

# Wechselstromkorrosion an kathodisch geschützten Rohrleitungen: Ein neuartiges Probeblech zur Erfassung des Korrosionsfortschritts

M. Büchler  
SGK Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz,  
Technoparkstr. 1, CH-8005 Zürich,  
markus.buechler@sgk.ch

P. Weinmann  
Corroprot AG,  
Kempttalstrasse 111, CH-8308 Illnau,  
peter.weinmann@corroprot.ch

## **Abstract**

Aufgrund der neusten Erkenntnisse zur Wechselstromkorrosion ergibt sich theoretisch, dass die Geschwindigkeit des Korrosionsangriffs unter Wechselfeldwirkung mit zunehmender Angriffstiefe abnimmt oder sogar beim Erreichen einer kritischen Angriffstiefe stoppt. Diese Tiefe lässt sich mit Hilfe von Modellrechnungen ermitteln. Ein neuartiges Probeblech ist in der Lage den Korrosionsfortschritt in die Tiefe mit geringem messtechnischem Aufwand zu erfassen. Damit wird es erstmals möglich die theoretischen Betrachtungen im Betrieb zu bestätigen und die Maßnahmen, welche zum Schutz gegen Wechselstromkorrosion getroffen wurden, hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zu überprüfen. Der theoretische Hintergrund sowie das neuartige Angriffstiefen-Probeblech werden vorgestellt.

## **1. Einleitung**

Im Rahmen von ausgedehnten Feldversuchen in Deutschland konnten die Beeinflussungsgrenzwerte für Wechselstromkorrosion festgelegt werden [1, 2]. Diese sind direkt in die EN 15280 eingeflossen. Damit besteht heute eine solide Basis für die Beurteilung der Wechselstromkorrosionsgefährdung und für das Treffen von Schutzmaßnahmen. Die Grenzwerte basieren im Wesentlichen auf Stromdichtewerten, womit zwingend der Einbau von Probeblechen erforderlich wird. Im Rahmen der Forschungsvorhaben [1, 2] konnte zudem gezeigt werden, dass auch eine Beurteilung der Korrosionsgefährdung aufgrund von

Spannungswerten zulässig ist. Diese Grenzwerte sind auch die AfK Empfehlung Nr. 11 eingeflossen. Damit lässt sich die Anzahl der erforderlichen Probestreife signifikant verringern. Nur wenn die Vorgaben bezüglich der Spannungswerte nicht eingehalten werden können ist auch weiterhin der Einsatz von Probestreifen zwingend erforderlich. Da aufgrund der neusten mathematischen Modelle, welche die Beschreibung der Wechselstromkorrosion ermöglichen, konnte gezeigt werden, dass die Geschwindigkeit der Wechselstromkorrosion mit zunehmender Angriffstiefe abnehmen und beim Erreichen einer kritischen Tiefe gar zum Erliegen kommen müsste [3]. Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit dem Umstand, dass bisher Leckagen an kathodisch geschützten Rohrleitungen aufgrund von Wechselspannungsbeeinflussungen nur an Rohrleitungen mit Wandstärken von 5 mm oder weniger aufgetreten sind. Zudem lässt sich auf diese Weise gut die verhältnismäßig geringe Anzahl Schäden an Rohrleitungen erklären, obwohl an Probestreifen wiederholt starke Korrosionsangriffe beobachtet wurden.

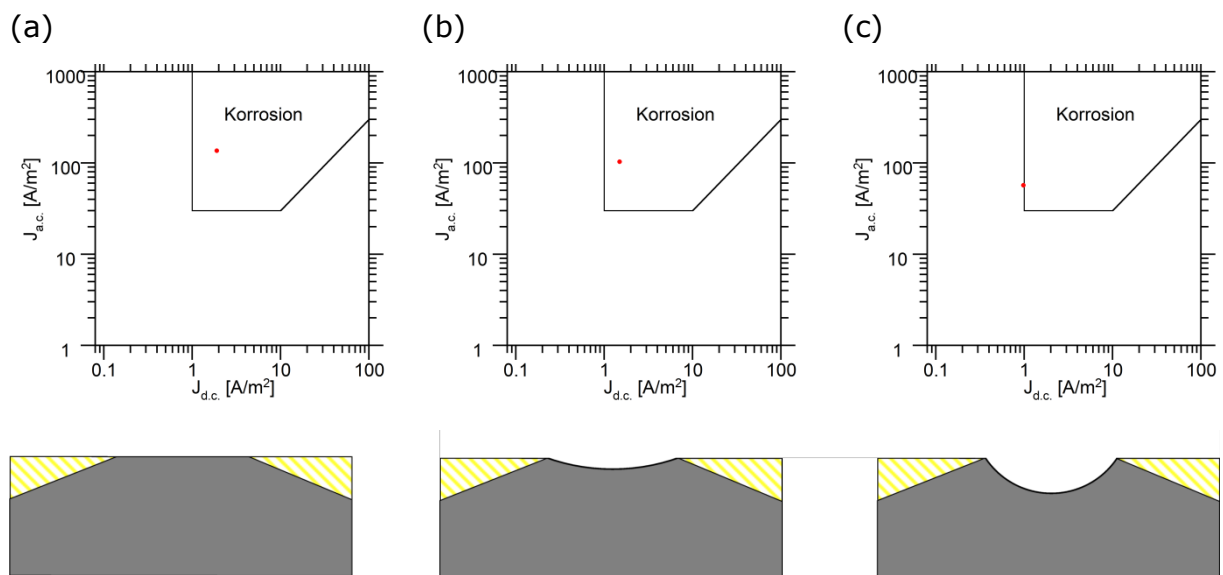
Da sowohl die Betriebserfahrung als auch die theoretischen Berechnungen dahingehend interpretiert werden können, dass Wechselstromkorrosion unter gewissen Umständen stoppen kann, wurde eine entsprechende Modellierungssoftware entwickelt, welche die theoretisch erwartete maximale Angriffstiefe berechnen kann. Da bis heute aber keine belastbaren Informationen in Bezug auf die Gültigkeit dieses Ansatzes besteht, dürfen diese Berechnungen nicht für den Betrieb herangezogen werden. Da es sich wiederholt gezeigt hat, dass die Vorgaben der EN 15280 nicht immer eingehalten werden können, wäre es aus betrieblicher Sicht hilfreich über Probestreife zu verfügen, welche die zeitliche Entwicklung des Korrosionsangriffs in die Tiefe erfassen können. Zwar gibt es bereits Probestreife, welche mit einem Ultraschallsensor ausgerüstet sind. Diese sind aber vergleichsweise teuer und können nur mit großem Aufwand fernüberwacht werden. Zudem liegen keine Informationen über die Praxiserfahrung vor. Aus diesen Gründen wurde ein vergleichsweise einfach aufgebautes Probestreife entwickelt, an welchem mit üblichen Multimetern die Korrosionsangriffstiefe erfasst werden kann und welches auch problemlos in bestehende Fernüberwachung integriert werden kann.

Der theoretische Hintergrund der zeitlichen Entwicklung der Wechselstromkorrosionsgeschwindigkeit wird aufgezeigt und die Konsequenzen für die Messtechnik werden diskutiert. Außerdem wird das neuartige Angriffstiefen-Probestreife vorgestellt.

## **2. Theoretischer Hintergrund**

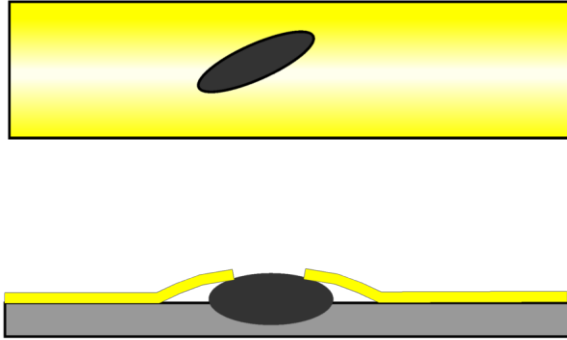
Sämtliche Grenzwerte in Bezug auf Wechselstromkorrosion in der EN 15280 basieren auf Stromdichten. Für die Erfassung der Stromdichten ist der Einbau von Probestreifen erforderlich. Die Problematik besteht nun darin, dass die Stromdichte nur durch Berechnung aus dem gemessenen Strom und einer angenommenen Fläche möglich ist. Es ist hinreichend bekannt, dass die Verteilung der Stromdichte auf dem Probestreife nicht homogen ist [4] und dass durch teilweise Verkalkung

eine Verkleinerung der Fehlstellenfläche auftreten kann. Dies führt zum Unterschätzen der effektiv vorliegenden Stromdichten. Umgekehrt führt jeder Korrosionsangriff zwingend zu einer Vergrößerung der Stahloberfläche und somit zu einer Überschätzung der effektiv vorliegenden Stromdichten. Dieser Effekt ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Es wird deutlich, dass sich die ursprünglich kritischen Stromdichten aufgrund der zunehmend größeren Angriffstiefe allmählich zu unkritischen Werten verschieben. Dabei ist zu beachten, dass die Fläche nicht linear sondern quadratisch in die Berechnung der Stromdichte einght. Dies ist eine direkte Folge der Faradayrektifikation, welche einen signifikanten Einfluss auf die auftretenden Stromdichten hat [3].



**Bild 1:** Einfluss des Korrosionsfortschritts auf die Stromdichte (roter Punkt). Mit fortschreitender Korrosion von a) über b) zu c) vergrößert sich die Metalloberfläche und verringert dadurch die Stromdichten.

Bei dem in Bild 1 diskutierten Fall wurde von einer halbkugelförmigen Korrosion ausgegangen. Tatsächlich wird aber bei Wechselstromkorrosion mit zunehmender Angriffstiefe eine verstärkte laterale Ausdehnung des Angriffs beobachtet. Dabei wird die Umhüllung unterwandert und durch die sich bildenden Korrosionsprodukte abgehoben. In Bezug auf den oben diskutierten Effekt ist dies durchaus günstig, da damit die elektrochemisch zugängliche Fläche weiter vergrößert und die Stromdichte weiter verringert wird. Dieser Effekt ist schematisch in Bild 2 dargestellt. Da die Korrosionsprodukte eine verringerte elektrische Leitfähigkeit aufweisen werden die Stromdichte sowie deren Verteilung in der Fehlstelle zusätzlich beeinflusst.



**Bild 2:** Fehlstelle gefüllt mit Korrosionsprodukte, welche zur Abhebung der Umhüllung und zur Vergrößerung der Stahlfläche in Kontakt mit dem Boden führen.

Aufgrund der Diskussion wird deutlich, dass die folgenden Faktoren einen verlangsamen Einfluss auf den Korrosionsfortschritt haben können:

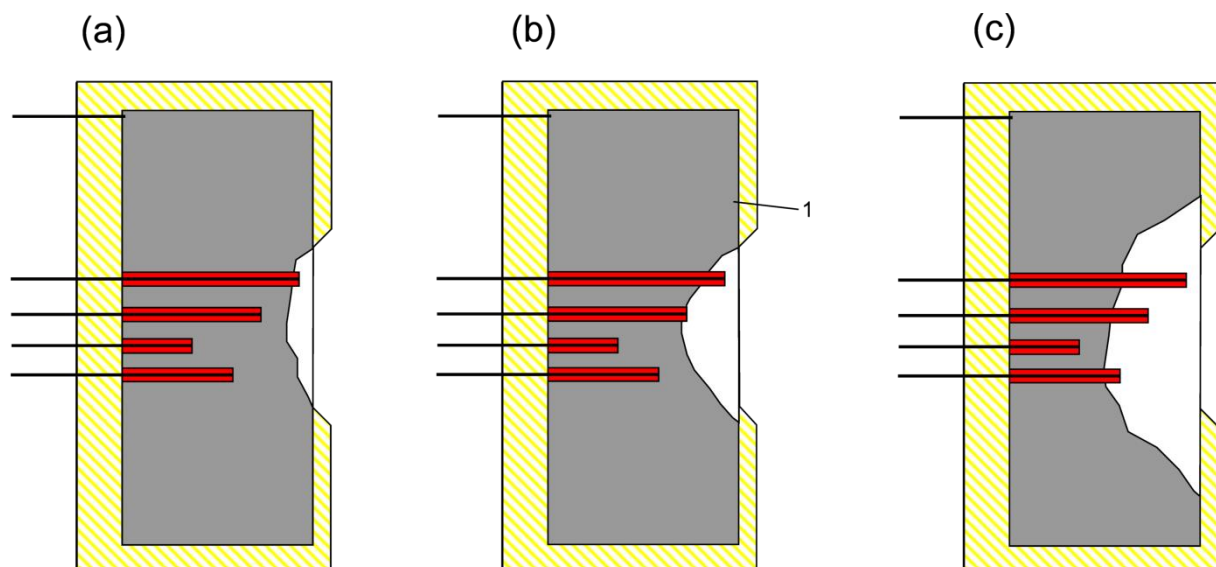
- Vergrößerung der Stahlfläche durch Korrosion
- Vergrößerung der Stahlfläche durch Abheben der Umhüllung
- Erhöhung des Widerstands durch Korrosionsprodukte
- Elektrochemische Reaktionen an den Korrosionsprodukten

Die im Rahmen der Forschungsvorhaben [1, 2] eingesetzten Probebleche konnten diese Effekte aufgrund der geringen Dicke und deren seitlichen Begrenzung nicht abbilden. Die damit ermittelten Korrosionsgeschwindigkeiten sind charakteristisch für die Anfangsphase der Wechselstromkorrosion. Aufgrund der vorliegenden Diskussion dürften die damit ermittelten Werte aber nur bedingt mit dem für den Betrieb relevanten Schädigungsfortschritt verknüpft sein.

Ein eigentlicher Nachweis für die diskutierten Zusammenhänge liegt aktuell nicht vor. Die geschilderten Einflussfaktoren sind aber prinzipiell in der Lage die im Vergleich mit Probeblechen deutlich geringere Schadenshäufigkeit an Rohrleitungen zu erklären. Gemäß EN 15280 müssen Probebleche für den Nachweis der Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen gegen Wechselstromkorrosion eingebaut werden. Außerdem kann basierend auf den aktuell verfügbaren Berechnungsmodellen die maximal erwartete Korrosionsangriffstiefe errechnet werden. Idealerweise sind die Probebleche in der Lage die zeitliche Entwicklung des Korrosionsangriffs in die Tiefe zu erfassen. Mittelfristig würden damit ausreichend Daten verfügbar sein, um einerseits die Richtigkeit der diskutierten Modellvorstellungen zu bestätigen und dem Betreiber ein Instrument zur Verfügung zu stellen mit dem er die Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen gegen Wechselstromkorrosion langfristig oder zumindest zwischen zwei Molchläufen überprüfen kann.

### **3. Ein neuartiges Angriffstiefen-Probeblech**

In Bild 3 ist der schematische Aufbau eines derartigen Probeblechs dargestellt. Durch die Dicke von ca. 10 mm und die seitliche Ausdehnung unter der Umhüllung können die Faktoren, welche zu einer Verringerung der Korrosionsgeschwindigkeit führen dürften, abgebildet werden. Die zeitliche Veränderung der Korrosionsangriffstiefe lässt sich mit Hilfe von vier Elektroden bestimmen, welche in unterschiedlicher Tiefe angebracht sind. Durch einfache Spannungsmessung zwischen den Sensoren und dem Probeblech kann auf diese Weise die Angriffstiefe mit konventionellen Messgeräten über die Zeit erfasst werden. Im Rahmen von Funktionskontrollen oder mit Hilfe von Fernüberwachung ist es somit jederzeit möglich, die Einhaltung der errechneten maximalen Angriffstiefe zu verifizieren. Der wesentliche Vorteil besteht darin, dass es auf diese Weise möglich ist die Unsicherheiten bei der Ermittlung der Stromdichten aufgrund einer unbekanntenen Fehlstellenoberfläche durch eine direkte Erfassung der Angriffstiefe zu eliminieren.



**Bild 3:** Schematische Darstellung eines Angriffstiefen-Probeblechs zur Erfassung der Korrosionsangriffstiefe über die Zeit. Durch Spannungsmessung zwischen den Elektroden und dem Probeblech kann festgestellt werden, wenn der Korrosionsangriff die Tiefe der Elektroden erreicht hat. Mit fortschreitender Korrosion von a) über b) zu c) werden weitere Sensoren durch Korrosion freigelegt.

In Bild 4 ist das entsprechende Probeblech dargestellt, welches heute in der Schweiz für den Nachweis der Wirksamkeit des kathodischen Korrosionsschutzes eingesetzt wird. Nebst den üblichen Messgrößen wie Stromdichten und IR-freiem Potential wird somit der unabhängige Parameter Angriffstiefe erfasst.



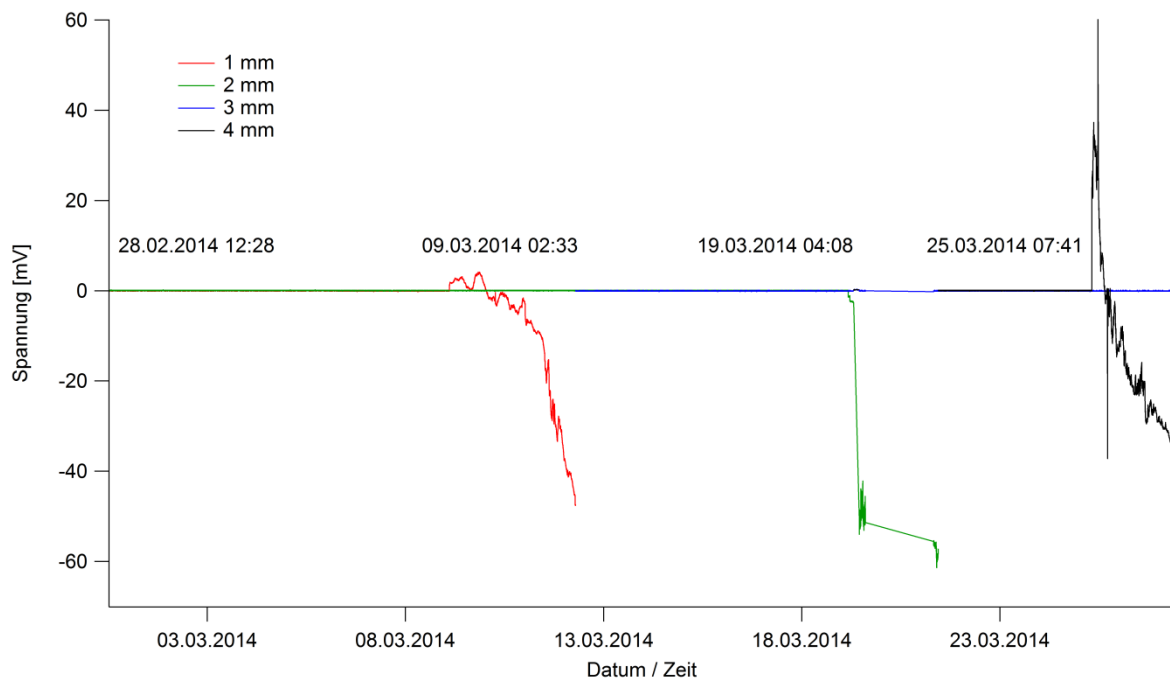
**Bild 4: Angriffstiefen-Probeblech zur Erfassung der Korrosionsangriffs über die Zeit.**

Anfang September 2013 wurde die erste Serie dieser Probebleche produziert und im Rahmen der Tests kam es zu folgendem Effekt: Das Probeblech wurde bei gut definierten Bedingungen in künstlichem Boden einer Wechselspannung von 18 V und einem Einschaltpotential von  $-2.1 V_{CSE}$  ausgesetzt. Aufgrund der Erfahrungen in Feldversuchen ist bekannt, dass derartige Bedingungen zu schnellen Korrosionsangriffen führen, welche üblicherweise deutlich über einem Millimeter pro Jahr liegen. Im vergangenen Jahr traten zwar kontinuierlich stark erhöhte Schutzstromdichten im Bereich von  $30 A/m^2$  und Wechselstromdichten von  $500 A/m^2$  auf, welche basierend auf der EN 15280 das Auftreten von Wechselstromkorrosion erwarten lassen. Bis heute konnte aber keine Korrosion bis auf die Tiefe von einem Millimeter des ersten Sensors festgestellt werden. Die visuelle Kontrolle bestätigte das Auftreten von Korrosion und das Abheben der angrenzenden Umhüllung. Der Versuchsablauf bestätigte somit die erwarteten Effekte, ermöglichte aber nicht einen Test des Probeblechs.

Es wurde daher eine weitere Testreihe mit einem anodischen Strom von  $50 A/m^2$  durchgeführt. Dabei zeigte sich der in Bild 5 dargestellte zeitliche Verlauf der Spannungsmessung zwischen dem Probeblech und der Elektrode. Sobald die Elektrode durch Korrosion freigelegt wurde, trat eine messbare Abweichung des Messwertes auf. Damit ist eine Identifikation des Zeitpunkts bei Erreichung der entsprechenden Angriffstiefe möglich. Mit diesen Versuchen konnte die Funktionsfähigkeit des Probeblechs zur Erfassung der Angriffstiefe gezeigt werden. Allerdings kam es zu einem interessanten Effekt. So wurde die Elektrode auf 4 mm Tiefe vor jener auf 3 mm Tiefe durch Korrosion freigelegt. Der Effekt ist tatsächlich real und auch reproduzierbar. Es zeigte sich, dass der Korrosionsangriff durch den anodischen Strom bei dem senkrecht eingebauten Probeblech auf der unteren Seite deutlich ausgeprägter war. Dies dürfte auf die schweren Korrosionsprodukte zurückzuführen sein, welche durch die Gravitation nach unten gezogen werden. Da diese sauer reagieren, kommt es auf der unteren Seite des Probeblechs zu einem

stärkeren Korrosionsangriff, was aufgrund der lateral angeordneten Elektroden bei größeren Angriffstiefen zu dem erwähnten Effekt führte.

Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt bei Wechselstromkorrosion nicht relevant sein dürfte. Die Ansäuerung ist aufgrund des hohen pH-Werts, welcher bei Wechselstromkorrosion an der Stahloberfläche gefunden wird, nicht möglich und die Korrosionsprodukte sind unter diesen stark alkalischen Bedingungen nicht löslich. Die visuelle Prüfung des Probeblechs unter Wechselstromkorrosion bestätigt diese Schlussfolgerung.



**Bild 5: Spannungsmessung zwischen den Elektroden auf unterschiedlicher Tiefe und dem Angriffstiefen-Probeblech.**

## 4. Schlussfolgerungen

Die Ausführungen zu dem aktuellen Stand des Wissens in Bezug auf Wechselstromkorrosion zeigen, dass sowohl aufgrund der praktischen Erfahrung als auch aufgrund der Modellvorstellungen ein Verlangsamen der Korrosionsgeschwindigkeit unter Wechselspannungsbeeinflussung zu erwarten ist. Dies ist eine Folge der Vergrößerung der Stahloberfläche mit zunehmendem Korrosionsabtrag. Außerdem ist zu erwarten, dass die sich bildenden Korrosionsprodukte die Widerstandsverhältnisse und damit auch die Stromverteilung beeinflussen. Die Effekte, welche zu einer Verringerung der Korrosionsgeschwindigkeit führen, lassen sich durch Ermittlung der Stromdichten nicht erfassen, da diese nur aus dem gemessenen Strom und einer angenommenen Oberfläche werden können. Dies führt dazu, dass die Korrosionsgefährdung anhand von Probeblechmessungen deutlich überschätzt wird, da die Vergrößerung der Oberfläche mit zunehmender Angriffstiefe nicht erfasst

werden kann. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Probebleche deutlich dünner als die Wandstärke der Rohrleitung sind und sich die Korrosion nicht seitlich unter der angrenzenden Umhüllung ausdehnen kann.

Diese entscheidenden Einflussparameter wurden bei der Entwicklung eines neuartigen Angriffstiefen-Probablechs berücksichtigt. Die Unsicherheiten in Bezug auf die Berechnung der Stromdichten bleiben zwar bestehen, durch Erfassung der Angriffstiefe kann aber der Korrosionsfortschritt in die Tiefe im Verlaufe der Zeit verfolgt werden. Die bisher ermittelten Daten bestätigen, dass die in der Anfangsphase der Wechselstromkorrosion mit dünnen Probeblechen ermittelten Korrosionsgeschwindigkeiten an dickeren Probeblechen mit angrenzender Umhüllung nicht gefunden werden.

Mit Hilfe des neuartigen Probeblechs können nun prinzipiell erstmals auch höhere Stromdichten an Probeblechen toleriert und der Angriff in die Tiefe verfolgt werden. Aufgrund der so gewonnenen Erkenntnisse ist es einerseits möglich die mit Hilfe von Modellrechnungen ermittelten maximal erwarteten Angriffstiefen zu überprüfen und andererseits die Zweckmäßigkeit der Intervalle zwischen zwei Molchläufen zu überprüfen.

## 5. Literatur

1. M. Büchler, D. Joos, "Minimierung der Wechselstromkorrosionsgefährdung mit aktivem kathodischen Korrosionsschutz", *DVGW - energie/wasser-praxis* **November 2013**, 13 (2013).
2. M. Büchler, D. Joos, C.-H. Voûte, "Feldversuche zur Wechselstromkorrosion", *DVGW - energie/wasser-praxis* **Juli/August 2010**, 8 (2010).
3. M. Büchler, "Beurteilung der Wechselstromkorrosionsgefährdung von Rohrleitungen mit Probeblechen: Relevante Einflussgrößen für der Bewertung der ermittelten Korrosionsgeschwindigkeit", *3R International*, 36 (2013).
4. M. Büchler, C.-H. Voûte, H.-G. Schöneich, "Kritische Einflussgrößen auf die Wechselstromkorrosion: Die Bedeutung der Fehlstellengeometrie", *3R International* **48**, 324 (2009).