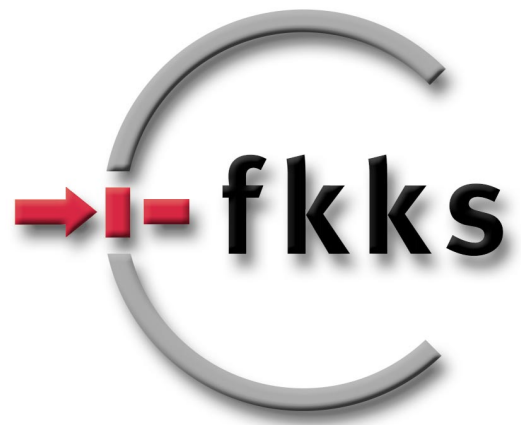


# Die Mitteilungen

Juni 2004

Nr. 52

Impressum: Die Mitteilungen des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e.V. werden vom Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz e.V., Sitz Esslingen a. N., Postfach 6004, 73717 Esslingen, Telefon (07 11) 91 99 27 20, Telefax (07 11) 91 99 27 77 herausgegeben und erscheinen vierteljährlich. Der Bezugspreis ist durch den Mitgliedsbeitrag abgegolten. Für den Inhalt verantwortlich: Hans J. Spieth, Postfach 6050, 73717 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.



## Betrachtungen zur Resonanz von erdverlegten Rohrleitungen mit technischen Frequenzen

Fachreferat von Dipl. Ing. Wolfgang Vesper, Labor für Korrosionsschutz und Elektrotechnik der Technischen Akademie Wuppertal, gehalten auf der Jahreshauptversammlung 2004 des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e. V. am 22. und 23. April 2004 in Mainz

### 0. Einleitung

Rohrleitungen, deren Trasse im Einflussbereich von Hochspannungs-Drehstromanlagen oder Wechselstrom-Bahnanlagen verlaufen, können einer Wechselstrombeeinflussung unterliegen.

In der AfK-Empfehlung Nr. 3 „Maßnahmen beim Bau und Betrieb von Rohrleitungen im Einflussbereich von Hochspannungs-Drehstromanlagen und Wechselstrom-Bahnanlagen“ der Arbeitsgemeinschaft DVGW/VDE für Korrosionsfragen (AfK) werden die mit der Einkopplung zusammenhängenden Fragestellungen ausführlich behandelt.

Maximale Wechselspannungen Rohrleitung-Erde werden normalerweise an den Enden der Beeinflussungsstrecke erwartet. Untersuchungen in der Praxis aus der letzten Zeit haben jedoch Beeinflussungsfälle gezeigt, bei denen ein drittes Spannungsmaximum weit außerhalb der Beeinflussungsstrecke lag oder aber die Wechselspannung am Ende einer Rohrleitungsstrecke ohne jegliche Einkoppelung innerhalb des Trassenverlaufes höher war als am Anfang bei der Einbindung in das übrige wechselspannungsbeeinflusste Rohrsystem.

In einem weiteren Fall trat in der Mitte der Beeinflussungsstrecke trotz Erdung an den Enden (die Wechselspannung Rohrleitung – Erde betrug hier nur 2,1 V) ein Maximum auf mit einer Spannung von ca. 100 V.

Die Ursache für diese Erscheinungen soll im folgenden beschrieben werden.

### 1. Die Rohrleitung als elektrisch schwingungsfähiges Gebilde.

Im elektrischen Sinne kann man sich eine Rohrleitung aufgebaut denken aus verteilten Längsinduktivitäten  $L = L' \cdot l$  (mit  $l =$  Länge des betrachteten Rohrleitungsabschnittes), Längswiderständen  $R_{\sim} = R'_{\sim} \cdot l$ , Kapazitäten Rohrleitung – Erde  $C = C' \cdot l$  und der Ableitung  $G = G' \cdot l$ , die hervorgerufen wird durch nicht fehlerfreie Umhüllung des Rohres und bei gegebener Differenz zwischen Ein- und Ausschaltpotential ein Maß für die Schutzstromdichte  $j_s$  und den Umhüllungswiderstand  $r_u$  ist (übrige Symbole s. AfK 3, Kapitel 8). Bild 1 zeigt die Zusammenschaltung.

Bei der Zusammenschaltung von Spule und Kondensator erhält man ein elektrisch schwingungsfähiges Gebilde. Sind Spule und Kondensator parallel geschaltet, wird ein „Parallelschwingkreis“ gebildet, liegen die beiden Schwingkreiselemente hintereinander, handelt es sich um einen „Serienresonanzkreis“.

Resonanz bedeutet, dass die Blindwiderstände von Spule und Kondensator des Resonanzkreises entgegengesetzt gleich groß sind. Für den Widerstand des Serienresonanzkreises, bei dem Spule und Kondensator in Serie geschaltet sind, bedeutet dies, dass er zu  $0 \Omega$  wird. Damit wird aber der Wechselstrom durch den Kreis bei gegebener Spannung nur noch durch den Serienwiderstand  $R_s$  bestimmt (Innenwiderstand der Spannungsquelle vernachlässigt).

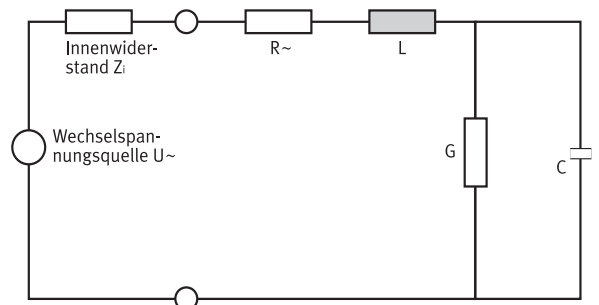


Bild 1: Rohrleitung als schwingungsfähiges Gebilde

Die an Spule und Kondensator auftretenden Einzelspannungen errechnen sich dann als Produkt aus Strom (der allein durch  $R_s$  bestimmt wird) und Scheinwiderstand des Bauelementes.

Als Ursache für die vorgefundenen Spannungsüberhöhungen hat sich herausgestellt, dass eine Anregung der Rohrleitung zur Serienresonanz durch die eingekoppelte Wechselspannung vorliegt.

Die anregende Frequenz in allen untersuchten Fällen betrug 50 Hz.

### 2. Resonanzlängen von Rohrleitungen

Bei Resonanz eines Schwingkreises mit der anregenden Frequenz werden induktiver und kapazitiver Widerstand der beiden Schwingkreiselemente Spule und Kondensator im Absolutwert gleich. Daraus lässt sich die „Thomson'sche Schwingungsgleichung“ ableiten:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (L \cdot C)^{1/2}}$$

### Inhalt

#### Seite 1

#### Betrachtungen zur Resonanz von erdverlegten Rohrleitungen mit technischen Frequenzen

Fachreferat von Dipl.-Ing. Wolfgang Vesper, Labor für Korrosionsschutz und Elektrotechnik der TA Wuppertal

#### Seite 4

Aus dem Verband: Dipl.-Ing. Wolfgang Vesper für die Kuhn-Ehrenmedaille vorgeschlagen

#### Seite 4

Aktuelle Schulungsangebote

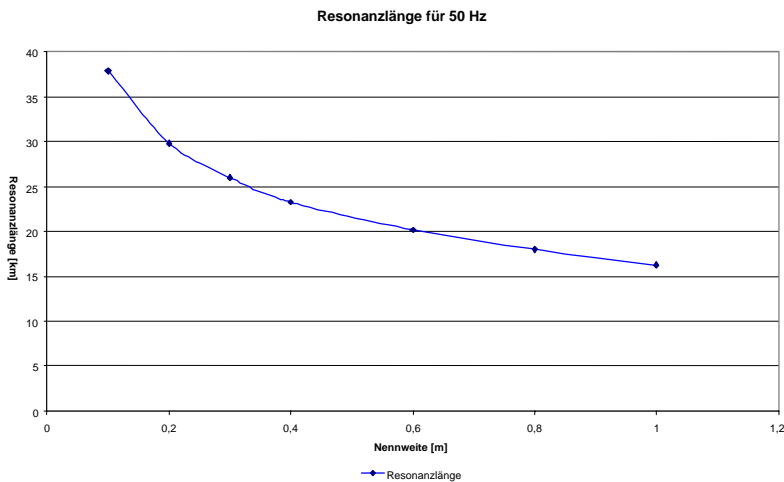


Bild 2: Resonanzlängen von Rohrleitungen für 50 Hz

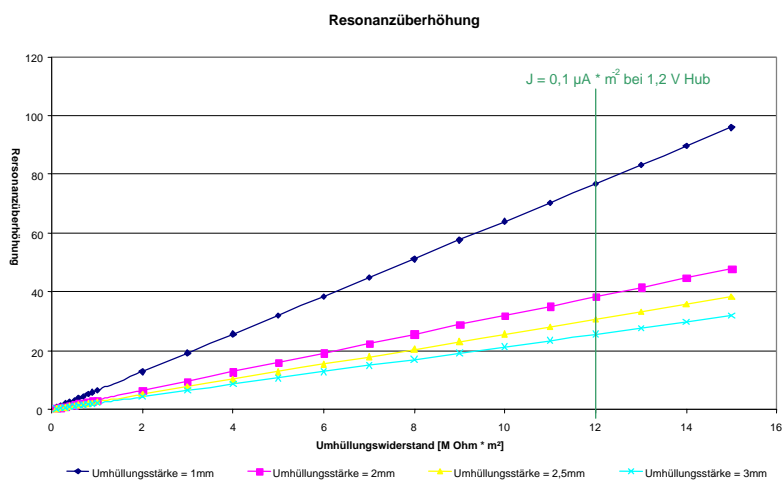


Bild 3: Resonanzüberhöhung in Abhängigkeit vom Umhüllungswiderstand

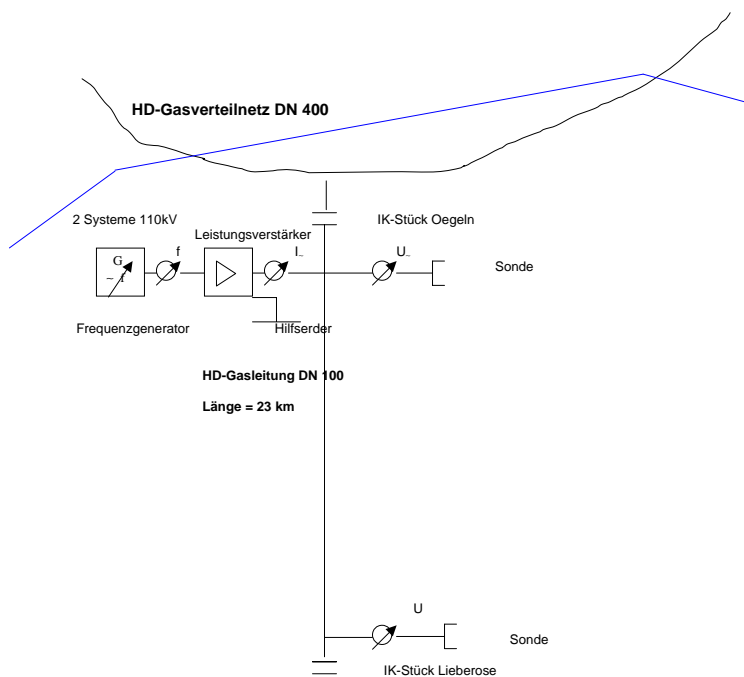


Bild 4: Versuchsanordnung zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens

Werden unter der Wurzel für L und C die bezogenen Größen eingesetzt, so lässt sich der Wert für die Resonanzlänge ausrechnen zu

$$L_{Res} = \frac{1}{2 * \pi * f * (L' * C')^{1/2}}$$

Für die Ausführung einer Resonanzlängenberechnung werden die Werte für den Scheinwiderstand der bezogenen Längsinduktivität  $\omega * L'$  bei 50 Hz dem Bild 8-17 der AfK 3 entnommen. Die Werte für  $\omega * C'$  werden berechnet nach der Gleichung (8-18) / AfK 3.

Bild 2 zeigt die Auswertung der Gleichung für die Frequenz 50 Hz und Nennweiten von DN 100 bis DN 1000.

Parameter:

$$\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF / m};$$

$$\epsilon_r = 2,3;$$

$$\text{Stärke der Umhüllung } \delta = 2,5 \text{ mm};$$

$$\text{Frequenz} = 50 \text{ Hz}$$

### 3. Spannungsüberhöhung bei Resonanz

Der Umhüllungswiderstand wird verstanden als  $r_u = (|U_{ein}| - |U_{aus}|) / j_s$  mit  $U_{ein}$  = Einschaltpotential und  $U_{aus}$  = Ausschaltpotential,  $j_s$  = Schutzstromdichte.

Der Wert für den Widerstand parallel zur Kapazität Rohr - Erde errechnet sich dann zu

$$R_p = 1 / G = r_u / A$$

mit A = Oberfläche der Rohrleitung innerhalb der Resonanzlänge.

Dieser Parallelwiderstand  $R_p$  wird zunächst umgerechnet in einen Serienwiderstand  $R_s$ :

$$R_s = 1 / (\omega * C) * G / (\omega * C) = G / (\omega * C)^2 = A / [r_u * (\omega * C)^2]$$

oder

$$R_s = \pi * D * |I_{Resonanz}| / [r_u * \pi * (2 * f * C')^2 * |I_{Resonanz}|^2]$$

oder

$$R_s = D / [r_u * \pi * |I_{Resonanz}| * (2 * f * C')^2]$$

Mit  $r_u = \Delta U / j_s$  und  $\Delta U = |U_{ein}| - |U_{aus}|$  kann man schreiben:

$$R_s = D * j_s / [\Delta U * \pi * |I_{Resonanz}| * (2 * f * C')^2]$$

mit D = Nennweite und f = Frequenz, hier 50 Hz.

Mit den Spannungen |U| als Amplitude der anregenden Wechselspannung und |U<sub>c</sub>| als Wechselspannung Rohrleitung-Erde am Resonanzort lässt sich die Resonanzüberhöhung ausrechnen zu

$$\ddot{U}_{Res} = |U_c| / |U| = 2 * r_u * f * \pi * \epsilon_0 * \epsilon_r / \delta$$

Bild 3 zeigt die Auswertung der Gleichung für unterschiedliche Stärken  $\delta$  der Umhüllung.

Danach muss mit Resonanzüberhöhung  $\ddot{U}_{Res} > 1$  gerechnet werden für Werte des Umhüllungswiderstandes von  $r_u > 0,5 \text{ M}\Omega * \text{m}^2$ .

#### 4. Anwendung der Theorie auf die Praxis

##### 4.1 In der Praxis vorgefundene Resonanzüberhöhung

Untersucht wurde eine HD-Gasleitung DN 100 mit einer Länge von 23 km; die Schutzstromdichte beträgt  $0,97 \mu\text{A} / \text{m}^2$ ; der „Hub“  $\Delta U$  zwischen Ein- und Ausschaltpotential beträgt  $0,5 \text{ V}$  ( $U_{\text{ein}} = -1,4 \text{ V}$ ;  $U_{\text{aus}} = -0,9 \text{ V}$ ) entsprechend einem Wert für den Umhüllungswiderstand von  $r_u = 0,52 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}^{-2}$ .

Am Ort der Einbindung des Leitungsabschnittes in das übrige wechsellspannungsbeeinflusste HD-Gasverteilnetz (Ortsbezeichnung „Oegeln“) steht eine Wechsellspannung mit der Frequenz  $50 \text{ Hz}$  von  $8,95 \text{ V}$  an, die durch Einkopplung aufgrund der Parallelführung des Gasverteilnetzes zu 2 Hochspannungs-Freileitungssystemen erzeugt wird. Auf der Strecke zwischen dem Ort der Einbindung und dem Endpunkt findet keine weitere Wechsellspannungseinkopplung statt. Bild 4 zeigt schematisch die örtlichen Verhältnisse.

Bei einem Wert der Wechsellspannung am Ort der Einbindung von  $8,95 \text{ V}$  betrug die Wechsellspannung am Endpunkt  $11,39 \text{ V}$  entsprechend einer Überhöhung von  $1,27$ .

Der gemessenen Wert entspricht praktisch dem theoretischen Wert von  $1,3$ .

##### 4.2 Verhalten der Wechsellspannungsverteilung auf einer Rohrleitung in Abhängigkeit von der Frequenz

Auf die o.g. Rohrleitung wurde ein Einspeiseversuch mit Wechsellspannung variabler Frequenz aus einem NF-Leistungsgenerator durchgeführt (s. Bild 4)

Dabei zeigte sich, dass bis zu einer Frequenz von  $39 \text{ Hz}$  die Wechsellspannung – wie in AfK 3 beschrieben – aperiodisch gedämpft wird, d.h. die Wechsellspannung am Ende der Rohrleitung war um den Betrag der Dämpfung geringer als am Einspeisepunkt.

Im Bereich zwischen  $39 \text{ Hz}$  und  $107 \text{ Hz}$  war die Amplitude der Wechsellspannung am Ende der Rohrleitung eindeutig größer als am Einspeisepunkt (Bild 5). Als Resonanzfrequenz lässt sich  $65 \text{ Hz}$  ablesen.

Die Berechnung des Eingangswiderstandes in Abhängigkeit von der Frequenz zeigt den für Serienresonanz typischen Verlauf mit einem Minimum bei der Resonanzfrequenz (Bild 6).

##### 4.3 Extreme Resonanzüberhöhung innerhalb einer Beeinflussungsstrecke

In einem weiteren Fall stellte sich innerhalb einer Beeinflussungsstrecke auf einer Rohrleitung DN 800 eine gefährliche Berührungsspannung von ca.  $100 \text{ V}$  ein, obwohl die Rohrleitung wechselstrommäßig an den Enden der Beeinflussungsstrecke durch den Anschluss von konzentrierten Erden an das Rohr niederohmig geerdet war. Die Wechsellspannung Rohrleitung – Erde betrug am Einbauort der Erder nur  $2,1 \text{ V}$ , der Wert des abgeleiteten Wechselstromes  $21 \text{ A}$ .

Die Entfernung zwischen den beiden Erdungspunkten beträgt  $18,4 \text{ km}$ . Die geometrische Mitte liegt daher bei  $9,2 \text{ km}$ .

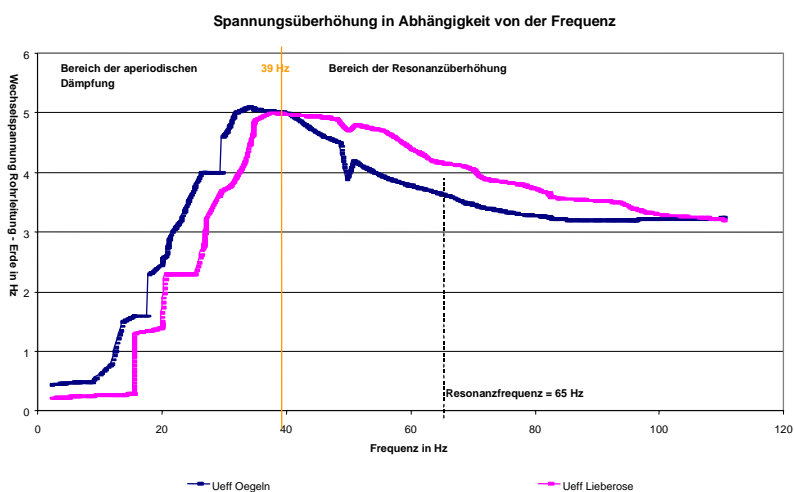


Bild 5: Resonanzfrequenz und Dämpfungsverlauf in Abhängigkeit von der Frequenz

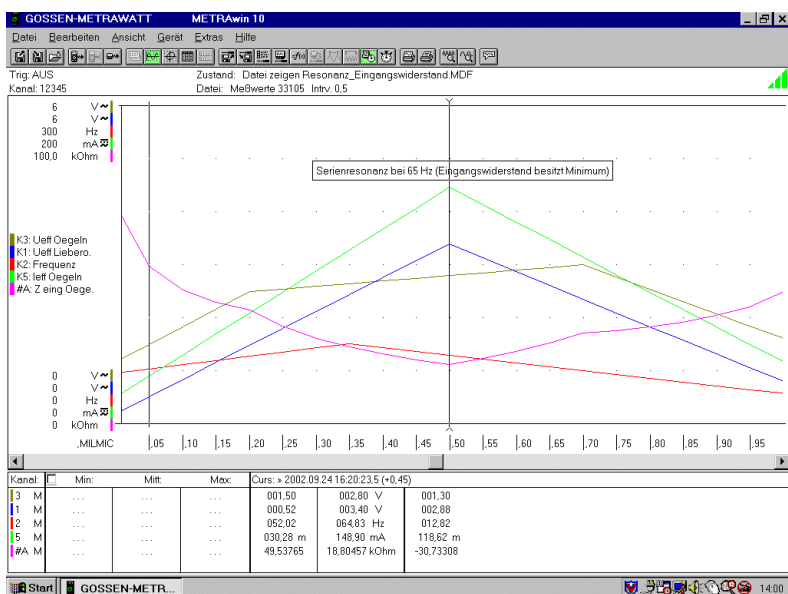


Bild 6: Verlauf des Eingangswiderstandes in Abhängigkeit von der Frequenz

Die Resonanzlänge errechnet sich aus

$$l_{\text{res}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{L' \cdot C'}}$$

und mit  $f = \text{Frequenz} = 50 \text{ Hz}$ ,

$L' = \text{bezogene Längsinduktivität} = 1,56 \text{ mH} / \text{km}$  (aus Bild 8.17 / AfK 3)

$C' = \text{bezogene Kapazität Rohr – Erde} = 17,05 \mu\text{F} / \text{km}$  (nach Formel 8-18 / AfK 3 mit  $\epsilon_r = 2,3$  und  $\delta = 3 \text{ mm}$ )

ergibt sich der Wert zu

$$l_{\text{res}} = 19,52 \text{ km.}$$

Damit entspricht die Rohrleitungslänge von  $18,4 \text{ km}$  in etwa der Länge, für die die Serienresonanz ausgerechnet werden kann.

Serienresonanz bedeutet, dass zwischen den beiden Endpunkten des Serienresonanzkreises ein elektrischer Kurzschluss besteht (s.o). Für den betrachteten Beeinflussungsfall heißt dies, dass die beiden Erdungspunkte auf

gleichem Wechselspannungspotential bei gleicher Phasenlage liegen.

Es wurde ein Wechselstrom zwischen Rohrleitung und Erde von 21 A gemessen. Dieser kann als in der Mitte der Resonanzlänge eingekoppelt angesehen werden, sodass er bis zu ihrem Ende eine Strecke von 9,2 km durchläuft.

Nach AfK 3 / Bild 8 / 17 beträgt der induktive Widerstandsbelag des

Rohres DN 800 für 50 Hz  $0,49 \Omega / \text{km}$ , d.h. dass der induktive Gesamtwiderstand des Rohres von der Mitte bis zu den Enden jeweils  $4,508 \Omega$  beträgt.

Das Produkt aus induktivem Gesamtwiderstand und durchfließendem Strom beträgt  $94,668 \text{ V}$ . Gemessen wurden Werte zwischen  $95 \text{ V}$  und  $99 \text{ V}$ .

Zur Verminderung der Wechselspannung Rohrleitung – Erde reicht die

Erdung an den Enden der Beeinflussungsstrecke nicht mehr aus; Abhilfe kann nur durch kontinuierlich über die Beeinflussungsstrecke angebrachte niederohmige Erder erreicht werden.

Sowohl mit Blick auf den Personenschutz (AfK 3) als auch auf die Möglichkeit der Wechselstromkorrosion (AfK 11) müssen die Gesichtspunkte der Rohrleitungsresonanz Beachtung finden.

#### Aus dem Verband

## Herr Dipl.-Ing. Wolfgang Vesper für die Kuhn-Ehrenmedaille vorgeschlagen

Die Mitglieder des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e.V. haben auf ihrer Jahreshauptversammlung am 22. und 23. April 2004 in Mainz Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Vesper, seit vergangenem Jahr im Labor für Korrosionsschutz und Elektrotechnik der Technischen Akademie in Wuppertal tätig, mit überwältigender Mehrheit für die Verleihung der Kuhn-Ehrenmedaille vorgeschlagen. Die Verleihung findet voraussichtlich im Herbst 2005 auf der Gasfachlichen Aussprachetagung des DVGW (gat'05) statt. Wir gratulieren herzlich.



#### Schulungsangebote

## TAW-Zerifikatslehrgänge in Zusammenarbeit mit dem Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz e.V.

### **KKS – Praktikum** – (Seminar-Nr. 5102551604)

Theorie und Messtechnik elektrischer und nichtelektrischer Größen sowie Anwendungen in der Praxis an geschützten Anlagen mit Zertifikatsprüfung

Gebühr: € 1.580,-

Dozenten: Obering. Dipl.-Ing. Klaus Horras, Wuppertal,  
Dipl.-Ing. Ulrich Bette, Dipl.-Ing. Wolfgang Vesper,  
Technische Akademie Wuppertal e.V.

Termin: 28.09. bis 01.10.2004

Aus dem Lehrgangsinhalt:

Kathodischer Schutz unterirdischer Anlagen, Erfassung relevanter elektrischer Messgrößen, Überprüfung des Korrosionsschutzes an einer Trinkwasserversorgungsleitung, Korrosionsschutzmessungen an einer streustrombeeinflussten Rohrleitung, Auswertung der Messergebnisse im Hörsaal, Zertifikatsprüfung durch den akkreditierten Personalzertifizierer TAW Cert GmbH

### **KKS unterirdischer Anlagen – Grundlagenseminar** – (Seminar-Nr. 5102551504)

Gebühr: € 1.340,-

Dozenten: Dipl.-Ing. Ulrich Bette, Dipl.-Ing. Wolfgang Vesper,  
Technische Akademie Wuppertal e.V.

Obering. Dipl.-Ing. Klaus Horras, Wuppertal,

Termin: 23.11. bis 26.11.2004

Aus dem Lehrgangsinhalt:

1. Wesen und Ursachen der Korrosion  
Chemische und elektrische Grundlagen
2. Passiver Korrosionsschutz
3. Kathodischer Korrosionsschutz
4. Messtechnik und Messverfahren
5. Beispiele ausgeführter Anlagen
6. Vorschriften, Verordnungen, Richtlinien
7. Zertifikatsprüfung durch den akkreditierten Personalzertifizierer TAW Cert GmbH

Anmeldung und Informationen: Technische Akademie Wuppertal e.V., D-42097 Wuppertal, Fax: 0202-7495-216, E-Mail: [anmeldung@taw.de](mailto:anmeldung@taw.de), URL: <http://www.taw.de>

Eingangsvoraussetzungen für die Zertifikatsprüfung:

abgeschlossene Berufsausbildung in fachbezogenem Lehrberuf – danach 3 Jahre fachbezogene Tätigkeit mit Bezug zur Ausbildung, davon mindestens 1 Jahr auf dem Gebiet des Korrosionsschutzes

Mitglieder des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e.V. erhalten gegen Vorlage der Teilnehmerkarte eine Ermäßigung von 10% auf die Seminargebühr.