

Bewertung der Wirksamkeit

des Kathodischen Korrosionsschutzes an wechselstrombeeinflussten Rohrleitungen

Die aktuellen Modellvorstellungen für die beim Kathodischen Korrosionsschutz (KKS) ablaufenden Prozesse ermöglichen **neue Ansätze, um die Korrosionsgefährdung einer Rohrleitung zu bewerten**. Unter Berücksichtigung der relevanten Einflussgrößen wird es erstmals möglich, die Wirksamkeit des KKS entlang der Rohrleitungstrasse auf Grundlage der objektiv messbaren Parameter „Einschaltpotential“, „Wechselspannung“, „Bodenwiderstand“ sowie „Spannungstrichter“ zu bewerten. Diese Aspekte ermöglichen nicht nur **eine verbesserte Planung von KKS-Anlagen**, sondern auch die Bewertung von deren Wirksamkeit. Auch kann eine Grundlage für Maßnahmen geschaffen werden, um die Gefährdungssituation zu verringern. Dabei **werden erstmals alle Einflussgrößen in der Bewertung berücksichtigt**; unter Berücksichtigung der teilweise widersprüchlichen Forderungen der relevanten Normen wird es zudem möglich, eine optimale Einstellung des KKS zu erreichen.

von: Dr. Markus Büchler (SGK Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz)

Die aktuellen Regelwerke DIN EN ISO 15589-1:2017 und DIN EN ISO 18086:2017 sowie die DIN EN 50162:2004 stellen grundsätzlich widersprüchliche Anforderungen an die Einstellung des KKS. Diese Problematik lässt sich vereinfacht wie folgt darstellen. Stärker negative Einschaltpotenziale sind erforderlich für

- die Erreichung der erforderlichen IR-freien Potenziale gemäß DIN EN ISO 15589-1 sowie
- den Schutz gegen Streustromkorrosion gemäß DIN EN 50162.

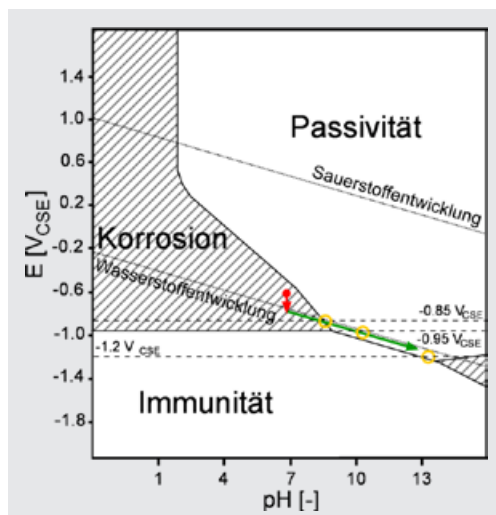
Weniger negative Einschaltpotenziale hingegen sind erforderlich für

- den Schutz gegen Wechselstromkorrosion gemäß DIN EN ISO 18086 und
- die Vermeidung von Überpolarisation gemäß DIN EN ISO 15589-1.

In vielen Fällen ist es nicht möglich, sämtliche Anforderungen zu erfüllen. So kann es unvermeidbar sein, ein erhöhtes Risiko für Wechselstromkorrosion und Überschutz in Kauf zu nehmen, um einen ausreichenden Schutz gegen Streustromkorrosion zu erreichen. Anstelle einer strikten Umsetzung von einzelnen normativen Anforderungen bei gleichzeitiger Verletzung von anderen sollte aber eine gezielte optimierte Einstellung des KKS erfolgen, welche die verschiedenen Einflussgrößen berücksichtigt und das Risiko für die Anlage minimiert. Die dazu erforderliche numerische Beschreibung der relevanten Einflussgröße wurde im Rahmen eines DVGW-Forschungsvorhabens validiert [1].

Damit sind die erforderlichen Werkzeuge verfügbar, um die messtechnisch relevanten Größen für die Bewertung heranzuziehen. Insbesondere kann unter Berücksichtigung des Einschaltpotentials, der Wechselspannung, des Bodenwiderstandes, der Rohrwandstärke, Spannungstrichtern von Fehlstellen, der Härte der Bodenlösung, der Feinheit der Bettung, der Strömung sowie der Bodenbelüftung eine Be-

Abb. 1: Polarisation von Stahl mit einem kathodischen Strom, dargestellt im Pourbaix-Diagramm [10]. Der rote Pfeil stellt den Beitrag der Aktivierungspolarisation und der grüne Pfeil den Beitrag der deutlich langsameren Konzentrationspolarisation dar. Die gelben Kreise verdeutlichen die Lage der Schutzkriterien gemäß EN ISO 15589-1.



Quelle: Der Autor

wertung der Korrosionssituation in Bezug auf die genannten Anforderungen vorgenommen werden. Damit wird es nicht nur möglich, die Einstellung des KKS zu optimieren, sondern auch Kontrollparameter zu definieren.

Grenzwerte für den KKS

Die Bewertung des Kathodischen Korrosionsschutzes stützt sich wesentlich auf den heutigen Kenntnisstand der relevanten Einflussgrößen [1–3]. Diese können wie folgt zusammengefasst werden. Gemäß DIN EN ISO 8044:2015 besteht die Polarisation, welche durch den kathodischen Schutzstrom bewirkt wird, aus zwei Beiträgen: der Aktivierungs- und der Konzentrationspolarisation. Unmittelbar nach Einschalten des kathodischen Stroms baut sich die Aktivierungspolarisation gemäß [4] innerhalb von Millisekunden auf. In dieser kurzen Zeit können keine relevanten Konzentrationsveränderungen auftreten, sodass der Stromfluss in erster Linie eine Verschiebung des Potentials in negativer Richtung bis zur Grenze des Stabilitätsbereichs des Wassers (die Gleichgewichtslinie für Wasserstoffentwicklung) bewirkt (roter Pfeil in **Abb. 1**).

Die aufgrund der Aktivierungspolarisation ablaufende Sauerstoffreduktion und Wasserstoffentwicklung führen beide zu einer Erhöhung des pH-Werts an der Stahl/Boden-Grenzfläche. In der Folge kommt es gemäß [4] ab ca. 0,1 Sekunden zum Aufbau einer Konzentrationspolarisation, die zu einer Erhöhung des pH-Werts führt. Diese Konzentrationspolarisation resultiert in einer Verschiebung des IR-freien Potentials parallel zur Gleichgewichtslinie für Wasserstoffentwicklung (grüner Pfeil in **Abb. 1**).

Da die Bildung von Wasserstoff zu Wasserstoffblasen mit einem Druck von ca. 1 bar einhergeht, liegen weitestgehend Standardbedingungen vor, sodass experimentell eine gute Übereinstimmung mit den theoretisch erwarteten Werten gefunden wird. Damit wird deutlich, dass die Messung des IR-frei-

en Potentials einer pH-Wert-Messung entspricht, wie dies von [2] beschrieben wurde. Damit können die Schutzkriterien gemäß DIN EN ISO 15589-1 einfach erklärt werden. Ein IR-freies Potenzial von $-0,85 V_{CSE}$ entspricht einem pH-Wert von 9, der gerade ausreichend für Passivität ist. Ein IR-freies Potenzial von $-0,95 V_{CSE}$ wiederum entspricht einem pH-Wert von 10,5, der die Passivierung auch in aggressiven Böden ermöglicht. Demgegenüber entspricht ein IR-freies Potenzial von $-1,2 V_{CSE}$ einem pH-Wert von mehr als 13, der zu Problemen mit der Haftung von Beschichtungen führen kann.

Die Bedeutung der Konzentrationspolarisation sowie der daraus resultierenden Passivierung ist heute allgemein akzeptiert und auch in den relevanten neueren Grundlagenwerken zum KKS entsprechend beschrieben [5, 6]. Die Betrachtungen zur Depolarisation in [4] machen dies deutlich: Die Messung von IR-freien Potentialen zwischen 0,1 und einer Sekunde nach Unterbrechen des Schutzstroms kann unmöglich die Aktivierungspolarisation erfassen, da diese bereits innerhalb einer Millisekunde depolarisiert ist. Wenn in der praktischen Anwendung eine Sekunde nach dem Unterbrechen des Schutzstroms IR-freie Potentiale oder auch Ausschaltpotentiale von $-0,95$, $-1,0$ oder $-1,2 V_{CSE}$ gemessen werden, dann kann es sich gemäß [4] ausschließlich um die Beiträge der Konzentrationspolarisation, das heißt die Sauerstoffverarmung, die pH-Erhöhung und die daraus resultierende Passivierung handeln. Tatsächlich können derart negative IR-freie Potentiale nur bei erhöhten pH-Werten gefunden werden, wie bereits 1951 gezeigt wurde [7]. Daraus folgt, dass die erfolgreiche Anwendung des KKS in den letzten 90 Jahren ausschließlich auf Konzentrationspolarisation, Erhöhung des pH-Werts und daraus resultierender Passivierung basierte.

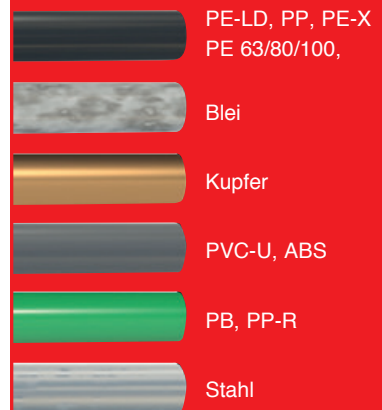
Dies führt zu einer wesentlichen Schlussfolgerung: Das IR-freie Potential ist gar nicht ursächlich mit dem Korrosionsschutz verknüpft, sondern

Universal- kupplung – Eine für Alles!



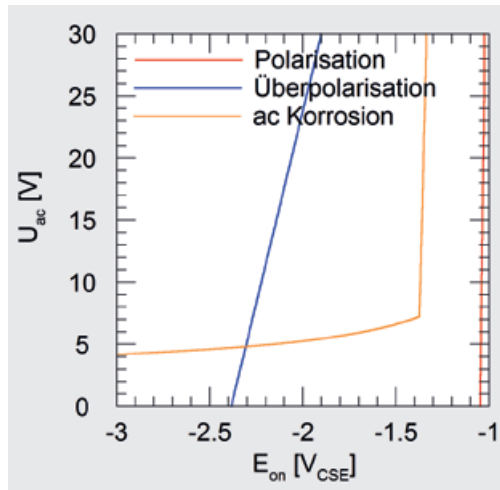
Serie 19 Universal- kupplungen

... verbinden Rohre
aus gleichen
oder verschiedenen
Rohrmaterialien.



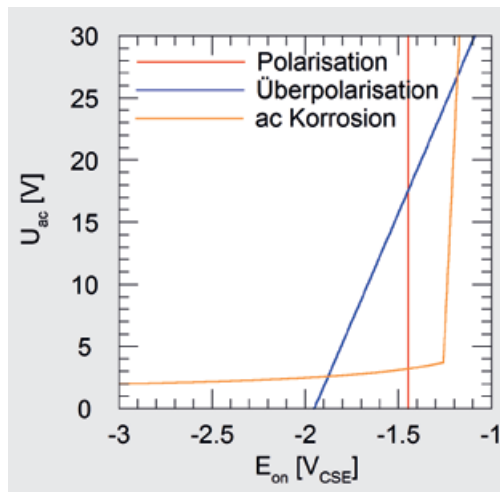
PLASSON
Mensch · Produkt · Service

Abb. 2: Grenzwerte in Bezug auf zulässige Einschaltpotenziale sowie Wechselspannung für Polarisation, Überpolarisation und Wechselstromkorrosion für eine hochwertig umhüllte Rohrleitung in homogenem Boden mit Widerständen zwischen 30 und 100 Ωm .



Quelle: Der Autor

Abb. 3: Grenzwerte in Bezug auf zulässige Einschaltpotenziale sowie Wechselspannung für Polarisation, Überpolarisation und Wechselstromkorrosion für eine hochwertig umhüllte Rohrleitung in heterogenem Boden mit Widerständen zwischen 10 und 1.000 Ωm .



Quelle: Der Autor

stellt lediglich eine pH-Wert-Messung dar; diese Messung wird durch Sauerstoff beeinflusst. Dies erklärt die IR-freien Potenziale von -0,75 und -0,65 V_{CSE} in DIN EN ISO 15589-1 in gut belüfteten Böden. Da diese Werte ebenfalls nur mit einem erhöhten pH-Wert und Passivität erklärt werden können [2], ergibt sich ein schlüssiges Bild der beim KKS ablaufenden Prozesse und der zugehörigen Schutzkriterien. Dieses relativiert die Bedeutung des IR-freien Potentials für die Bewertung des KKS. Der sich einstellende pH-Wert ist in erster Linie eine Funktion der in der Fehlstelle auftretenden Stromdichten [2]; der hier beschriebene Ansatz ist die Basis für das DVGW-Arbeitsblatt GW 20. Dabei wird von einer minimal erforderlichen Stromdichte ausgegangen. Dies entspricht einer minimal erforderlichen Erhöhung des pH-Werts für die Passivierung.

Lösungsansätze

Um Korrosionsschutz zu erreichen, ist eine minimale Stromdichte erforderlich, die – abhängig von Fehlstellengröße und Bodenwiderstand –

durch ein minimales Einschaltpotenzial erreicht werden kann. Abhängig von diesen Randbedingungen besteht aber auch das Risiko von Überschutz und Wechselstromkorrosion. In dicht bebauten Gebieten wird die Situation zusätzlich durch die Beeinflussung von Drittstrukturen durch Spannungstrichter verschärft. Nun gilt es, alle diese Risiken gegeneinander abzuwägen und eine Betrachtung unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren vorzunehmen. Die Vorgehensweise wird im Folgenden anhand von zwei Beispielen diskutiert; als Grenzwerte für die Beeinflussung wird auf die Literatur zurückgegriffen:

- Polarisation: 0,1 A/m² gemäß DVGW-Arbeitsblatt GW 20
- Wechselstromkorrosion: Grenzlinien gemäß [1]
- Streustromkorrosion: 0,1 A/m² entsprechend einem pH-Wert von 11,4 gemäß [1]
- Überpolarisation: 40 A/m² gemäß [8]
- Beeinflussung von Drittstrukturen: Bodenwiderstand [Ωm], multipliziert mit dem Faktor 1,5 [$\text{mV}/\Omega\text{m}$] gemäß DIN EN 50162

In **Abbildung 2** sind die Grenzwerte in Bezug auf zulässige Einschaltpotenziale sowie Wechselspannung für Polarisation, Überpolarisation und Wechselstromkorrosion für eine hochwertig umhüllte Rohrleitung in homogenem Boden mit Widerständen zwischen 30 und 100 Ωm dargestellt. Der Arbeitspunkt in Bezug auf mittleres Einschaltpotenzial und mittlere Wechselspannung muss zwischen der blauen und der roten sowie unterhalb der orangen Linie liegen. Es folgt, dass die Einschaltpotenziale über einen weiten Bereich von -1,05 bis -2,4 V_{CSE} gewählt werden können; bei geeigneter Wahl des Einschaltpotenzials können auch sehr hohe Wechselspannungen akzeptiert werden. Die Spannungstrichter im Abstand von 1,5 m in Bezug zur Rohrleitung betragen lediglich 3 mV, die deutlich unter den gemäß DIN EN 50162 zulässigen 45 mV für die Beeinflussung von Drittstrukturen ohne KKS liegen.

In **Abbildung 3** sind die Grenzwerte für eine hochwertig umhüllte Rohrleitung in heterogenem Boden mit Widerständen zwischen 10 und 1.000 Ωm dargestellt. Die Heterogenität der Bodenverhältnisse führt zu einem wesentlich geringeren Bereich für die Einstellung des mittleren Einschaltpotenzials. Die zulässigen mittleren Wechselspannungen müssen stark verringert werden. Der Vergleich der **Abbildungen 2**

und 3 zeigt deutlich, dass die Einstellung des Kathodischen Korrosionsschutzes wesentlich durch die Bodenverhältnisse beeinflusst wird.

Die Berechnung ermöglicht nun weitere wichtige Beurteilungsmöglichkeiten: Basierend auf einer Fehlstellenortung können die Umhüllungsfehler lokalisiert werden. Falls auf dem Leitungsabschnitt mit extremem Bodenwiderstand keine relevanten Spannungstrichter gefunden werden, kann die Berechnung entsprechen angepasst werden und es werden höhere Wechselspannungen zulässig oder das Einschaltpotenzial kann positiver eingestellt werden. Unter Berücksichtigung der lateralen Verteilung der Bodenwiderstände entlang der Rohrleitung wird zudem eine differenzierte Bewertung der zulässigen mittleren Wechselspannungen möglich.

Schlussfolgerung

Die im Rahmen des DVGW-Forschungsvorhabens validierten Berechnungsmodelle ermöglichen eine Bewertung des kathodischen Korrosionsschutzes basierend auf objektiv erfassbaren Messgrößen. Damit wird es erstmals möglich, eine Beurteilung sowie Optimierung unter Berücksichtigung von sämtlichen relevanten physikalischen und chemischen Einflussgrößen vorzunehmen. Deren Quantifizierung ermöglicht eine Risikoabschätzung und die Identifikation von potenziell kritischen Leitungsabschnitten.

Die hier vorgestellten Beispiele basieren auf vereinfachten Grenzwerten. Unter Einbezug weiterer Einflussgrößen wie der Härte der Bodenlösung, der Feinheit der Bettung, der Strömung sowie der Bodenbelüftung wird eine differenziertere Beurteilung möglich, wie sie in [9] beschrieben ist. Der vorgestellte Ansatz ermöglicht auf Basis der Ergebnisse des letzten DVGW-Forschungsvorhabens [1] den Einbezug der relevanten Einflussparameter in die Bewertung des Korrosionsschutzes. Damit wird nicht nur die Berücksich-

tigung sämtlicher Vorgaben der Normen, sondern auch eine optimierte Einstellung des KKS möglich. Auf der Grundlage dieses vertieften Verständnisses des KKS sowie der zugehörigen numerischen Modelle können nun erstmals die physikalisch bzw. chemisch relevanten Parameter identifiziert werden, welche die Basis für das Pipeline Integrity Management System (PIMS) bilden sollen. ■

Literatur

- [1] Büchler, M., Joos, D.: Die Wechselstromkorrosionsgeschwindigkeit: Die relevanten Einflussgrößen sowie deren Bedeutung für die Dauerhaftigkeit von kathodisch geschützten Rohrleitungen", in DVGW energie | wasser-praxis, Ausgabe 4/2016, S. 54–66.
- [2] Angst, U. et al.: Cathodic protection of soil buried steel pipelines – a critical discussion of protection criteria and threshold values, in: Materials and Corrosion 11, 9 (2016).
- [3] Büchler, M., Angst, U.: Kathodischer Korrosionsschutz: relevante Einflussgrößen und deren Auswirkungen, in: DVGW energie | wasser-praxis Ausgabe 6+7/2017, S. 56–67.
- [4] von Baeckmann, W.: Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz, 6. Auflage, Essen 1996.
- [5] Peabody, A. W.: Control of Pipeline Corrosion. R. L. Bianchetti, Ed. (Nace, Houston, Texas 77027, ed. 2, 2001).
- [6] Bette, U., Büchler, M.: Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. 9. Auflage, Essen 2017.
- [7] Schwerdtfeger, W. J., McDorman, O. N.: Potential and Current Requirements for the Cathodic Protection of Steel in Soils", in: Journal of Research of the National Bureau of Standards 47, 104 (1951).
- [8] Hosokawa, Y., Kajiyama, F., Nakamura, Y.: New Cathodic Protection Criteria Based on Direct and Alternating Current Densities Measured Using Coupons and Their Application to Modern Steel Pipelines", in: Corrosion Engineering Section Nace 03/2004, 304 (2004).
- [9] Criteria for Determining the Effectiveness of Cathodic Protection. No. 3002010674 (EPRI, 2017).
- [10] Pourbaix, M.: Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions (NACE, Houston, TX, 1974).

Der Autor

Dr. Markus Büchler ist Geschäftsführer der SGK Schweizerischen Gesellschaft für Korrosionsschutz.

Kontakt:

Dr. Markus Büchler
SGK Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz
Technoparkstr. 1
8005 Zürich
Schweiz
Tel.: (+41) 44 213-1590
E-Mail: markus.buechler@sgk.ch
Internet: www.sgk.ch

