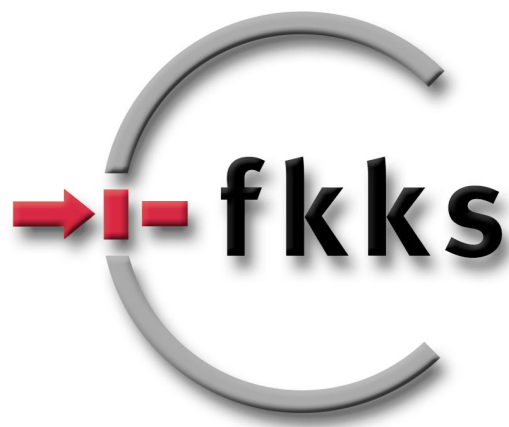


Die Mitteilungen

18. Jahrgang

September 2005

Nr. 57



Impressum: Die Mitteilungen des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e.V. werden vom Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz e.V., Sitz Esslingen am Neckar, Postfach 6004, 73717 Esslingen, Telefon (07 11) 91 99 27 20, Telefax (07 11) 91 99 27 77 herausgegeben und erscheinen vierteljährlich zum Quartalsende. Der Bezugspreis ist durch den Mitgliedsbeitrag abgegolten. Für den Inhalt verantwortlich: Dipl.-Ing. Klaus Horras, Postfach 6004, 73717 Esslingen. Für namentlich gekennzeichnete Beiträge trägt der Verfasser die Verantwortung. Nachdruck mit Quellenangabe und Übersendung von zwei Belegexemplaren erwünscht.

Abschätzung der elektrischen Eigenschaften und der Korrosionsgefährdung von kathodisch geschützten Stahlrohrleitungen in Mantelrohren aus Stahl

Fachreferat, gehalten von Dipl.-Phys. Dr. H.-G. Schöneich, E.ON Ruhrgas AG, Essen, auf der Jahreshauptversammlung 2005 des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e. V. am 18. Februar 2005 in Halle / Saale. Teil 1

Zusammenfassung

Die Korrosionsgefährdung einer kathodisch geschützten Stahlrohrleitung, die in einem Mantelrohr verlegt ist, ist im allgemeinen unbekannt, weil pragmatische Kriterien zur Bewertung der Wirksamkeit des kathodischen Korrosionsschutzes fehlen. Um diesen Mangel zu überwinden wird die im Mantelrohr verlegte Rohrleitung mit einem vereinfachten elektrischen Modell und unter Zuhilfenahme der Ergebnisse einer Überwachungsmessung beschrieben. Es werden dann Verfahren angegeben, die die Bewertung der Wirksamkeit des kathodischen Korrosionsschutzes anhand pragmatischer Kriterien erlauben. Die ermittelten Daten geben unter anderem Auskunft über den Ausbreitungswiderstand des Mantelrohres; dies kann hilfreich sein, wenn der Erdungswiderstand des Mantelrohres für die Verminderung der Hochspannungsbeflussung ausgenutzt werden soll. Es werden Ergebnisse von Messungen an bestehenden Rohrleitungen, die in Mantelrohren verlegt sind, vorgestellt und diskutiert.

Häufig benutzte Formelzeichen und Abkürzungen

U_t mittleres (IR-freies) Potential an Umhüllungsfehlstellen der Rohrleitung innerhalb des Mantelrohres
 U_f mittleres (IR-freies) Potential an den Umhüllungsfehlstellen der Rohrleitung außerhalb des Mantelrohres

U_{ma} mittleres (IR-freies) Potential der Umhüllungsfehlstellen am Mantelrohr
 U_{mi} mittleres (IR-freies) Potential an der Innenseite des Mantelrohres (= Ruhepotential)
 R_{mi} Umhüllungswiderstand der Rohrleitung innerhalb des Mantelrohres; dies entspricht dem Ausbreitungswiderstand der Umhüllungsfehlstellen im Grundwasser oder in den Feinsedimenten, die im Ringraum vorhanden sind; dieser Widerstand enthält auch den Beitrag einer ggf. vorhandenen Beschichtung der Mantelrohrinnenseite.
 R_{ma} mittlerer Umhüllungswiderstand (d. h. Ausbreitungswiderstand der Umhüllungsfehlstellen) des Mantelrohres
 R_z Wellenwiderstand der Rohrleitung außerhalb des Mantelrohres
 $R_{m/t}$ Widerstand, der zwischen der Rohrleitung und dem Mantelrohr gemessen wird
 $R_{a,min}$ minimaler Ausbreitungswiderstand einer kreisrunden Umhüllungsfehlstelle, die bei einer gegebenen Einstellung des KKS (Einschaltpotential U_{ein}) kathodisch geschützt werden kann
 U_s Schutzpotential (nach DIN EN 12954)
 $U_{t,ein}$ Einschaltpotential der Rohrleitung, gemessen gegen Bezugserde
 $U_{t,aus}$ Ausschaltpotential der Rohrleitung, gemessen gegen Bezugserde

$U_{ma,ein}$ Einschaltpotential des Mantelrohres, gemessen gegen Bezugserde
 $U_{ma,aus}$ Ausschaltpotential des Mantelrohres, gemessen gegen Bezugserde
 $U_{m/t,ein}$ Spannung, die ein eingeschaltetes KKS-Anlagen zwischen Mantelrohr und Rohrleitung gemessen wird
 $U_{m/t,aus}$ Spannung, die ein ausgeschaltetes KKS-Anlagen zwischen Mantelrohr und Rohrleitung gemessen wird
 ρ spezifischer Widerstand des Mediums im Ringraum
 J_s Mindeststromdichte für das Erreichen des Schutzpotentials U_s
 r_u mittlerer spezifischer Umhüllungswiderstand (in Ωm^2)
KKS kathodischer Korrosionsschutz

1 Einleitung

Stahlrohrleitungen sind häufig in Mantelrohren aus Stahl verlegt, wenn Straßen, Schienen oder Flüsse gekreuzt werden. Um die elektrische Trennung von der Rohrleitung sicherzustellen, werden im Allgemeinen Abstandhalter aus Kunststoff angebracht. In der Vergangenheit wurde auch an den Enden des Mantelrohres die Rohrleitung mit Blöcken aus Holz oder Kunststoff unterstützt. Üblicherweise versucht man mit Kunststoffkappen an den Enden des Mantelrohres das Eindringen von Grundwasser in den Ringraum zu verhindern. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass damit das

Inhalt

Seite 1

Abschätzung der elektrischen Eigenschaften und der Korrosionsgefährdung von kathodisch geschützten Stahlrohrleitungen in Mantelrohren aus Stahl

Fachreferat, gehalten von Dipl.-Phys. Dr. H.-G. Schöneich, E.ON Ruhrgas AG, Essen, auf der Jahreshauptversammlung 2005 des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e. V. am 18. Februar 2005 in Halle/Saale. Teil 1

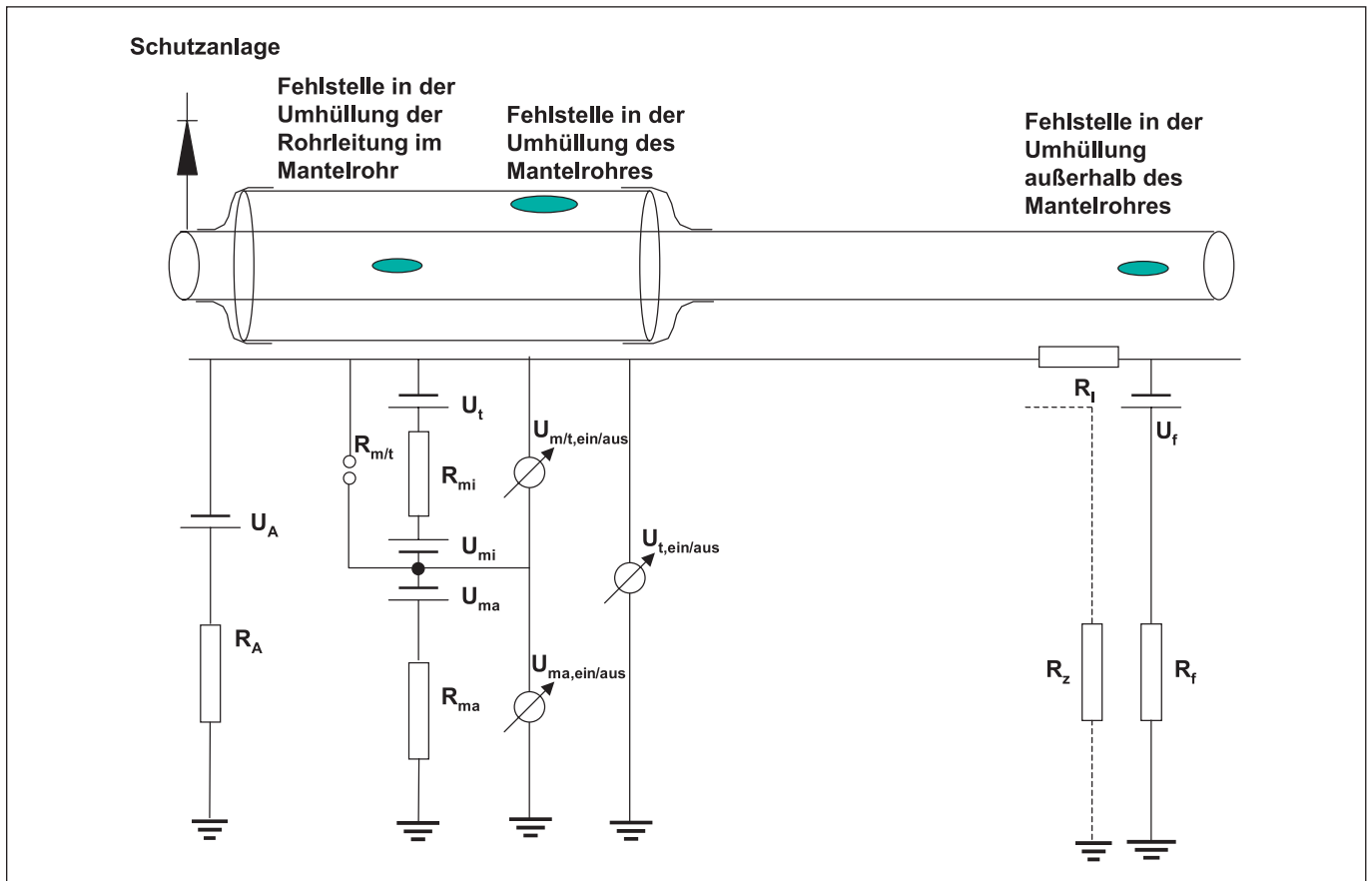


Bild 1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Rohrleitung in einem Mantelrohr

Eindringen von Wasser und/oder Feinsedimenten nicht dauerhaft verhindert wird.

Verschiedene Umhüllungen wurden und werden sowohl für die Rohrleitungen als auch für die Mantelrohre eingesetzt und das Ausmaß an Beschädigungen in der Umhüllung ist im Allgemeinen nicht bekannt. Wegen des möglichen Kontaktes mit dem Grundwasser / Feinsedimenten ist dann von einer Korrosionsgefährdung der Rohrleitung innerhalb des Mantelrohres auszugehen.

Im Falle kathodisch geschützter Rohrleitungen können einige qualitative Schlussfolgerungen zu der Situation einer Rohrleitung / Mantelrohr-Bauwerks aus den Ergebnissen von Überwachungsmessungen abgeleitet werden:

- Der Widerstand $R_{m/t}$ (siehe Anhang) und auch die Spannung $U_{m/t,ein/aus}$ zwischen Rohrleitung und Mantelrohr informiert über die Wirksamkeit der elektrischen Isolation. Weiterhin erhält man einige Hinweise auf Umhüllungsfehlstellen an der Rohrleitung innerhalb des Mantelrohres und über die Anwesenheit von Grund-

wasser / Feinsedimenten im Ringraum.

- Das Potential des Mantelrohres $U_{ma,ein/aus}$ und sein Spannungstrichter $\delta U_{ma,ein/aus}$ geben einen Hinweis auf den kathodischen Schutzstrom, der die Rohrleitung über die Wand des Mantelrohres erreicht.

In der Literatur und den gültigen Richtlinien und Normen finden sich jedoch keine Hinweise auf Messverfahren und Kriterien, die eine Bewertung der Wirksamkeit des kathodischen Korrosionsschutzes für die Rohrleitung innerhalb des Mantelrohres erlauben (in einem Sinne wie Intensivmessungen [1], die bei Rohrleitungen mit normaler Überdeckung eingesetzt werden oder Vergleichsmessungen [2], die z. B. bei Rohrabschnitten, die im HDD-Verfahren eingezogen wurden, Anwendung finden).

Die in dieser Arbeit beschriebenen Vorgehensweisen schließen diese Lücke. Sie basieren auf einigen einfachen Annahmen über die elektrischen Eigenschaften von Mantelrohren und der darin verlegten Rohrleitung. Ziel ist es, die Wirksamkeit des kathodischen Korrosionsschutzes für die im Mantel-

rohr verlegte Rohrleitung nachzuweisen.

2 Elektrische Eigenschaften des Mantelrohres, des Ringraumes und der Rohrleitung

2.1 Elektrisches Ersatzschaltbild

Es wird ein vereinfachtes Ersatzschaltbild für das Mantelrohr mit der darin verlegten Rohrleitung betrachtet: (siehe Bild 1)

Es wird angenommen, dass der Ringraum von dem umgebenden Erdbereich abgeschlossen ist, z. B. durch Verschlusskappen aus Kunststoff. Jede angegebene Fehlstelle auf der Rohrleitung im Mantelrohr, auf dem Mantelrohr und auf der Rohrleitung außerhalb des Mantelrohres wird belegt mit dem „elektrischen Mittelwert“ aller Fehlstellen auf dem jeweiligen Rohrabschnitt, d. h.: Der Ausbreitungswiderstand R_{ma} der Fehlstelle in der Umhüllung des Mantelrohres wird als Ergebnis der Parallelschaltung der Ausbreitungswiderstände aller Fehlstellen betrachtet.

Die Kombination des Ausbreitungswiderstandes R_r , der Fehlstellen in der

Umhüllung der Rohrleitung außerhalb des Mantelrohres mit dem Längswiderstand der Rohrleitung R_l , ergibt den Abschlusswiderstand R_z (siehe Abschnitt 2.2).

In analoger Weise wird das Potential U_r als mittlerer Wert der IR-freien Potentiale aller Fehlstellen auf diesem Rohrleitungsabschnitt betrachtet. In der Praxis kann U_r als das Ausschaltpotential der Rohrleitung U_{aus} gemessen werden, wenn gilt $R_z \ll R_{mi} + R_{ma}$.

Ganz ähnliche Betrachtungen gelten für die Definition des Potentials U_{ma} , der „repräsentativen“ Fehlstelle in der Umhüllung des Mantelrohres.

U_r wird definiert als Mittelwert des IR-freien Potentials der Fehlstellen an der Rohrleitung innerhalb des Mantelrohres und R_{mi} (diese Variable wurde oben als Umhüllungswiderstand der Rohrleitung innerhalb des Mantelrohres definiert) ist ein Teil des Ausbreitungswiderstand, der sich aus der elektrischen Parallelschaltung dieser Fehlstellen ergibt (siehe [3] zu der Beeinflussung des Ausbreitungswiderstandes einer Fehlstelle innerhalb des Mantelrohres durch eben dieses).

2.2 Rohrleitung außerhalb des Mantelrohres

Zur Berechnung des Abschlusswiderstandes R_z , wird der Wellenwiderstand Z , der Rohrleitung (für die unendliche Länge angenommen wird) außerhalb des Mantelrohres betrachtet. Z wird berechnet mit [4]:

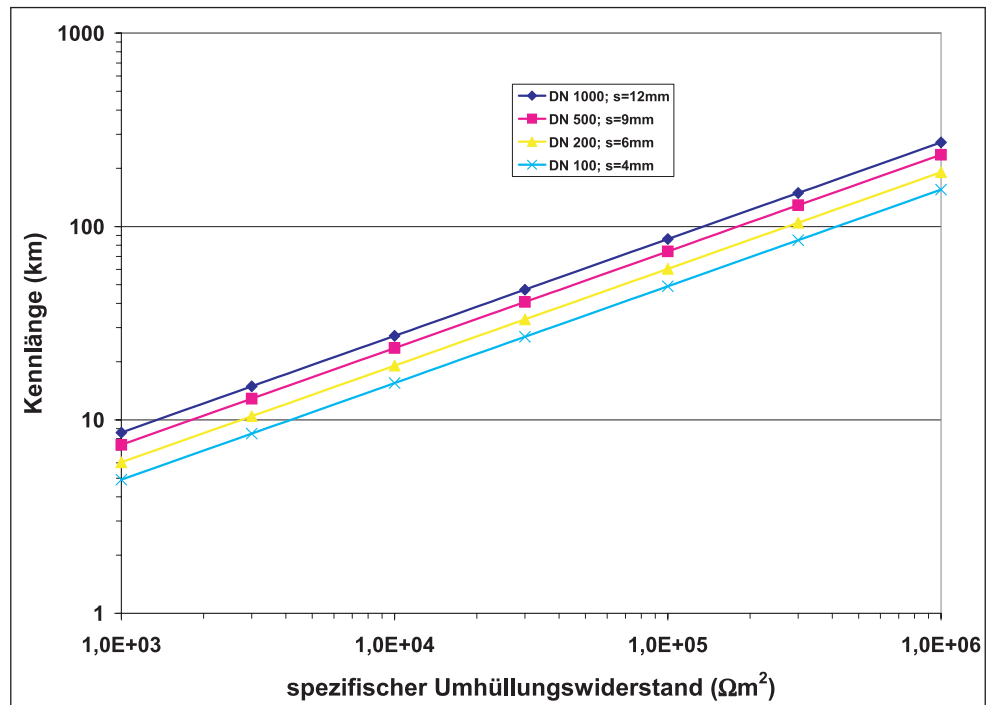
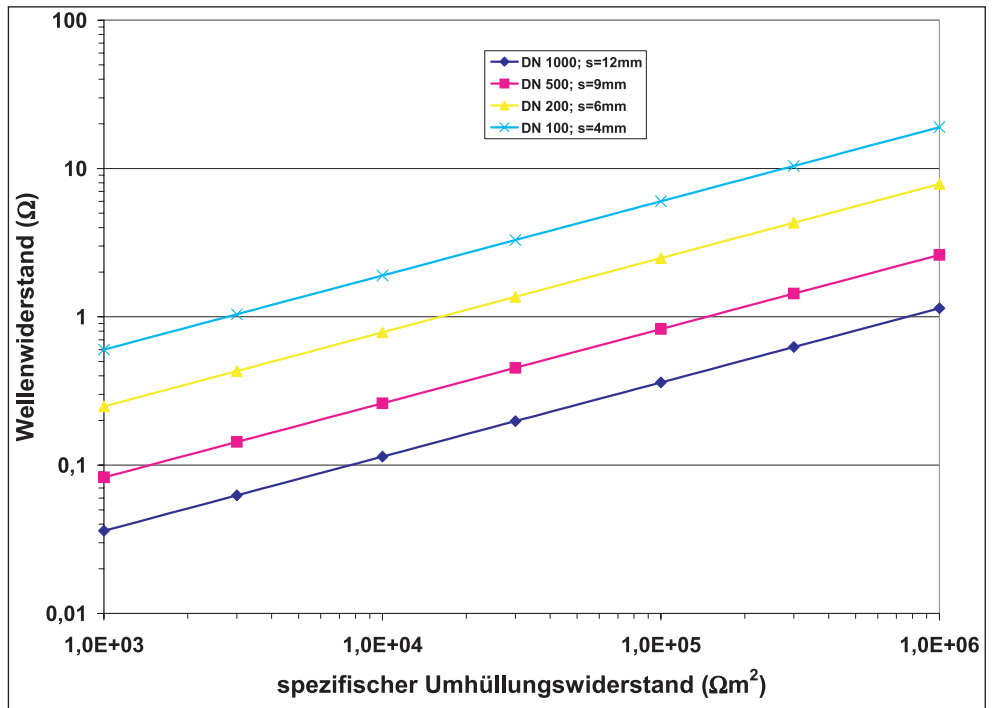
$$Z = \sqrt{\frac{R'}{G'}} \quad (1)$$

wobei $R' = \frac{4\rho_{Stahl}}{\pi(d_2^2 - d_1^2)}$ der längenbezogene

Widerstand (ρ_{Stahl} -spezifischer Widerstand des Rohrleitungsstahls, d_1 und d_2 Innen- und Außendurchmesser

der Rohrleitung) und $G' = \frac{\pi d_2}{r_u}$ der län-

genbezogene Ableitwiderstand der Rohrleitung sind (r_u -mittlerer Umhüllungswiderstand der Rohrleitung). In erster Näherung kann angenommen werden, dass eine Rohrleitung mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen wird, d.h. $R_z = Z$, wenn ihre Länge größer ist als die charakteristische Länge l_k :



$$l_k = \frac{1}{\sqrt{R'G'}} \quad (2)$$

Wenn die Rohrleitung auf beiden Seiten des Mantelrohres ihre charakteristische Länge überschreitet, dann ist R_z die Hälfte des Wellenwiderstandes Z , d. h. $R_z = Z/2$.

Beispielhaft zeigt Bild 2a den Wellenwiderstand Z (Gl. (1)) als eine Funktion des mittleren Umhüllungswiderstandes r_u für Rohrleitungen mit unterschiedlichem Außendurchmesser

d_2 und für unterschiedliche Wandstärken $s = d_2 - d_1$. Bild 2b zeigt die charakteristische Länge l_k (Gl. (2)) für diese Rohrleitungen.

Im Falle, dass die Länge L der Rohrleitung an einer Seite des Mantelrohres kürzer ist als die charakteristische Länge l_k , wird der Abschlusswiderstand $R_{z,L}$ dieses Rohrleitungsabschnittes nach Gl. (3) [4] abgeschätzt:

$$R_{z,L} = Z * \coth\left(\frac{L}{l_k}\right) = Z * \frac{1}{\tanh\left(\frac{L}{l_k}\right)} \quad (3)$$

Bild 2a (oben): Wellenwiderstand, Z , von Rohrleitungen mit verschiedenen Umhüllungswiderständen (berechnet nach Gl. (1))

Bild 2b (unten): Charakteristische Länge l_k , von Rohrleitungen mit verschiedenen Umhüllungswiderständen (berechnet nach Gl. (2))

2.3 Mantelrohr und Rohrleitung innerhalb des Mantelrohres

Die folgenden Daten können bei Überwachungsmessungen für den kathodischen Korrosionsschutz ermittelt werden (siehe Bild 1):

$U_{t,ein}$, $U_{t,aus}$, $U_{ma,ein}$, $U_{ma,aus}$, $U_{m/t,ein}$, $U_{m/t,aus}$, $R_{m/t}$ (zu den Definitionen der Variablen siehe Liste der „häufig verwendeten Formelzeichen“)

Bei der Messung sind die folgenden Angaben zu beachten:

- Wenn die Rohrleitung streustrombeeinflusst ist, müssen Potentiale und Spannungen während der Ein- bzw. Ausschaltphase der Gleichrichter zeitgleich gemessen werden. Weiterhin muss das Ausmaß der Streustrombeeinflussung während der Ein- und Ausschaltmessungen konstant bleiben.
- Der Widerstand $R_{m/t}$, zwischen der Rohrleitung und dem Mantelrohr kann mit einem Erdungsmessgerät gemessen werden; genauere Messwerte erhält man jedoch, wenn $R_{m/t}$ aus dem Spannungsabfall $\Delta U_{m/t}$ errechnet wird, den man bei einem Einspeiseversuch (Einspeisestrom ΔI) über Rohrleitung und Mantelrohr messen kann; es ist: $R_{m/t} = \Delta U_{m/t} / \Delta I$. Für beide Messtechniken sind getrennte Messleitungen für Stromeinspeisung und Spannungsmessung erforderlich.
- Die Potentiale müssen gegen Bezugs Erde gemessen werden; dies ist wichtig, wenn Fehlstellen in der Umhüllung der Rohrleitung und/oder des Mantelrohres weitreichende Spannungstrichter im Erdboden verursachen.

Für weitere Berechnungen wird das Verhältnis $A = R_{ma} / R_{mi}$ definiert; dies ist das Verhältnis aus dem Ausbreitungswiderstand des Mantelrohres R_{ma} , und dem Widerstand im Ringraum des Mantelrohres R_{mi} (siehe Bild 1). Mit Bezug auf Bild 1 kann die Variable A aus den Spannungsabfällen $U_{ma,ein} - U_{ma,aus}$ (über R_{ma}) und $U_{m/t,ein} - U_{m/t,aus}$ (über R_{mi}) berechnet werden:

$$A = \frac{R_{ma}}{R_{mi}} = \frac{(U_{t,ein} - U_{m/t,ein}) - (U_{t,aus} - U_{m/t,aus})}{U_{m/t,ein} - U_{m/t,aus}} \cdot \frac{U_{ma,ein} - U_{ma,aus}}{(U_{t,ein} - U_{ma,ein}) - (U_{t,aus} - U_{ma,aus})} \quad (4)$$

Mit Bezug auf Bild 1 gilt für den Widerstand $R_{m/t}$, der zwischen Rohrleitung und Mantelrohr gemessen wird:

$$R_{m/t} = \frac{R_{mi} * (R_{ma} + R_z)}{R_{mi} + R_{ma} + R_z} \quad (5)$$

Die Kombination mit Gl. (4) ergibt für R_{mi} :

$$R_{mi} = \frac{R_{m/t}(1+A) - R_z}{2A} + \sqrt{\left(\frac{R_{m/t}(1+A) - R_z}{2A}\right)^2 + \frac{R_{m/t}R_z}{A}} \quad (6)$$

Wenn R_z gegenüber R_{ma} vernachlässigt werden kann, d. h. $R_z \ll R_{ma}$ (siehe Gl. (5)) – dies ist im allgemeinen erfüllt bei längeren Bitumentumhüllten Rohrleitungen, die ihre charakteristische Länge l_k (Gl. (2)) erreichen oder überschreiten – erhält man einen einfachen Ausdruck für R_{mi} :

$$R_{mi} = R_{m/t} \frac{1+A}{A} \quad (7)$$

Mit Bezug auf die Angaben zu Bild 1 wird R_{mi} interpretiert als ein Teil des zusammengefassten Ausbreitungswiderstandes der Fehlstellen in der Umhüllung der Rohrleitung innerhalb des Mantelrohres.

Der Ausbreitungswiderstand des Mantelrohres, R_{ma} , kann nun aus Gl. (4) berechnet werden. Wenn man dazu Länge und Durchmesser des Mantelrohres berücksichtigt kommt man zu einigen Schlussfolgerungen hinsichtlich der Qualität der Umhüllung. Wenn Mantelrohre verwendet werden sollen um die Beeinflussung einer Wechselstrombeeinflussten Rohrleitung zu vermindern (indem z. B. eine Kondensator-Abgrenzeinheit zwischen Rohrleitung und Mantelrohr geschaltet wird [5]), ist R_{ma} der Ausbreitungswiderstand (des Erds), der z. B. bei der Berechnung der induktiven Beeinflussung eingesetzt werden muss.

Eine bessere Genauigkeit wird bei der Berechnung von R_{ma} , R_{mi} und R_z erzielt, wenn $R_{m/t}$ aus den Ergebnissen eines Einspeiseversuches abgeleitet wird (siehe oben). Während des Einspeiseversuches werden dann gleichzeitig die Änderungen von $U_{ma,ein}$ und $U_{t,ein}$ beim Einspeisen des Prüfstromes ΔI , d. h. $\Delta U_{ma,ein}$ and $\Delta U_{t,ein}$, gemessen. Analog zu Gl. (4) kann ein Verhältnis $B = R_z / R_{ma}$ definiert werden. Mit Bezug auf Bild 1 wird der Wert der Variable B aus den Spannungsabfällen $\Delta U_{t,ein}$ und $\Delta U_{ma,ein}$ über R_z and R_{ma} errechnet:

$$B = \frac{R_z}{R_{ma}} = \frac{\Delta U_{t,on}}{\Delta U_{ma,on}} \quad (8)$$

Die Kombination mit $A = \frac{R_{ma}}{R_{mi}}$ (siehe

$$\text{Gl. 4) und } R_{m/t} = \frac{R_{mi}(R_{ma} + R_z)}{R_{mi} + R_{ma} + R_z}$$

(Gl. 5) ergibt:

$$R_{mi} = R_{m/t} \left(1 + \frac{1}{A(1+B)}\right) \quad (9)$$

R_{ma} and R_z können dann aus den Definitionen der Variablen A and B errechnet werden.

Literatur

- [1] DIN EN 13 509; Messverfahren für den kathodischen Korrosionsschutz; Deutsche Fassung EN 13 509: 2003
- [2] AfK-Empfehlung Nr. 10; Verfahren zum Nachweis der Wirksamkeit des kathodischen Korrosionsschutzes an erdverlegten Rohrleitungen, Abschnitt 2.4; 2000
- [3] W. v. Baeckmann, W. Schwenk; Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes, Abschnitt 10.2.2; 4. Auflage, Wiley-VCH 1999
- [4] W. v. Baeckmann, W. Schwenk; Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes, Abschnitt 24.4.2; Wiley-VCH 1999
- [5] Ruhrgas Kompetenzcenter Korrosionsschutz; Korrosionsschutz erdverlegter Rohrleitungen, Kapitel 7; Vulkan Verlag Essen, 2002
- [6] A. Baltes, W. Queitsch, H.-G. Schöneich, W. Schwenk; Kathodischer Korrosionsschutz von mit steuerbarer Horizontalbohrung verlegten Rohrleitungsabschnitten; 3R international, 35 (1996) 377-384
- [7] R. Deiss, T. Laier; Fernüberwachung des kathodischen Korrosionsschutzes von Rohrleitungen; 3R international 38 (1999) 371-376
- [8] DVGW Merkblatt GW16; Fernüberwachung des kathodischen Korrosionsschutzes; 2002
- [9] DIN EN 12 954; Kathodischer Korrosionsschutz von metallischen Anlagen in Böden und Wässern – Grundlagen und Anwendung für Rohrleitungen; Deutsche Fassung EN 12 954:2001
- [10] W. v. Baeckmann, W. Schwenk; Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes, Abschnitt 3.3.6; 4. Auflage, Wiley-VCH 1999
- [11] ISO 15 589-1; Erdöl- und Erdgasindustrie – Kathodischer Schutz für Transportleitungssysteme – Teil 1: On-land pipelines; 2003