

Wechselstromkorrosion

Referat, gehalten von Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Vesper, Leiter des Bereichs Kathodischer Korrosionsschutz der Firma Quante AG, Wuppertal, auf dem 4. Internationalen Kolloquium der CEOCOR in Wien 1997. Teil 1.

1. Einleitung

Für die überregionale Verteilung rohrleitungsgeführter und elektrischer Energie – hierzu gehören auch Fahr- und Speiseleitungen von Wechselstrombahnen – werden vielfach gemeinsame Trassen benutzt. Vorgaben aus der Raumordnung oder landschaftlich bedingte Zwänge sind die Ursachen für diesen Bündelungseffekt.

Zwangsläufig ergeben sich so Kreuzungen und Parallelführungen für erdverlegte Stahlrohrleitungen mit Starkstromleitungen und mit Wechselstrom betriebenen Bahnanlagen. Im Einflußbereich dieser Starkstromleitungen zur Energieversorgung sowie der Fahrdrabt-Schiene-Systeme der wechselstrombetriebenen Bahnen können unterirdisch verlegte Rohrleitungen auf zwei Arten beeinflusst werden: ohmsch und induktiv.

2. Beeinflussungsarten und Vorgänge bei der Beeinflussung

Die physikalischen Zusammenhänge zu den einzelnen Beeinflussungsmöglichkeiten sind in [1] und [2] ausführlich beschrieben. Mit Bezug auf Korrosionsvorgänge, die durch Wechselstrom eingeleitet werden, sind die nachfolgend beschriebenen Zusammenhänge zu betrachten.

Bei der ohmschen Beeinflussung durch Fahrströme von Bahnen tritt ein Teilstrom des Gesamtstromes des beeinflussenden Systems aufgrund der Längsimpedanz des Primärleiters an erdfühlihen Stellen des Leiters ins Erdreich über. Z.B. nimmt bei mit 16 ⅔ Hz wechselstrombetriebenen Bahnen in der Mitte des Speiseabschnittes zwischen 2 Unterwerken bis zu 60 % des Fahrstromes diesen Weg.

Ein Teilstrom des über Erde fließenden Wechselstromes tritt an Fehlerstellen der Isolation von im Einflußbereich verlegten Rohren in die Rohre über und kann über längere Strecken hierin geführt werden.

In den Fehlerstellen der Isolation, in denen der Strom übertritt Erdreich – Rohr und Rohr – Erdreich stattfindet, können sich erhebliche Wechselstromdichten ausbilden.

Bei der Übertragung von Drehstrom können Wechselströme über Erde lediglich im Fehlerfall auftreten. Wegen der Kürze der Einwirkzeit ist die hieraus resultierende ohmsche Beeinflussung für Wechselstromkorrosionsvorgänge ohne Belang.

Induktiv werden Rohre, die in einer „Energistraße“ verlaufen, beeinflusst durch transformatorische Wirkung zwischen den Phasenteilen der Hochspannungsfreileitung als „Primärwicklung“ und dem Rohr als „Sekundärwicklung“ eines gedachten Transformators.

Das Ergebnis ist die Einkopplung von Wechselspannung, die im ungestörten Betrieb auf der Hochspannungsseite bis

zu einigen zehn Volt zwischen Rohr und Erde betragen kann, deren höchste Amplitude an den Enden der Beeinflussungsstrecke erreicht wird und deren Phase am Ende der Beeinflussungsstrecke gegenüber der Spannung am Anfang um 180° gedreht ist.

Bei Beeinflussung aus Bahnsystemen liegt in der Regel eine gemischte ohmsch-induktive Beeinflussung vor. Der Phasenwinkel zwischen der Spannung am Anfang und der Spannung am Ende der Rohrleitung weicht dann aufgrund des ohmschen Anteils von 180° ab.

3. Wesen der Wechselstromkorrosion

3.1 Ersatzschaltbild der Isolationsfehlerstelle

Die Fehlerstelle in der Rohrleitungsisolations mit ihrem Übergang zum Erdreich kann durch das elektrische Ersatzschaltbild – Bild 1 – beschrieben werden.

Parallel zum Polarisationswiderstand R_P liegt die Doppelschichtkapazität C_D , die als Kapazität der „Polarisationsdipole“ angesehen werden kann und deren Größe mit Werten zwischen 10–100 μF für 1 cm^2 Oberfläche und kathodischen Schutz angegeben wird. Ohne kathodischen Schutz ist der Wert etwa um den Faktor 100 geringer [3].

In Serie zu dieser Parallelschaltung liegt die Summe der Ausbreitungswiderstände. Bei der Frequenz 0 Hz (Gleichstrom) besitzt die Doppelschichtkapazität den Wechselstromwiderstand ∞ , während sie für hohe Frequenzen zum elektrischen Kurzschluß wird.

Sowohl für die Gleich- (Einschaltpotential) als auch insbesondere für die Wechselspannung (eingekoppelte Wechselspannung Rohr – Erde) tritt eine Spannungsteilung auf.

Bei gegebener (meßbarer) Wechselspannung Rohr – Erde wird die am Polarisationswiderstand wirksame Wechselspannung abhängig von den oben genannten Parametern herabgesetzt.

Das Spannungsverhältnis k_{\sim} von wirksamer Wechselspannung zu gemessener Wechselspannung errechnet sich zu

$$k_{\sim} = U_{\text{wirksam}} / U_{\text{gemessen}} = 1 / ((R_A / R_P) \cdot \sqrt{1 + (R_P \cdot \omega \cdot C_D)^2} + 1)$$

mit R_A = Gesamtausbreitungswiderstand

R_P = Polarisationswiderstand

ω = Kreisfrequenz der Beeinflussungsspannung

C_D = polarisationsabhängige Doppelschichtkapazität

Die am Polarisationswiderstand wirksame Wechselspannung ist um den Faktor k_{\sim} kleiner als die gemessene Spannung Rohr – Erde.

Bei gegebener Frequenz der Wechselspannung lässt sich die Abhängigkeit des Spannungsteilerverhältnisses k_{\sim} von der Doppelschichtkapazität für verschiedene Verhältnisse R_A / R_P darstellen (Bild 2). Auffällig ist, daß k_{\sim} für hohe Kapazitätswerte und mittlere bis hohe Ausbreitungswiderstände gegen 0 strebt, daß bei niedrigen Ausbreitungswiderständen (niederohmige Böden, Streusalzeinfluß) der Faktor k_{\sim} vergleichsweise hohe Werte behält.

Nähert sich k_{\sim} dem Wert 0, bedeutet dies, daß am Polarisationswiderstand eine wirksame Wechselspannung nicht mehr vorhanden ist und Wechselstromkorrosionsvorgänge (s.u.) nicht mehr auftreten können. Hohe Werte der Doppelschichtkapazität treten bei starker Polarisierung auf.

Betrachtet man die Frequenzabhängigkeit von k_{\sim} , so gilt allgemein, daß k_{\sim} mit steigender Frequenz abnimmt. Wertet man die Gleichung für k_{\sim} nach den Frequenzen 16 ⅔ Hz und 50 Hz aus, so ergibt sich bei sonst gleichen Parametern für hohe Werte der Doppelschichtkapazität (starke Polarisierung) ein Unterschied um den Faktor 2 bis 3 ($k_{\sim 50 \text{ Hz}} < k_{\sim 16 \frac{2}{3} \text{ Hz}}$). Damit ist eine Spannung der Frequenz 50 Hz bei gleicher Amplitude im Sinne der Wechselstromkorrosionswirkung um den Faktor 2 – 3 weniger bedeutsam als eine Spannung der Frequenz 16 ⅔ Hz.

3.2 Der Polarisationswiderstand als Lastwiderstand für die um den Faktor k_{\sim} herabgeteilten Spannung Rohr – Erde

Die Stromdichte-Potentialkurve kann in 3 markante Bereiche unterteilt werden (Bild 3).

Bereich 1: Steiler Anstieg im 3. Quadranten, entsprechend

$\Delta U / \Delta I$ klein

Bereich 2: Quasilinearer „flacher“ Verlauf beim Übergang vom 3. Quadranten in den 1. Quadranten, entsprechend

$\Delta U / \Delta I$ groß

Bereich 3: Steiler Anstieg im 1. Quadranten, entsprechend

$\Delta U / \Delta I$ klein

Für die Spannung, die eine mit dem Innenwiderstand R_i behaftete Spannungsquelle an einem Lastwiderstand R_a erzeugt, gelten ganz allgemein die Abhängigkeiten gemäß Bild 4.

Bei gegebenem Innenwiderstand R_i der Spannungsquelle mit der Leerlaufspannung U wird der Strom I durch den Lastwiderstand R_a um so größer, je kleiner R_a wird.

Die Spannung am Lastwiderstand U_a nimmt jedoch mit kleiner werdendem Lastwiderstand ab.

Es können nun 3 Modelle betrachtet werden, bei denen in verschiedenen Arbeitspunkten auf der Stromdichte-Potentialkurve Wechselspannung eingekoppelt wird.

Modell 1:

Als erstes soll angenommen werden, daß kein kathodischer Schutz vorhanden ist. Entsprechend liegt der Arbeitspunkt beim Schnittpunkt der Stromdichte-Potentialkurve mit der Abszisse (Bild 5).

Zu erkennen ist, daß die positive Halbwelle durch den kleinen Widerstand des steil ansteigenden Astes im 1. Quadranten ($\Delta U / \Delta I$ klein) belastet wird, während die negative Amplitude durch den großen Widerstand des flachen Verlaufes der Kurve ($\Delta U / \Delta I$ groß) belastet wird.

Entsprechend den Überlegungen zu U_a wird die verbleibende positive Spannungsamplitude kleiner sein als die negative. Folge: der arithmetische Mittelwert eines zu messenden Potentials wird unter Wechselspannungseinfluß negativer.

Für den Strom bedeutet dies: die positive Amplitude der Spannung erzeugt großen Strom, die negative Amplitude erzeugt kleinen Strom, der arithmetische Mittelwert wird positiv, Folge: Korrosion.

Modell 2:

Als nächstes wird kathodischer Schutz bei recht negativem Potential angenommen (Bild 6). Entsprechend liegt der Arbeitspunkt kurz vor dem steilen Abfall der Stromdichte-Potential-Kurve (Wasserstoffentwicklung).

Nun ist zu erkennen, daß die negative Halbwelle durch den kleinen Widerstand des steil abfallenden Astes im 3. Quadranten ($\Delta U / \Delta I$ klein) belastet wird, während die positive Amplitude durch den großen Widerstand des flachen Verlaufes der Kurve ($\Delta U / \Delta I$ groß) belastet wird.

Entsprechend den Überlegungen zu U_a wird die verbleibende negative Spannungsamplitude kleiner sein als die positive.

Folge: der arithmetische Mittelwert eines zu messenden Potentials wird unter Wechselspannungseinfluß positiver.

Für den Strom bedeutet dies: die positive Amplitude der Spannung erzeugt kleinen Strom, die negative Amplitude erzeugt großen Strom, der arithmetische Mittelwert wird negativ, Folge: zusätzlicher kathodischer Schutz.

Modell 3:

Als dritter Fall soll angenommen werden, daß bei gleichem Arbeitspunkt wie in Bild 6 eine Wechselspannung mit einer solch hohen Scheitelamplitude \hat{u} eingekoppelt wird, daß die Stromdichte-Potential-Kurve bis in den anodischen Bereich angesteuert wird (Bild 7).

Als wesentliches erkennt man hier, daß neben der zusätzlichen negativen Strom-Zeit-Fläche noch eine zusätzliche kleine positive Strom-Zeit-Fläche gebildet wird. Der Mittelwert des Stromes bleibt jedoch negativ, also im Bereich des kathodischen Schutzes. Im Laborversuch trat keine Korrosion auf.

Fortsetzung in Folge 26

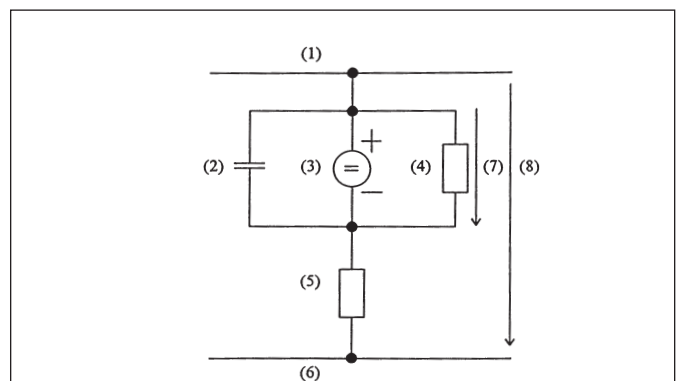


Bild 1: Elektrisches Ersatzschaltbild einer Fehlerstelle in der Rohrisolierung

- (1) Rohrleitung
- (2) Doppelschichtkapazität C_D
- (3) Polarisationsspannung
- (4) Polarisationswiderstand R_p
- (5) Summe der Ausbreitungswiderstände R_A
- (6) Erdreich
- (7) Am Polarisationswiderstand wirksame Wechselspannung
- (8) Wechselspannung Rohr - Boden

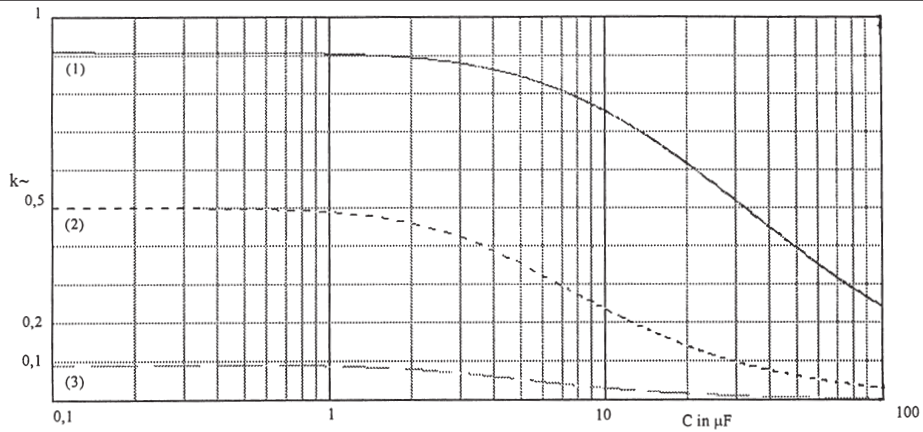


Bild 2: Abhängigkeit der Abschwächung k_{\sim} von der Doppelschichtkapazität C_0

Parameter: Frequenz = 50 Hz
 Polarisationswiderstand = 1 k Ω
 Ausbreitungswiderstand = 0,1 k Ω (1)
 = 1,0 k Ω (2)
 = 10,0 k Ω (3)

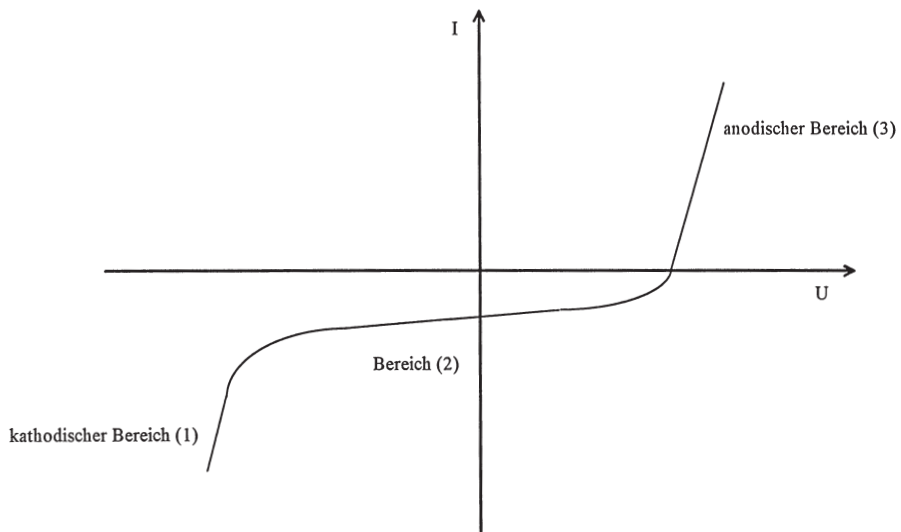


Bild 3: Schematische Darstellung der stationären Stromspannungskurve

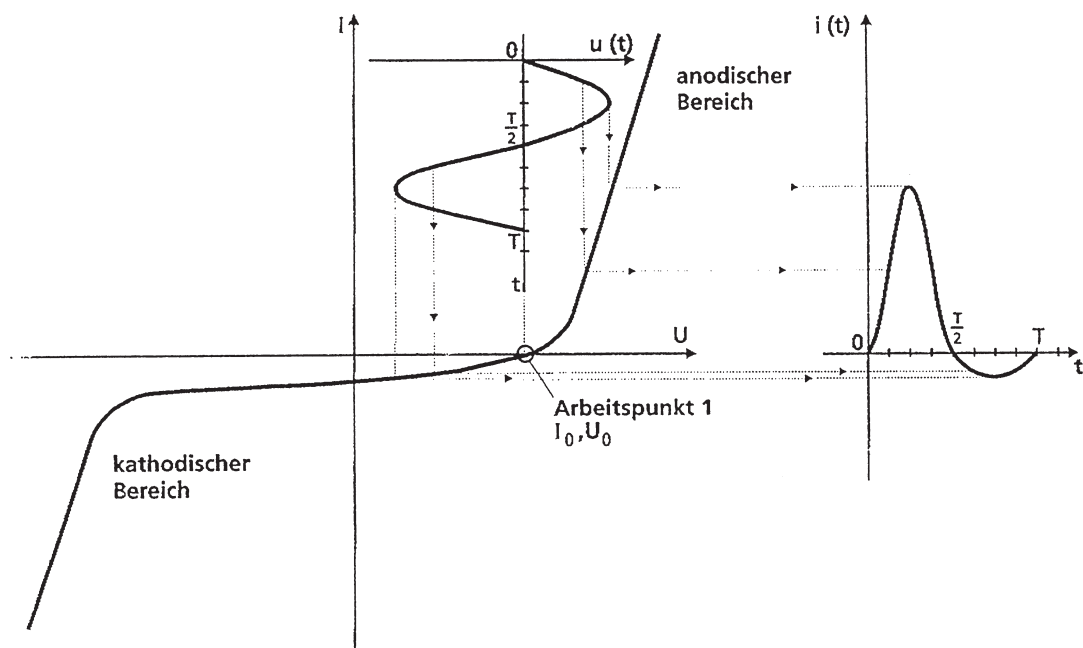
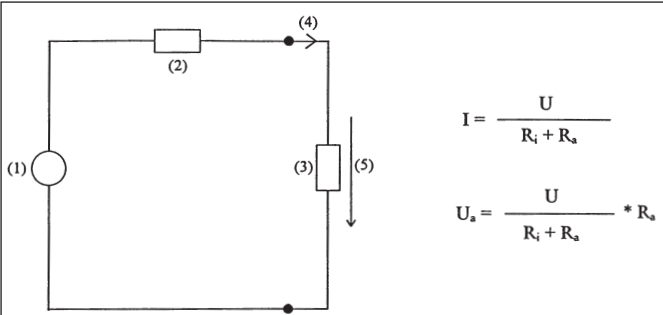


Bild 5: Stromspannungskurve mit eingekoppelter Wechselspannung



$$I = \frac{U}{R_i + R_a}$$

$$U_a = \frac{U}{R_i + R_a} * R_a$$

Bild 4: Spannungsquelle mit Lastwiderstand

- (1) Spannungsquelle mit Leerlaufspannung U
- (2) Innenwiderstand der Spannungsquelle R_i
- (3) Lastwiderstand R_a
- (4) Strom durch den Lastwiderstand I
- (5) Spannung am Lastwiderstand U_a

Impressum: Die Mitteilungen des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e.V. werden vom Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz e.V., Sitz Esslingen a. N., Postfach 60 50, 73717 Esslingen, Telefon (07 11) 91 99 01-0, Telefax (07 11) 91 99 01-11 herausgegeben und erscheinen vierteljährlich. Der Bezugspreis ist durch den Mitgliedsbeitrag abgegolten. Für den Inhalt verantwortlich: Hans J. Spieth, Postfach 60 50, 73734 Esslingen. Redaktion: Dipl.-Phys. W. v. Baeckmann, Essen, Hans J. Spieth, Esslingen. Für namentlich gekennzeichnete Beiträge trägt der Verfasser die Verantwortung. Nachdruck mit Quellenangabe und Übersendung von zwei Belegexemplaren erwünscht.

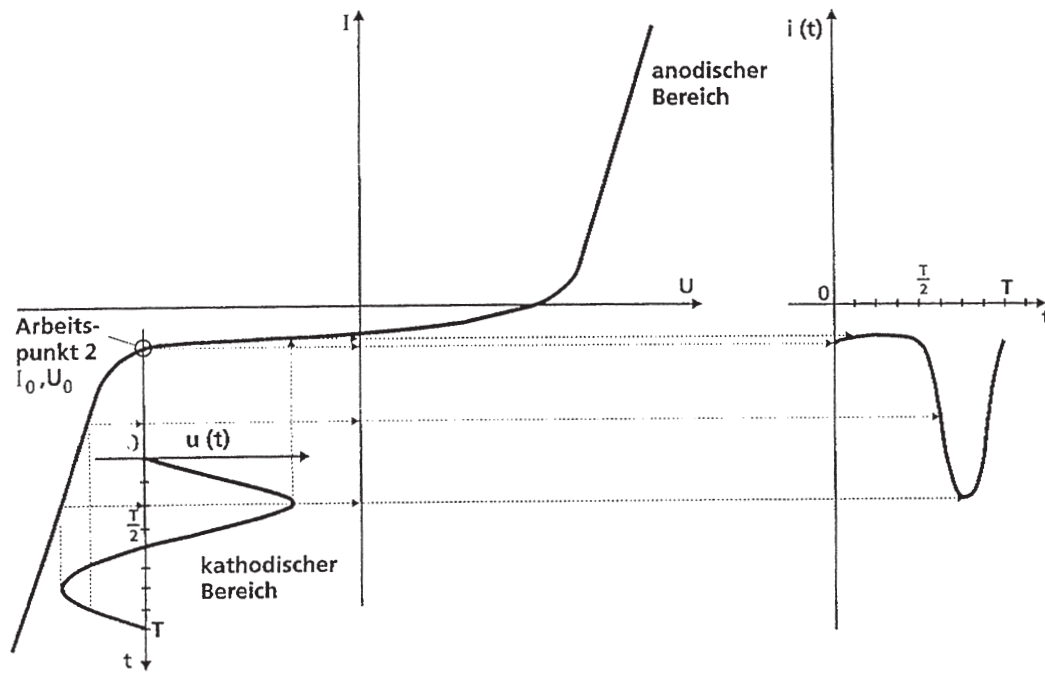


Bild 6: Stromspannungskurve mit eingekoppelter Wechselspannung

Bild 7: Stromspannungskurve mit eingekoppelter Wechselspannung

