

Wechselstrombeeinflussung und Wechselstromkorrosion

Fachreferat gehalten von Dr. Schöneich / Ruhrgas AG, Essen, auf der Jahreshauptversammlung 1994 in Hamburg – 2. Folge

Phänomenologie und Grundlagen der Wechselstromkorrosion

Phänomenologie

Stellvertretend für alle bisher bekannt gewordenen Korrosionsangriffe an Rohrleitungen, die durch Wechselstromkorrosion verursacht wurden, soll hier ein Fall beschrieben werden, der im Wallis (Schweiz) aufgetreten ist. Es handelt sich um eine Polyethylenumhüllte kathodisch geschützte Rohrleitung, die durch eine Wechselstrombahn (16 ⅔ Hz) beeinflusst wird. An einer Umhüllungsbeschädigung hatten die Korrosionsprodukte zu einer Aufwölbung der Umhüllung geführt.

Abb. 7: Umhüllungsbeschädigung und Wechselstrom-Korrosionsschaden an einer kathodisch geschützten Polyethylenumhüllten Rohrleitung



U_{\sim}	≈	35 V
f	=	16 ⅔ Hz
I_{\max}	=	3,2 mm
d	=	ca. 20 mm
pH	>	10
Alter	=	13 Jahre

Nach der Beseitigung der Umhüllung und der Korrosionsprodukte kamen muldenförmige scharf begrenzte Korrosionsangriffe mit einer Lochtiefe von mehreren mm zum Vorschein und anhand der konzentrischen Kreise um die Korrosionsmulde erkennt man, daß in diesem Bereich ein Disbonding der Polyethylenumhüllung stattgefunden hat. Die übrigen Daten zeigten, daß der Mittelwert der induzierten Wechselspannung etwa 35 Volt betrug und daß der pH-Wert in der unmittelbaren Nähe des Korrosionsangriffes größer als 10 ist und damit weit im alkalischen Bereich liegt, was die korrekte Einstellung des kathodischen Korrosionsschutzes bestätigt.

Die bisherigen Erkenntnisse aus den bekanntgewordenen Wechselstrom-Korrosionsfällen an kathodisch geschützten Rohrleitungen zusammenfassend kann man sagen:

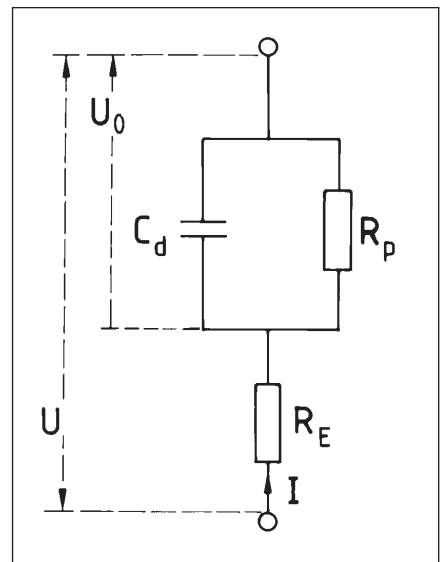
- Ergebnisse der Überwachungsmessungen des kathodischen Korrosionsschutzes lassen keine Rückschlüsse auf eine Wechselstromkorrosionsgefährdung zu.
- Korrosionsangriffe werden an Umhüllungsbeschädigungen mit Flächen in der Größenordnung von 10 cm² und kleiner gefunden. Das Umhüllungsmaterial der Rohrleitung hat keinen Einfluß.
- Für die Höhe der Wechselspannung gibt es nach unten keinen Grenzwert.
- Der pH-Wert auf der korrodierten Stahloberfläche ist häufig größer als 10.

Grundlagen der Wechselstromkorrosion

Bis 1985 ging man davon aus, daß Wechselspannungen, die in eine Rohrleitung induziert wurden und die zu einem Wechselstromfluß von der Rohrleitung in das umgebende Erdreich führen, vom Standpunkt einer Korrosionsgefährdung hergesehen unkritisch sind. Das prinzipielle elektrische Er-

satzschaltbild einer Umhüllungsbeschädigung (vgl. Abb. 8), die in Kontakt mit dem Erdboden steht, wurde zur Begründung herangezogen.

Abb. 8: Ersatzschaltbild einer Umhüllungsbeschädigung (Stahl in Kontakt mit Erdboden)



In erster Näherung kann die Phasengrenze, d.h. die Grenzfläche zwischen Stahl und Erdboden durch die Parallelschaltung einer Kapazität C_D (Doppelschichtkapazität) und eines Widerstandes R_p (Polarisationswiderstand) beschrieben werden. Beide Schaltelemente sind von den jeweiligen chemischen und elektrischen Bedingungen abhängig und müssen auf die Fläche des Stahls bezogen werden, die mit dem Erdboden in Kontakt steht (Richtwerte sind: $C_D = 10 - 100 \mu\text{F}/\text{cm}^2$, $R_p = 1 - 1000 \Omega\text{cm}^2$). R_E ist der Ausbreitungswiderstand der Stahlfläche im Erdboden. Eine Polarisation der Stahloberfläche tritt ein, wenn über den Polarisationswiderstand ein Strom fließt. Ein Gleichstrom I , der vom Erdboden zur Stahloberfläche fließt, bewirkt kathodischen Korrosionsschutz. Der dadurch hervorgerufene Span-

nungsabfall U_0 am Polarisationswiderstand bedingt die Verschiebung des Potentials hin zu negativeren Werten, die als Polarisation bezeichnet wird. Analog bewirkt ein Gleichstrom, der vom Stahl zum Erdboden fließt eine verstärkte Korrosion. Der Spannungsabfall am Polarisationswiderstand führt jetzt zu einer Verschiebung des Potentials in positive Richtung. Für einen Wechselstrom bietet sich ein zweiter Pfad über die Doppelschichtkapazität an. Es kommt nun zu einer Aufteilung des Stromes entsprechend dem Verhältnis der Leitwerte von Doppelschichtkapazität und Polarisationswiderstand. In der Vergangenheit wurde nun immer vermutet, daß der Leitwert der Doppelschichtkapazität gegenüber dem des Polarisationswiderstandes so hoch ist, daß die Stimulation der Korrosion vernachlässigbar ist. Man kann sich jedoch leicht klarmachen, daß es nur eine Frage der Höhe der Wechselstromdichte ist bis diese Vermutung nicht mehr zutreffend ist.

Viele Untersuchungen, die in den vergangenen Jahren durchgeführt wurden, betrafen gerade diese Frage: Bei welchem Betrag der Wechselstromdichte muß mit einer Korrosionsgefährdung gerechnet werden? Unter den verschiedensten Bedingungen wurden Korrosionsexperimente durchgeführt. Insbesondere wurden die folgenden Parameter variiert:

- Wechselstromdichte
- Gleichstromdichte
- Chemische Eigenschaften des Mediums, das den Erdboden simuliert.

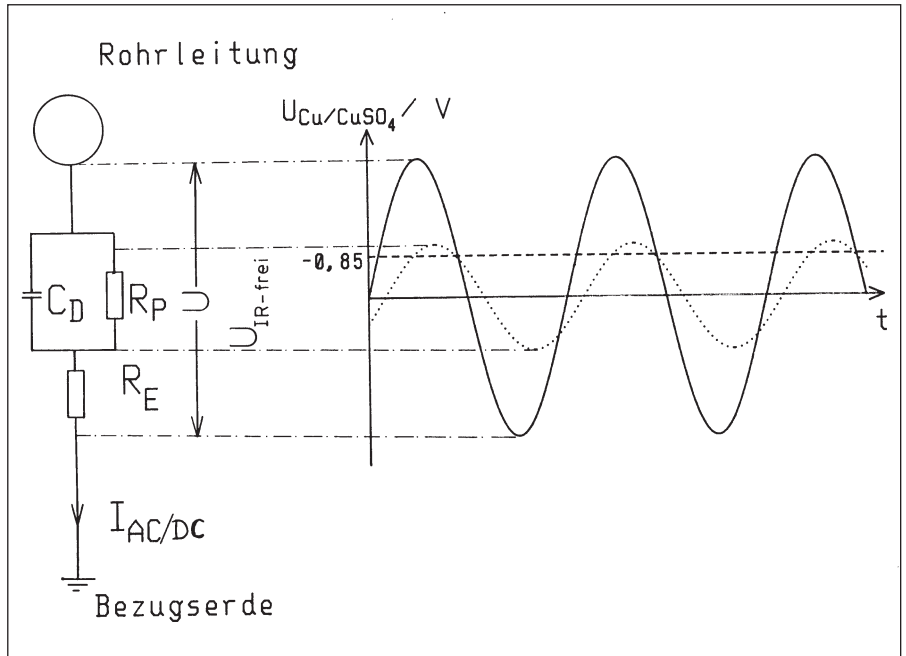
Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in DIN 50925 eingeflossen und lautet: „Bei starker Wechselstrombeeinflussung mit Stromdichten über 30 A/m^2 ist das Schutzpotentialkriterium nach derzeitigen Erkenntnissen nicht in allen Fällen anwendbar“. Für die Praxis beinhaltet dieser Satz zwei wichtige Aussagen: Zum einen muß an Umhüllungsbeschädigungen, in denen die Wechselstromdichte 30 A/m^2 übersteigt, mit einer Korrosionsgefährdung gerechnet werden. Zum anderen kann diese Korrosionsgefährdung nicht mit Hilfe einer Potentialmessung (und damit auch nicht mit einer Intensivmessung) sicher erkannt werden.

Ein weiteres Ergebnis dieser Messungen soll erwähnt werden: Die Stromausbeute für die Korrosionsreaktion, die für Gleichstrom entsprechend dem Faradayschen Gesetz 100 % beträgt, erreicht bei Wechselstrom im Frequenzbereich von $16 \frac{2}{3}$ bis 50 Hz nur etwa 1 bis 0,1 % oder sie ist sogar noch kleiner. Dies bedeutet, daß nur dieser geringe Teil der Ladung des positiven Teils der anodischen Halbwelle des Wechselstromes zur Korrosionsreaktion beiträgt.

Modellvorstellungen

Aus den beschriebenen praktischen und experimentellen Kenntnissen können die in Abb. 9 dargestellten Modellvorstellungen abgeleitet werden.

Abb. 9: Ersatzschaltbild einer Umhüllungsbeschädigung und schematische Darstellung des Rohr/Boden Potentials (mit und ohne IR-Anteil)



Der in die Umhüllungsbeschädigung fließende Strom ist die Summe aus dem eintretenden Schutzstrom und dem überlagerten Wechselstrom; im zeitlichen Mittel ist dies also ein kathodischer Strom. Er verursacht an der Kombination $C_D/R_P/R_E$ einen Spannungsabfall, der mit einer auf den Erdboden aufgesetzten Bezugselektrode als Rohr/Boden Potential gemessen werden kann. Mit einem wechselfeldmindernden Meßgerät wird nur der Gleichspannungsanteil - das Einschaltpotential - gemessen, der durch den Schutzstrom verursacht wird. Mit einem Oszillographen kann der zeitliche Verlauf dieser Spannung gemessen werden. Insbesondere bei Beeinflussung der Rohrleitung durch 50 Hz Hochspannungsleitungen wird häufig ein recht sauberer sinusförmiger Spannungsverlauf gemessen (in Abb. 9 als durchgezogene Linie dargestellt). Diese Spannung enthält den gesamten IR-Anteil (Spannungsabfall an R_E). Man kann nun versuchen zu überlegen, wie sich die durch den Summenstrom verursachte Polarisation, d.h. der Spannungsabfall über dem Polarisationswiderstand verhält (die Messung dieser Spannung ergäbe das IR-freie Potential der stromdurchflossenen Umhüllungsbeschädigung). Da die beeinflussende Hochspannungsleitung nicht kurzzeitig abgeschaltet werden kann, scheidet eine „Ausschaltpotentialmessung“ aus.

Man kann aber gedanklich eine (ideale) Meßprobe verwenden, bei der durch geschickte Anordnung der Bezugselektrode in unmittelbarer Nähe der Stahlfläche jeglicher IR-Anteil in der Potentialmessung eliminiert wird. Der dann übrigbleibende Spannungsabfall über dem Polarisationswiderstand ist das IR-freie Potential der Meßprobe, das nun nicht mehr zeitlich konstant ist,

sondern vermutlich mit der Frequenz des fließenden Wechselstromes schwanken wird (vgl. gepunktete Linie in Abb. 9).

Es ist nun nur noch ein kleiner Schritt bis zu der Annahme, daß in der Phase, in der das IR-freie Potential positiver als $U_{Cu/CuSO_4} = -0,85 \text{ V}$ an der Stahlfläche ein Korrosionsabtrag stattfindet, aber diese Vermutung kann bislang nur eingeschränkt belegt werden. Die Vorstellungen sind aber in Einklang mit den folgenden Befunden aus der Praxis:

- das mittlere Potential eines Probeblechs (s.u. ist in der Regel negativer als $U_{Cu/CuSO_4} = -0,85 \text{ V}$).
- Nur ein geringer Teil der Ladung der anodischen Halbwelle trägt zum Korrosionsvorgang bei
- An Wechselstrom-Korrosionsschäden werden hohe pH-Werte gefunden (verursacht durch den kathodischen Summenstrom)

Es erscheint daher lohnend, diese Vorstellungen weiter zu verfolgen. Da zur Zeit aber noch der Nachweis fehlt, daß das IR-freie Potential auch für die Bewertung der Gefährdung durch Wechselstromkorrosion eine geeignete Meßgröße ist und darüber hinaus eine einsatzbereite Meßtechnik nicht zur Verfügung steht, ist man in der Praxis auf die Anwendung des oben genannten Stromdichtekriteriums angewiesen.

Einsatz von Probeblechen

Die Wechselstromdichte in der Umhüllungsbeschädigung einer Rohrleitung kann nicht direkt gemessen werden. Bei der Arbeit mit diesem Kriterium ist man daher auf rechnerische Abschätzungen oder auf Messungen an Probeblechen angewiesen. Für die Wechselstromdichte J in einer kreisförmigen Umhüllungsbeschädigung gilt näherungsweise die in Abb. 10 beschriebene Beziehung.

Abb. 10: Abschätzung der Wechselstromdichte in einer kreisförmigen Umhüllungsbeschädigung

Kriterien für den Schutz gegen Wechselstromkorrosion ruhrgas

J = Wechselstromdichte in einer Umhüllungsbeschädigung

$J < 30 \text{ A/m}^2$ keine Gefährdung

$30 \text{ A/m}^2 < J < 100 \text{ A/m}^2$ Korrosionsgefährdung möglich

$J > 100 \text{ A/m}^2$ Korrosionsgefährdung

$$J = \frac{8 U}{\rho \pi d}$$

Beispiel

Wechselspannung $U = 20 \text{ V}$
 Beschädigung $d = 2 \text{ cm}$
 spez. Bodenwiderst. $\rho = 20 \Omega$

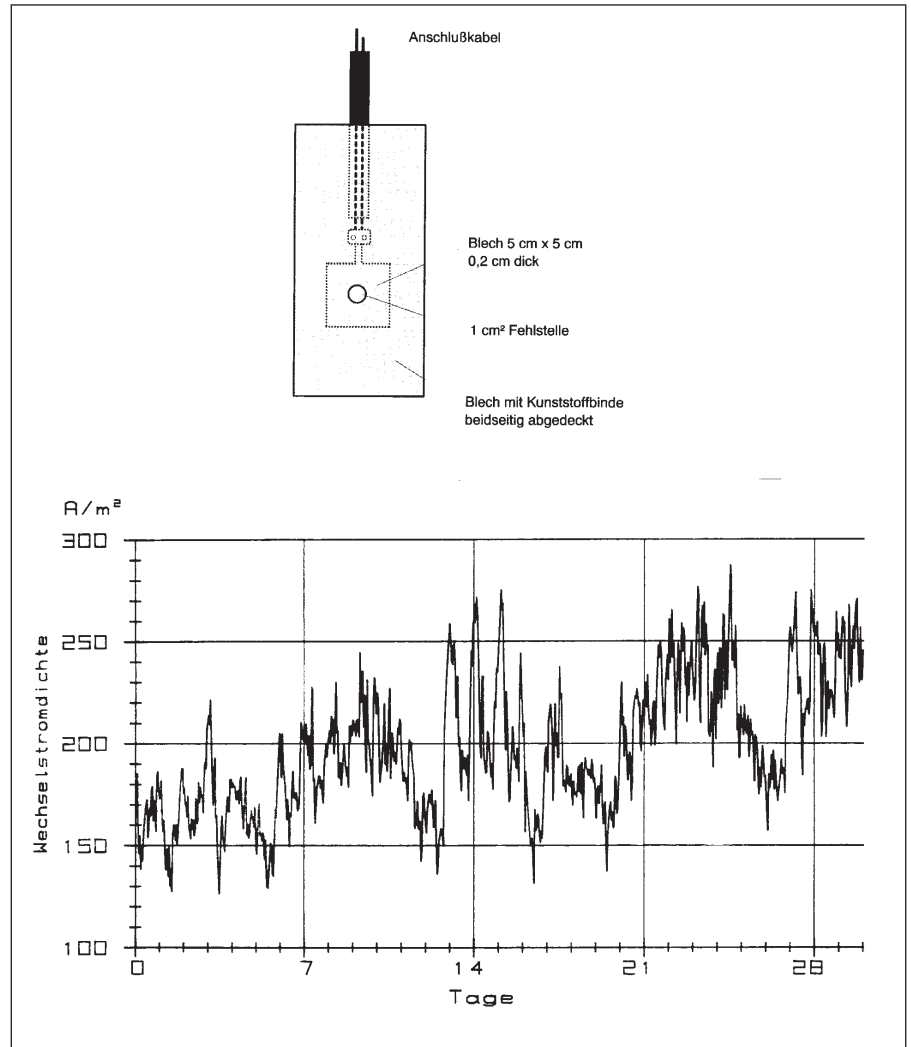
$J = 51 \text{ A/m}^2$
 (= > Korrosionsgefährdung möglich)

In dieser Gleichung bedeuten U die Wechselspannung Rohrleitung/Erde, ρ den spezifischen Bodenwiderstand in der unmittelbaren Nähe der Umhüllungsbeschädigung und d den Durchmesser der Umhüllungsbeschädigung. Wegen der meist unbekanntem Geometrie der Umhüllungsbeschädigung und dem unbekanntem spezifischen Bodenwiderstand ist diese Gleichung für die Praxis nur von eingeschränktem Wert. Sie informiert jedoch darüber, daß Stromdichten in der Größenordnung von 30 A/m^2 unter durchaus „normalen“ Bedingungen erreicht werden können.

Probebleche, die neben der Rohrleitung vergraben und mit dieser elektrisch leitend verbunden werden, simulieren Umhüllungsbeschädigungen. Sie gestatten daher mit Hilfe einer Wechselstrommessung eine Bewertung der Korrosionsgefährdung, der auch entsprechende Umhüllungsbeschädigungen der Rohrleitung unterliegen. Ihre freie Stahlfläche sollte so klein gewählt werden, daß sie ungünstigen Bedingungen entspricht. DIN 50925 nennt dazu einen Wert von 1 cm^2 , es kann aber nicht ausgeschlossen werden, daß unter ungünstigen Bedingungen an kleineren Umhüllungsbeschädigungen höhere Wechselstromdichten auftreten. Abb. 11 zeigt beispielhaft ein Probe-

blech mit einer Stahlfläche von 1 cm^2 und das Ergebnis einer Registrierung der Wechselstromdichte.

Abb. 11: Schematische Darstellung eines Probebleches für die Kontrolle einer Gefährdung durch Wechselstromkorrosion und Beispiel einer Registrierung der Wechselstromdichte über einen Zeitraum von 28 Tagen



Für die Bewertung der gemessenen Wechselstromdichte sollte eine Registrierung nach einer ausreichend langen Einbauzeit (ca. 3 Monate) durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind nur dann aussagekräftig wenn das die beeinflussende Hochspannungsanlage betreibende EVU bestätigt, daß die in dieser Zeit vorliegenden Betriebsbedingungen dem Normalbetrieb entsprechen. Die mittlere Wechselstromdichte kann dann bestimmt werden (wobei Phasen der Betriebsruhe der Hochspannungsanlage ausgeklammert werden sollen) – im oben gezeigten Fall können etwa 200 A/m^2 abgeschätzt werden – und mit dem Kriterium verglichen werden. Diese mittlere Wechselstromdichte gibt nur einen Hinweis auf eine potentielle Korrosionsgefährdung

wenn der Grenzwert überschritten wird. Die tatsächlich vorliegende Korrosionsgefährdung kann nur nach Ausgrabung des Probebleches festgestellt werden. Ergebnisse der Messungen an derartigen Probeblechen bei der Erdgas Südbayern haben auch Hinweise darauf gegeben, daß schon bei Wechselstromdichten zwischen 15 und 20 A/m^2 ein Korrosionsangriff auftritt.

Neue Normentwürfe

Folgende Normentwürfe sind erschienen und können über den Beuth-Verlag bezogen werden:

- DIN EN 1451 „Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Abwasserleitungen (niedriger und hoher Temperatur) innerhalb der Gebäudestruktur – Polypropylen (PP) –; Teil 1: Allgemeines
 Teil 2: Rohre
 Teil 3: Formstücke
 Teil 5: Gebrauchstauglichkeit des Systems“

Beurteilung der Streustrom-Korrosionsgefahr von erdverlegten Installationen im Einflußbereich von Gleichstrombahnen

Fachreferat, gehalten von Ulrich Bette, TA Wuppertal auf der Jahrestagung 1995

E 13001 F

Pressepost

Vom Bundesminister für Verkehr wurde die TAW mit dem Forschungsvorhaben FE-Nr. 70348/90: „Maßnahmen zur Verringerung der Korrosionsgefahr durch Streuströme bei Rasengleisen von Gleichstrombahnen“ beauftragt, dessen Ergebnisse im April 1994 vorgelegt wurden. Diesem Forschungsvorhaben waren Untersuchungen in U-/Stadt-bahn-Tunneln vorausgegangen, wobei nachgewiesen wurde, daß das Streustromgeschehen von mehreren Kenngrößen abhängt. Eine wesentliche Kenngröße ist der Ableitungsbelag der Fahrschienen. Weiterhin hat der Fahrbetrieb in benachbarten Rückleitungsabschnitten Auswirkungen auf die Streuströmungssituation in dem gerade betrachteten Abschnitt, was sich insbesondere bei hochwertigen Schienenbettungen stark bemerkbar macht. Daher führt die Betrachtung eines einzelnen Rückleitungsabschnittes, wie bisher üblich, zu falschen Beurteilungen.

In letzter Zeit werden oberirdische Straßenbahnstrecken verstärkt auf eigenem Bahnkörper geführt, so daß bei offener Bettung ein kleiner Ableitungsbelag und damit ein großer Bettungswiderstand ohne weiteres realisiert werden kann. Hierdurch wird aber der Einfluß durch den Fahrbetrieb in den benachbarten Abschnitten wesentlich stärker. Wird in einzelnen Streckenabschnitten der Raum zwischen den Fahrschienen begrünt (Rasengleis), so konnte nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, daß in diesen Bereichen verstärkt Streustromkorrosion auftritt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war deshalb, die verschiedenen Oberbauformen, insbesondere von Rasengleisen, hinsichtlich der möglichen Streustromkorrosionsgefahr zu untersuchen und Grundlagen für die Planung sowie die meßtechnische Prüfung von oberirdischen Strecken zu erarbeiten.

Die an verschiedenen Oberbauformen durchgeführten Messungen ergaben, daß Rasengleise in der Regel keine größeren Ableitungsbeläge aufweisen als andere Gleise, die in der Straßendecke eingebaut worden sind (geschlossene Bettung). Je nach Konstruktion der Rasengleise wurden an diesen sogar Ableitungsbeläge ermittelt, die kleiner sind als die von Gleisen im Schotterbett (offene Bettung). Im Forschungsbericht wird empfohlen, den

Korrosionsstrombelag, also den auf die Länge bezogenen Stromaustausch zwischen den Fahrschienen und dem Erdboden, zu begrenzen. Hierdurch wird die örtliche Korrosionsgefahr sowohl an den erdverlegten Metallinstallationen als auch den Fahrschienen berücksichtigt. Der Korrosionsstrombelag hängt von dem Betriebsstrom des betrachteten Rückleitungsabschnittes und dessen Länge sowie dem Ableitungsbelag und dem Widerstandsbelag der Fahrschienen ab. Bei der Planung von oberirdischen Strecken kann der Korrosionsstrombelag anhand der genannten Kenngrößen rechnerisch ermittelt werden. Ein möglicher Richtwert kann $I_{\text{korr}} \leq 5 \text{ A/km}$ sein.

Die vorgenommenen Untersuchungen ergaben, daß unter normalen Bedingungen dieser Wert ausreicht, vorzeitige Korrosionsschäden an den Fahrschienen und unzulässige Beeinflussungen an Installationen, die von den Fahrschienen mindestens 1 m entfernt sind, zu vermeiden. Weiterhin sollten nach Inbetriebnahme von oberirdischen Strecken gemäß AfK-Empfehlung Nr. 4 Kontrollmessungen durchgeführt werden. Werden hierbei Streustromübertragungsmaße von $> 0,1$ festgestellt, ist an den entsprechenden Stellen der Schienenspannungstrichter über einen längeren Zeitraum in der Hauptverkehrszeit zu messen. Wenn das Schienenpotential im zeitlichen Mittel negativ ist und die Streustromaktivität im Bereich von 100 mV liegt, muß mit einer nachteiligen Beeinflussung erdverlegter Installationen gerechnet werden.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden von der TAW neue Meßverfahren erarbeitet, die in der Regel auch während des Tages eine exakte Beurteilung der Streustromkorrosionsgefahr ermöglichen. Hierzu gehören die Ermittlung des Streustromübertragungsmaßes und der Streustromaktivität. Die Beeinflussung erdverlegter Installationen läßt sich anhand der Streustromaktivität innerhalb von 30 Minuten in der Hauptverkehrszeit ermitteln. Nur wenn die Streustromaktivität größer ist als 100 mV und auch anhand des zeitlichen Potentialverlaufes oder durch eine Korrelationsanalyse von Rohr/Boden-Potential und Spannung Fahrschienen/Rohrleitung keine eindeutige Aussage getroffen werden kann, ist eine 24h-Registrierung erforderlich. Praktische Messungen im Einflußbereich von 21 Unterwerken eines Ver-

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.

kehrsbetriebes ergaben, daß lediglich an einem Unterwerk Registrierungen über 24 Stunden erforderlich waren. In den anderen Fällen reichte eine Registrierzeit von 30 Minuten in der Hauptverkehrszeit aus, d.h., daß mit den neuen Meßverfahren nicht nur eine exaktere Beurteilung der Streustromkorrosionsgefahr möglich ist, sondern sich auch eine wesentliche Verkürzung der Meßzeit ergibt.

Die vorgenommenen Untersuchungen zeigten aber auch, daß bei den heute üblichen Schienenverlegungen in offener Bettung auf Streustromschutzmaßnahmen an erdverlegten Installationen in den meisten Fällen verzichtet werden kann. Trotzdem ist es noch üblich, Drainagen oder Soutiragen sozusagen als Vorsorgemaßnahme zu installieren. Da es sich hierbei in der Regel um eine Schutzmaßnahme handelt, die ein einzelner Betreiber für seine erdverlegten Installationen durchführt, werden nicht alle Installationen erfaßt. Dieses hat zur Folge, daß die nicht einbezogenen Installationen und auch die Fahrschienen stärker nachteilig beeinflusst werden. Aus diesem Grund sollten vor der Errichtung einer Drainage Objekt/BodenPotentialmessungen durchgeführt werden. Treten z.B. an bitumentumhüllten Objekten unzulässige Beeinflussungen auf, ist mit dem Verkehrsbetrieb zu klären, ob zusätzliche Maßnahmen an den Bahnanlagen zu einer Verbesserung führen. PE-umhüllte Objekte sollten aufgrund ihres relativ kleinen Schutzstrombedarfes kathodisch geschützt werden, wobei eine Schutzanlage mit Fremdstromanoden sinnvoller als eine Drainage oder Soutirage ist.

Hinweis: Eine ausführliche Beschreibung der Meßverfahren zur Ermittlung der Streustromaktivität und des Streustromübertragungsmaßes ist in 3R international 34 (1995) 4, S.170-