

Wechselstrombeeinflussung und Wechselstromkorrosion

Fachreferat, gehalten von Dr. Schöneich / Ruhrgas AG, Essen, auf der Jahreshauptversammlung 1994 in Hamburg – 3. Folge

Maßnahmen zur Verminderung einer Wechselstrom-Korrosionsgefährdung

Entsprechend dem zur Zeit gültigen Kriterium zur Bewertung der Wechselstromkorrosions-Gefährdung, kann ein Korrosionsschutz durch die Verminderung der Wechselstromdichte erreicht werden. Die zu diesem Ziel führenden Maßnahmen können aus der Formel zur Beschreibung der Wechselstromdichte J in einer kreisförmigen Fehlstelle (Durchmesser d) abgeleitet werden (vgl. auch Abb. 10, 2. Folge).

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

(U : Wechselspannung Rohrleitung/Erde
 ρ : spezifischer Bodenwiderstand im Nahbereich der Umhüllungsbeschädigung)

Es bietet sich zum Beispiel eine Erhöhung des spezifischen Bodenwiderstandes an, was z.B. einer Sandbettung der Rohrleitung entsprechen würde. Dieses sehr aufwendige Verfahren ist vor allem bei schon verlegten Rohrleitungen nur für sehr kurze Abschnitte einsetzbar. Da nicht bekannt ist, wie sich im Laufe der Jahre der spezifische Bodenwiderstand durch den Eintrag von Bestandteilen des umgebenden Erdreiches verändern wird, muß die langfristige Wirksamkeit dieser Methode in Frage gestellt werden.

Formal führt auch die Vergrößerung des Durchmessers d der Umhüllungsbeschädigung (und damit ihrer Fläche) zu einer Verminderung der Wechselstromdichte, was aber technisch nicht sinnvoll ist und damit als praktische Maßnahme ausscheidet.

So bleibt die Verminderung der Wechselspannung Rohrleitung/Erde als Lösung. Entsprechende Verfahren, ihre Theorie und ihre Anwendung sind seit vielen Jahren aus der Praxis des Berührungsschutzes hochspannungs-

beeinflusster Rohrleitungen bekannt.

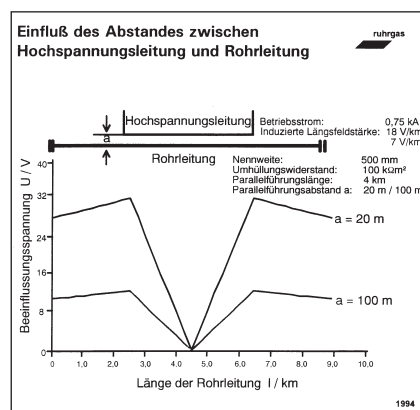


Abb. 12: Einfluß der Vergrößerung des Abstandes zwischen Rohrleitung und äußerstem Leiterseil einer Hochspannungsleitung auf die induzierte Wechselspannung

Im formal einfachsten Fall gelingt dies durch größere Abstände zwischen Rohrleitungen und Hochspannungsleitungen. Diese Maßnahme muß schon während der Planungsphase Berücksichtigung finden und steht zur Zeit im Widerspruch zu der üblichen Praxis, nach der von den Behörden die gemeinsame Verlegung von Hochspannungsleitungen und Rohrleitungen in engen Energietrassen gefordert wird. Vom Grundsatz her können auch Maßnahmen an den beeinflussenden Hochspannungsanlagen durchgeführt werden (z.B. die Veränderung des Standortes eines Verdrillungsmastes), die eine Verminderung der induzierten Längsfeldstärke und damit der Wechselspannung bewirken.

Erdung

Eine scheinbare Reduzierung des Umhüllungswiderstandes einer Rohrleitung durch Erdung ist ein wirksames Mittel zur Reduzierung der in die Rohrleitung induzierten Wechselspannung. Die Erdung ist für die Belange des Berührungsschutzes unverzichtbar. Ihre

Wirkungsweise soll mit dem in Abb. 13 dargestellten Ersatzschaltbild veranschaulicht werden.

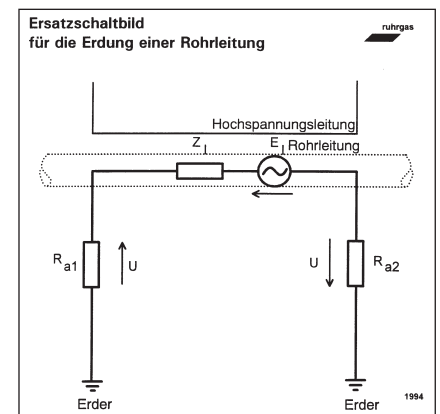


Abb. 13: Ersatzschaltbild (vereinfacht) einer geerdeten hochspannungsbeeinflussten Rohrleitung

Z_L ist die Längsimpedanz der Rohrleitung, E_L die induzierte Längsfeldstärke. In diesem Bild wurde der endliche Umhüllungswiderstand und die in der Regel über die Näherung hinausgehenden Abschnitte der Rohrleitung vernachlässigt, was aber für die folgenden prinzipiellen Überlegungen zulässig ist. An den Näherungsenden ist die Leitung mit den Erden $R_{a1}=R_{a2}=R_a$ geerdet. Diese Punkte entsprechen den Spannungsmaxima in Abb. 2 (vgl. 1. Folge). In der Praxis unterscheidet man die konzentrierte Erdung einer Rohrleitung an den Enden der Näherung mit einer Hochspannungsleitung von der kontinuierlichen Erdung, bei der die Erder in gleichmäßigen Abständen entlang der beeinflussten Rohrleitung angeordnet werden. Die Wahl des jeweils geeigneten Verfahrens richtet sich z.B. nach den Ausbreitungswiderständen der Erder, die zum Erzielen einer bestimmten Verminderung der Wechselspannung erforderlich ist. Die Maßnahmen werden in der Praxis mit

Hilfe rechnergestützter Simulationsprogramme bestimmt. Für die folgenden Abschätzungen wird die konzentrierte Erdung einer hochspannungsbeeinflussten Rohrleitung (vgl. Abb. 13) betrachtet.

Nach Abb. 13 ergibt sich

$$\frac{U}{R_a} = \frac{E_L}{2R_a + Z_L}$$

Für die Spannung U der Rohrleitung gegen Bezugs Erde gilt damit:

$$U = \frac{E_L}{2 + Z_L/R_a} \quad (2)$$

Für $R_a \gg Z_L$ (dies ist i. a. der Fall bei einer nicht geerdeten Rohrleitung) ist damit $U = E_L/2$. Eine wirksame Erdung wird z.B. mit $R_a = Z_L/2$ erzielt. Damit erreicht man im allgemeinen eine Reduzierung der induzierten Spannungen auf zulässige Berührungsspannungen. Da für die in Frage kommenden technischen Frequenzen 50 Hz und 16 2/3 Hz die Impedanz einer Stahlrohrleitung nur wenige zehntel Ω km beträgt, fordert eine Verminderung der Beeinflussungsspannung auf nur wenige % von E_L , wie sie zur ausreichenden Verminderung der Wechselstromdichte in einigen Fällen notwendig ist, einen sehr niedrigen Erdungswiderstand, der in der Praxis nur mit erheblichen Aufwendungen zu realisieren ist.

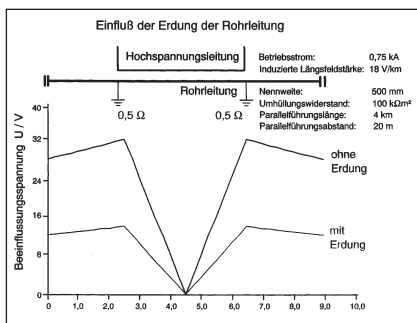


Abb. 14: Einfluß der konzentrierten Erdung einer Rohrleitung mit zwei Erden (Ausbreitungswiderstand jeweils $0,5 \Omega$) auf die Wechselspannung Rohrleitung/Erde

Abb. 14 zeigt den Einfluß einer konzentrierten Erdung auf die Wechselspannung Rohrleitung/ Erde. Rohrleitung und Hochspannungsleitung besitzen die gleichen elektrischen Parameter wie in Abb. 2 (vgl. 1. Folge). Mit zwei Erden, die einen Ausbreitungswiderstand von jeweils $0,5 \Omega$ besitzen, gelingt eine Reduzierung der Wechselspannung Rohrleitung/Erde um ca. 50%. In vielen Fällen hat sich aber gezeigt, daß die Verminderung der Wechselspannung auf einige wenige Volt, wie es zur Unterschreitung des

zuvor gezeigten Wechselstromdichtekriteriums erforderlich ist, mit Hilfe der Erdung bei realistischem Aufwand nicht möglich ist.

Wechselspannungskompensation durch galvanische Ankopplung

Eine weitgehende Reduzierung der induzierten Wechselspannung bei vertretbarem Aufwand für die Installation von Erden kann durch die Einkopplung von Wechselspannungen E_1 und E_2 in die Verbindungsleitungen zu den Erden R_{a1} und R_{a2} nach Abb 15 erfolgen /1/ (vgl. Abb. 15).

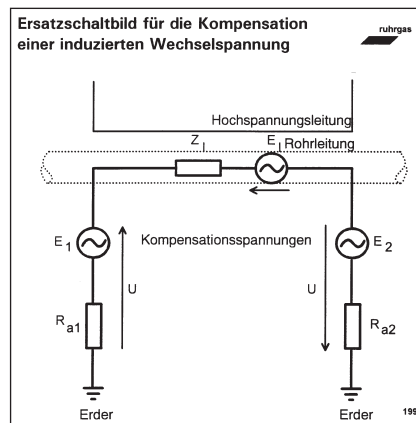


Abb. 15: Ersatzschaltbild (vereinfacht) einer hochspannungsbeeinflussten Rohrleitung mit Anlagen zur Wechselspannungskompensation

Unter den vereinfachenden Bedingungen $R_{a1} = R_{a2} = R_a$ und $E_1 = E_2 = E$ ergibt sich für die Spannung $U = U_1 = U_2$:

$$U = \frac{E_L + E \cdot Z_L/R_a}{2 + Z_L/R_a}$$

Für die Bedingung $U = 0$ (das entspricht einer vollständigen Kompensation der induzierten Wechselspannung) muß demnach gelten:

$$E = -E_L \cdot R_a/Z_L$$

Bei dieser Wahl der Spannungen E_1 und E_2 ist eine vollständige Kompensation der Beeinflussungsspannung möglich. In diesem Fall gilt für den Strom I , der von den Spannungsquellen E_1 und E_2 geliefert werden muß:

$$I = \frac{E_L}{Z_L}$$

Für den praktischen Einsatz des Verfahrens ist der Leistungsbedarf der Spannungsquellen E_1 und E_2 wichtig. Entsprechend den oben genannten vereinfachenden Bedingungen gilt:

$$P = E I = -E_L \frac{R_a}{Z_L} \frac{E_L}{Z_L} = E_L^2 \frac{R_a}{Z_L^2} \quad (7)$$

Dies bedeutet z.B., daß die erforderliche Leistung proportional zum

Quadrat der induzierten Spannung und des Kehrwertes der Längsimpedanz zunimmt. Die folgenden Abschätzungen sollen die Größenordnung der für die Kompensation erforderlichen Leistung verdeutlichen:

Beispiel 1

4 km Parallelführung einer Rohrleitung DN 800 mit einer Hochspannungs-Drehstromfreileitung. Die induzierte Längsfeldstärke betrage $E_L = 15 \text{ V/km}$, womit sich eine Gesamtspannung von $E_L = 60 \text{ V}$ über dem beeinflussten Rohrleitungsabschnitt ergibt. Die auf die Länge bezogene Impedanz der Rohrleitung sei $Z_L = 0,5 \Omega/\text{km}$, d.h. die Impedanz des beeinflussten Abschnittes beträgt $Z_L = 2 \Omega$. (Die Werte für die induzierte Längsfeldstärke und die Längsimpedanz können der AfK-Empfehlung Nr. 3 entnommen werden). Die Ausbreitungswiderstände der Erdungsanlagen sollen jeweils 2Ω betragen. für den Leistungsbedarf P einer Kompensationsanlage gilt damit $P = 1800 \text{ W}$.

Beispiel 2

20 km Parallelführung einer Rohrleitung DN 300 mit einer Drehstromhochspannungsfreileitung $E_L = 15 \text{ V/km}$ und $Z_L = 0,73 \Omega/\text{km}$ seien die induzierte Längsfeldstärke und die auf die Länge bezogene Impedanz der Rohrleitung. Die Längsspannung und die Längsimpedanz für den Parallelführungsabschnitt betragen demnach $E_L = 300 \text{ V}$ und $Z_L = 14,6 \Omega$. Bei einem Ausbreitungswiderstand der Erdungsanlagen von jeweils $R_a = 2 \Omega$ ist dann die Leistung von ca. 850 W pro Kompensationsanlage erforderlich.

In solchen Idealfällen ist eine vollständige Kompensation der induzierten Wechselspannung entlang der gesamten Leitung, also auch über den beeinflussten Abschnitt hinaus, möglich. Da die Beeinflussungssituationen in der Praxis nicht dem oben angenommenen Idealfall entsprechen, ist damit zu rechnen, daß häufig eine vollständige Kompensation nicht erreichbar sein wird. Jedoch wird der Leistungsbedarf einer Kompensationsanlage in der oben angegebenen Größenordnung liegen. Insbesondere bei kurzen, aber hoch beeinflussten Rohrleitungsabschnitten wird der Leistungsbedarf - bei realistischen Ausbreitungswiderständen der Erdungsanlagen - unverhältnismäßig hoch.

Dieses Verfahren befindet sich noch in der Versuchsphase.

Mit einem „Trick“ wird die Schwierigkeit des hohen Leistungsbedarfs

überwunden, wenn entsprechend Abb. 16 die Kompensationsanlagen über Dioden mit der Rohrleitung verbunden werden /1/.

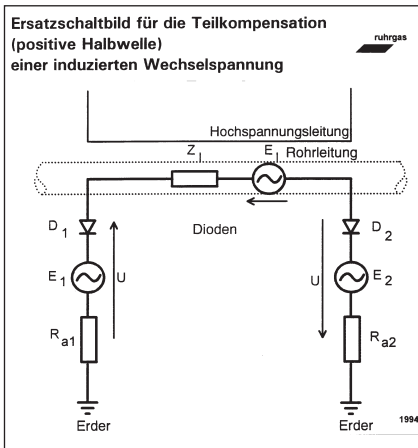


Abb. 16: Ersatzschaltbild (vereinfacht) einer hochspannungsbeeinflussten Rohrleitung mit Kompensationsanlagen und Dioden zur Kompensation der positiven Halbwellen der induzierten Wechselspannung.

Es werden dann nur noch die positiven Halbwellen der Wechselspannung U kompensiert und der zeitliche Verlauf der Spannung Rohrleitung/ Erde, wie er mit einem Oszillographen gemessen werden kann enthält keine positiven Anteile. Die Wechselstromdichte in einer Umhüllungsbeschädigung wird damit wohl verringert aber nicht zwingend kleiner als es nach dem Stromdichtekriterium erforderlich ist. Die Wirksamkeit dieses Verfahrens beruht auf der plausiblen Annahme, daß durch das Fehlen aller anodischen Anteile in dem Strom, der in einer Umhüllungsbeschädigung fließt, ein Korrosionsangriff sicher ausgeschlossen wird. Im Prinzip entsprechen diese Überlegungen den Gedanken zu Abb. 9 (vgl. 2. Folge), wo vermutet wurde, daß ein Korrosionsangriff dann vermieden wird, wenn das Potential zu keinem Zeitpunkt das Schutzpotential überschreitet.

Da der Stromkreis in Abb. 16 für jede Stromrichtung durch jeweils eine Diode unterbrochen wird, ist für diesen Idealfall die Kompensationsleistung gleich Null. In der Praxis wird durch den endlichen Umhüllungswiderstand der Rohrleitung ein Leistungsbedarf erforderlich sein, der etwas über der für den kathodischen Korrosionsschutz dieser Leitung erforderlichen Leistung liegen wird.

Der Nachteil dieses Verfahrens ist, daß durch die ausschließliche Kompensation der positiven Halbwellen die Amplitude der negativen Halbwellen der induzierten Wechselspannung noch

erhöht wird. Das Einschaltpotential einer solchen Rohrleitung, gemessen gegen eine Bezugselektrode, liegt dann in der Größenordnung des Betrages der induzierten Wechselspannung, wodurch an kleinen Fehlstellen mit hohen Schutzstromdichten gerechnet werden muß, die entsprechend hohe Potentialgradienten in dem umgebenden Erdreich hervorrufen können. Dadurch kann eine unzulässige Beeinflussung fremder Anlagen verursacht werden. Darüber hinaus schwankt das Einschaltpotential der Rohrleitung mit den Betriebsströmen der Hochspannungsanlage.

Dieses Verfahren wird bei der Erdgas Südbayern betriebsmäßig zum Korrosionsschutz von Rohrleitungen eingesetzt, die durch 16 2/3 Hz Fahrleitungen der Deutschen Bahn AG beeinflusst werden.

Einbau von Isolierkupplungen zur Unterbrechung der Längsleitfähigkeit

Prinzipiell kann mit Isolierkupplungen, die die Längsleitfähigkeit in einem beeinflussten Rohrleitungsabschnitt unterbrechen, eine Verminderung der induzierten Wechselspannung erzielt werden, weil die induzierte Längsspannung der Rohrleitung proportional der Länge der Parallelführung mit der Hochspannungsfreileitung ist. Wenn diese Vorgehensweise bei einer Beeinflussungssituation in Betracht gezogen wird, sollten die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

- Die Wechselspannung Rohrleitung/Erde besitzt auf beiden Seiten des Isolierstückes eine um 180° verschobene Phasenlage. Über dem Isolierstück tritt eine Wechselspannung auf, die der Summe der Einzelspannungen auf beiden Seiten entspricht.

- Wird ein Isolierstück innerhalb des beeinflussten Abschnittes einer Rohrleitung angeordnet, so können an dem Isolierstück durch die Erderwirkung des über das Näherungsende mit der Hochspannungsleitung hinausgehenden Teils der Rohrleitung Wechselspannungen auftreten, die in der Größenordnung der Spannungen liegen, die vorher an den Näherungsenden auftraten.

Der Einbau von Isolierstückchen zur Reduzierung der induzierten Wechselspannung ist nur in besonders gelagerten Fällen sinnvoll, erfordert immer eine detaillierte Bewertung aller einflußnehmenden Parameter und muß oft mit Erdungsmaßnahmen begleitet werden. Steht der Einbau von Isolierstückchen zur Diskussion, so muß zunächst festgelegt

werden, welche Beeinflussungsspannung noch toleriert werden kann. Mit Hilfe von EDV-Programmen können dann die Örtlichkeiten für den Einbau der Isolierstücke und der Erder festgelegt werden. Ggf. muß für die so entstehenden isolierten Rohrleitungsabschnitte ein neues Korrosionsschutzkonzept erarbeitet werden.

Dieses Verfahren kann dann sinnvoll einsetzbar sein, wenn ein kürzerer Rohrleitungsabschnitt, für den eine Wechselstromkorrosionsgefährdung besteht, von der übrigen beeinflussten Leitung isoliert werden soll. Um eine Verschleppung von induzierten Wechselspannungen auf Abzweigleitungen zu vermeiden, ist der Einbau von Isolierstückchen am Anfang der Abzweigleitung immer sinnvoll.

Beseitigung von Umhüllungsfehlstellen

PE-umhüllte Rohrleitungen mit Kunststoffumhüllungen der Schweißnähte weisen bei sorgfältiger Verlegung eine Fehlstellenhäufigkeit in der Größenordnung von 1/km auf. Mit Hilfe der bekannten Ortungsverfahren können diese Fehlstellen lokalisiert und ausgebessert werden. Für einen sicheren Schutz gegen Wechselstromkorrosion muß während der Betriebsdauer der Rohrleitung diese Fehlstellenfreiheit gewährleistet und nachgewiesen werden. Es ist zu bezweifeln, daß dies auf Jahrzehnte möglich ist. Zusätzliche Korrosionsschutzmaßnahmen sind daher unverzichtbar.

Schutzmaßnahmen bei alten Rohrleitungen

Bitumentumhüllte Rohrleitungen sind ebenso wechselstromkorrosionsgefährdet wie PE-umhüllte, wobei bei letzteren eine höhere Korrosionswahrscheinlichkeit besteht, da die Umhüllungsbeschädigungen oft eine Größe von einigen wenigen cm² besitzen, wodurch hohe Wechselstromdichten entstehen können.

Als erstes sollte die induzierte Wechselspannung der Rohrleitung durch Berechnung oder Messung festgestellt werden, da dies zeigt, in welchen Rohrleitungsbereichen maximale Wechselspannungen und in Verbindung mit dem spezifischen Bodenwiderstand maximale Wechselstromdichten auftreten können. Es ist dann empfehlenswert, den Grad der möglichen Vorschädigung festzustellen. Für die Lokalisierung der entsprechenden Umhüllungsbeschädigungen eignet sich die Messung der Potentialgradienten entlang der Rohrleitung. Im Gegensatz zu Mes-

sungen für den kathodischen Korrosionsschutz, bei dem große Umhüllungsfehlstellen kritisch sind, sind durch diese Messungen Fehlstellen in der Größenordnung von einigen cm² zu lokalisieren. Hierzu ist es häufig erforderlich, den Schutzstrom zu erhöhen, damit auch bei kleinen Fehlstellen die Potentialgradienten noch gut meßbar sind. Kleine Fehlstellen mit hohen Wechselfspannungen, die in einem Boden mit niedrigem spezifischen Widerstand liegen, sind zur Kontrolle freizulegen.

Werden bei diesen Untersuchungen Korrosionsschäden gefunden taucht häufig die Frage auf ob deren Ursache auch tatsächlich der Wechselstromkorrosion zugeschrieben werden kann. Die folgenden Befunde können als Hinweise auf diese Korrosionsursache verstanden werden:

- Vorliegen einer Wechselfspannung > 5V
- das Potential der Fehlstelle erfüllt das Schutzpotentialkriterium
- der pH-Wert der Korrosionsprodukte oder der Feuchtigkeit, die die korrodierte Fläche noch bedeckt ist > 10
- die Fläche der korrodierten Stahloberfläche ist nicht wesentlich größer als 10 cm²
- der kathodische Korrosionsschutz der Rohrleitung war in der Vergangenheit immer ausreichend wirksam.

Ist die betreffende Rohrleitung molchbar, so können vorhandene Korrosionsschäden auch mit intelligenten Molchen, die z.B. nach dem Magnetfluß- oder Ultraschallprinzip arbeiten, lokalisiert werden.

In Abhängigkeit vom Ergebnis dieser Untersuchungen, können die Schutzmaßnahmen gegen Wechselstromkorrosion entsprechend den obigen Ausführungen geplant und durchgeführt werden.

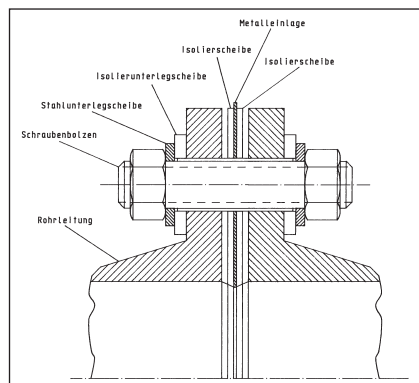
Literatur
/1/ G. Peez,
Patentschrift Nr. DE 4126303

Zum Schmunzeln

*Defintion Lichtjahr:
Stromrechnung für zwölf Monate*

Isolierflansche, die im eingebauten Zustand auf Hochspannungsfestigkeit geprüft werden können.

Eine Hochspannungsprüfung von Isolierflanschen im eingebauten Zustand ist nicht möglich, weil die beiderseits angeschlossenen Installationsteile (Erdung bzw. Rohrleitung) den Flanschwiderstand so erniedrigen, daß keine Hochspannung von 2,5 bzw. 5 kV aufgebracht werden kann. Nach Montagearbeiten an diesen Flanschen ist daher die werkseitige Prüfung hinfällig und die Spannungsfestigkeit nach der Wiedermontage hängt im Wesentlichen von der Sorgfalt des Monteurs ab. Die beigefügte Skizze zeigt einen Isolierflansch, der auch im eingebauten Zustand geprüft werden kann. (Patent-Offenlegung DE 40 33 086 A1 vom 23.4.1992). Die entscheidende Neuerung ist die zwischen zwei Isolierscheiben vorhandene Metalleinlage, die als isolierter Leiter wirkt. Von beiden Flanschseiten kann nun die Hochspannung gegen die Metalleinlage angelegt und so die Spannungsfestigkeit auch im eingebauten Zustand geprüft werden.



Korrosionsfeste Stahlarmierungen

Amerikanisches Verfahren vermeidet Carbid-Bildung

Stahlarmierte Bauwerke aus den fünfziger, sechziger und siebziger Jahren wurden mit Stählen errichtet deren Korrosionsfraß programmiert war. Sie enthielten neben ferritischen Eisenpartikeln ausreichend große Mengen an Carbiden. Schon geringe Mengen von Feuchtigkeit, die bis an die Armierungen vordringen, führen dann zur Bildung elektrolytisch wirkender Salze, so daß Ferrite und Carbide wie Batterien wirken und einen oxydierenden Strom erzeugen. Als Folge davon korrodieren

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.

dann die Armierungen, und die Festigkeit der Brücken oder Hochhäuser nimmt schnell ab.

Diese Schwierigkeiten können künftig vermieden werden, wenn andere Stahllegierungen benutzt werden, deren Herstellungsverfahren an der Universität von Kalifornien (Department of Materials Science and Mineral Engineering, Berkely, California 94720) jetzt für die amerikanische Stahlindustrie ausgearbeitet wurden. Beim Walzen des Stahls hält man die Temperaturen völlig gleichmäßig, um ihn anschließend blitzschnell mit Wasser abzuschrecken. Dadurch wird die Carbid-Bildung vermieden. Gleichzeitig kommt es zu einer Ausbildung eines sehr viel größeren Anteils martensitischer Eisenkristalle als bisher, die zudem noch die Festigkeitswerte dieses Stahls anheben können.

Martensitische und ferritische Eisenpartikel können auch beim Vorliegen elektrolytischer Salzlösungen, deren Eindringen kaum völlig auszuschließen sein wird, aber nicht ein elektrisches Potential wie in einer Batterie aufbauen. Die oxydative Wirkung von Feuchtigkeit kann bei diesem Baustahl nicht mehr auftreten.

Die Entwickler hoffen nun, daß die amerikanische Stahlindustrie das einsatzreife Produktionsverfahren übernimmt, um von europäischen oder koreanischen Baustahlimporten unabhängig zu werden. Diese Importstähle verfügen über eine vergleichbare, carbidfreie Zusammensetzung, für deren Produktion große Kapazitäten in den Herstellungsländern aufgebaut worden sind.

Aus Blick durch die Wirtschaft
10. Mai 1995