und dabei kurzzeitig trocken lief, was die Oberfläche des Rohrs verändert haben könnte. Künftig sollte ein Ventil unterhalb des Testrohrs installiert werden, um dies zu verhindern. Obwohl während des gesamten Experiments dasselbe Wasser verwendet wurde, kann dann das aktuelle Testwasser verwendet werden, und so ein Wasserwechsel vermieden werden.

Des Weiteren sollten die mit der Kreislaufapparatur ermittelten 4-h Stagnationswerte mit der in den Probenahmerichtlinie des Umweltbundesamtes [28] definierten „S1-Probe“

vergleichbar sein. Dies würde einen Vergleich mit DWD-Parameterwerten, wie beispielsweise 2 mg/l für Kupfer, ermöglichen.

5.7. Zusammenfassung

Die Stagnationsversuche an den kontinuierlich beaufschlagten Kupferrohren zeigten zwei typische Stagnationskurven: Bei den Wässern 1 und 2 zeigte sich jeweils eine Maximumkurve, die dann auf einen Gleichgewichtswert ohne weitere Veränderung abfiel. Bei Wasser 3 zeigte sich hingegen eine stetig ansteigende Kurve mit abfallender Steigung ohne Maximum. Um zu prüfen, ob der Grenzwert eingehalten wird, muss noch auf das Fläche-zu-Volumen-Verhältnis der Rohre in der Norm DIN EN 15664-1 umgerechnet werden. Die Übereinstimmung für die 4 h-Proben ist als gut zu bewerten. Das vereinfachte Verfahren zur Kupferabgabe liefert bei deutlich geringerem Aufwand wertvolle Informationen über den Korrosionsprozess, die sich einerseits aus der Stagnationskurve und einer möglichen Überschreitung des Grenzwertes ergeben.

6. Fazit der Untersuchungen

Die Korrosion von Kupfer und Kupferlegierungen beeinträchtigt sowohl die Lebensdauer der aus diesen Werkstoffen gefertigten Bauteile als auch die Qualität des damit in Kontakt kommenden Trinkwassers. Zur Beurteilung dieses Sachverhalts kann das in [Kapitel 3](#) beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Korrosionsrate anhand des Materialverlusts von Proben angewendet werden. Dieses Verfahren zeigt auf, wann und ob das untersuchte Material in einen Zustand gleichmäßiger Korrosion übergeht. Es sind hierfür nur geringe finanzielle und personelle Ressourcen erforderlich.

Hinsichtlich der für die Trinkwasserqualität relevanten Kupferfreisetzung lässt sich ein vereinfachter Versuch in einer Kreislaufapparatur durchführen, wie in [Kapitel 5](#) beschrieben. Dieser Versuch kann problemlos in einem bestehenden Chemielabor umgesetzt werden.

Sollten diese Untersuchungen Auffälligkeiten oder Überschreitungen von Parameterwerten ergeben, sollten zu Referenzzwecken weiterführende und aufwendigere Prüfungen an einem Prüfstand gemäß DIN EN 15664-1 ([Kapitel 4](#)) durchgeführt werden.

Literatur

1. Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159, S. 2). https://www.gesetze-im-internet.de/trinkvw_2023/BJNR09F0B0023.html, aufgerufen am 20.06.2025.
2. DIN EN 12502-2:2005-03 Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und -speichersystemen - Teil 2: Einflussfaktoren für Kupfer und Kupferlegierungen, DIN Media GmbH, Berlin.
3. DIN EN 12502-1:2005-03 Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und -speichersystemen - Teil 1: Allgemeines, DIN Media GmbH, Berlin.
4. Bewertungsgrundlage für metallene Werkstoffe im Kontakt mit Trinkwasser, Umweltbundesamt, Version vom 21. August 2025 unter Berücksichtigung der 6. Änderung der Neufassung. https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/13195/dokumente/metall-bewertungsgrundlage_6_aenderung_der_neufassung_de.pdf, aufgerufen am 01.02.2026.
5. DIN EN 1057:2010-06 Kupfer und Kupferlegierungen - Nahtlose Rundrohre aus Kupfer für Wasser- und Gasleitungen für Sanitärinstallationen und Heizungsanlagen, DIN Media GmbH, Berlin.
6. Arbeitsblatt GW 392 2009-07 Nahtlosgezogene Rohre aus Kupfer für Gas- und Trinkwasser-Installationen und nahtlosgezogene, innenverzinnete Rohre aus Kupfer für Trinkwasser-Installationen; Anforderungen und Prüfungen, WVGW Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
7. DIN EN 1982:2024-12 Kupfer und Kupferlegierungen - Blockmetalle und Gussstücke; Deutsche Fassung EN 1982:2024, DIN Media GmbH, Berlin.
8. DIN EN 15664-1:2014-03 Einfluss metallischer Werkstoffe auf Wasser für den menschlichen Gebrauch - Dynamischer Prüfstandversuch für die Beurteilung der Abgabe von Metallen - Teil 1: Auslegung und Betrieb, DIN Media GmbH, Berlin.

9. DIN EN ISO 6509-1:2014-09 Korrosion von Metallen und Legierungen - Bestimmung der Entzinkungsbeständigkeit von Kupfer-Zink-Legierungen - Teil 1: Prüfverfahren, DIN Media GmbH, Berlin.
10. DIN EN 16056:2023-07 Einfluss metallischer Werkstoffe auf Wasser für den menschlichen Gebrauch - Verfahren zur Ermittlung des Passivverhaltens von nichtrostenden Stählen und anderen Legierungen
11. DIN EN 15664-2:2010-06 Einfluss metallischer Werkstoffe auf Wasser für den menschlichen Gebrauch – Dynamischer Prüfstandversuch für die Beurteilung der Abgabe von Metallen – Teil 2: Prüfwasser
12. Weisheim, Alena *Untersuchungen zur Korrosion verschiedener Werkstoffe im Trinkwasser*, Bachelorarbeit, Universität Duisburg-Essen, 2014.
13. Kuhn, Jens *Integrated Approach for the Investigation of Copper Corrosion in Drinking Water Distribution Systems*, master thesis, University Duisburg-Essen, 2015.
14. Eberle, S. H.; Haag, S.; Huckele, S.; Freyas, R. *Untersuchungen zur Minimierung der Kupferabgabe in Trinkwasserinstallationen*, BMFT-Projekt 02WT0501, 2009.
15. Feng, Y.; Teo, W. -k.; Siow, K. -s.; Tan, K. -l.; Hsieh, A. -k. The corrosion behaviour of copper in neutral tap water. Part I: Corrosion mechanisms. *Corrosion Science* **1996**, 38 (3), 369–385. [https://doi.org/10.1016/0010-938x\(96\)00110-2](https://doi.org/10.1016/0010-938x(96)00110-2).
16. DIN ISO 17289:2014-12 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des gelösten Sauerstoffs - Optisches Sensorverfahren (ISO 17289:2014), DIN Media GmbH, Berlin, Deutschland.
17. DIN EN 27888:1993-11 Wasserbeschaffenheit; Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (ISO 7888:1985); Deutsche Fassung EN 27888:1993, DIN Media GmbH, Berlin, Deutschland.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Werner, W; Groß, H.-J.; Gerlach, M.; Horvath, D.; Sontheimer, H. Untersuchungen zur Flächenkorrosion in Trinkwasserleitungen aus Kupfer. *GWF-Wasser/Abwasser* **1994**, 34 (2), 92-103.
22. 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>, angerufen am 09.02.2025.
23. Konradt, N.; Konradt, M.; Janknecht, P. Corrosion control in drinking water distribution using simple methods. *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)* **2026**. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18599289>.
24. Lewis, R.O. A White Paper Review: History of Use and Performance of Copper Tube For Potable Water Service. Washington Suburban Sanitary Commission **15.12.2014**. <https://www.wsscwater.com/copper-pipe-white-paper>, angerufen am 09.07.2025.
25. Military Handbook. Material Deterioration Prevention and Control Guide for Army Material. Part One, Metals, Part One, Metals, MIL-HDBK-735, **1993**.
26. Byrne, R. H.; Miller, W. L. Copper(II) carbonate complexation in seawater. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* **1985**, 49 (8), 1837–1844. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90153-x](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90153-x).
27. Sánchez, M. P.; Barrera, M.; González, S.; Souto, R. M.; Salvarezza, R. C.; Arvia, A. J. Electrochemical behaviour of copper in aqueous moderate alkaline media, containing sodium carbonate and bicarbonate, and sodium perchlorate. *Electrochimica Acta* **1990**, 35 (9), 1337–1343. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(90\)85004-7](https://doi.org/10.1016/0013-4686(90)85004-7).
28. Empfehlung des Umweltbundesamtes Beurteilung der Trinkwasserqualität hinsichtlich der Parameter Blei, Kupfer und Nickel („Probennahmeempfehlung“), Umweltbundesamt, Rev01, Stand: 18. Dezember 2018, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5620/dokumente/probennahmeempfehlung_rev01.pdf, angerufen am 30.06.2025.