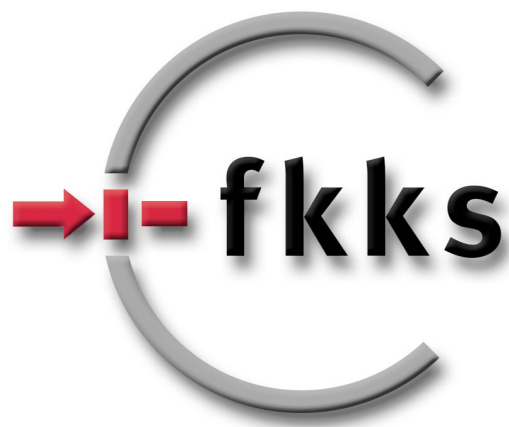


# Die Mitteilungen

März 2005

Nr. 55



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: Holger Wachsmann, Postfach 6004, 73717 Esslingen. Für namentlich gekennzeichnete Beiträge trägt der Verfasser die Verantwortung. Nachdruck mit Quellenangabe und Übersendung von zwei Belegexemplaren erwünscht.

Dipl.-Ing. Wolfgang Vesper, Technische Akademie Wuppertal e. V.

## Betrachtungen zum Verbrauch elektrischer Arbeit auf der Gleichstromseite bei Einsatz des Fremdstromverfahrens für den kathodischen Korrosionsschutz von Stahl/ Wasserbauwerken

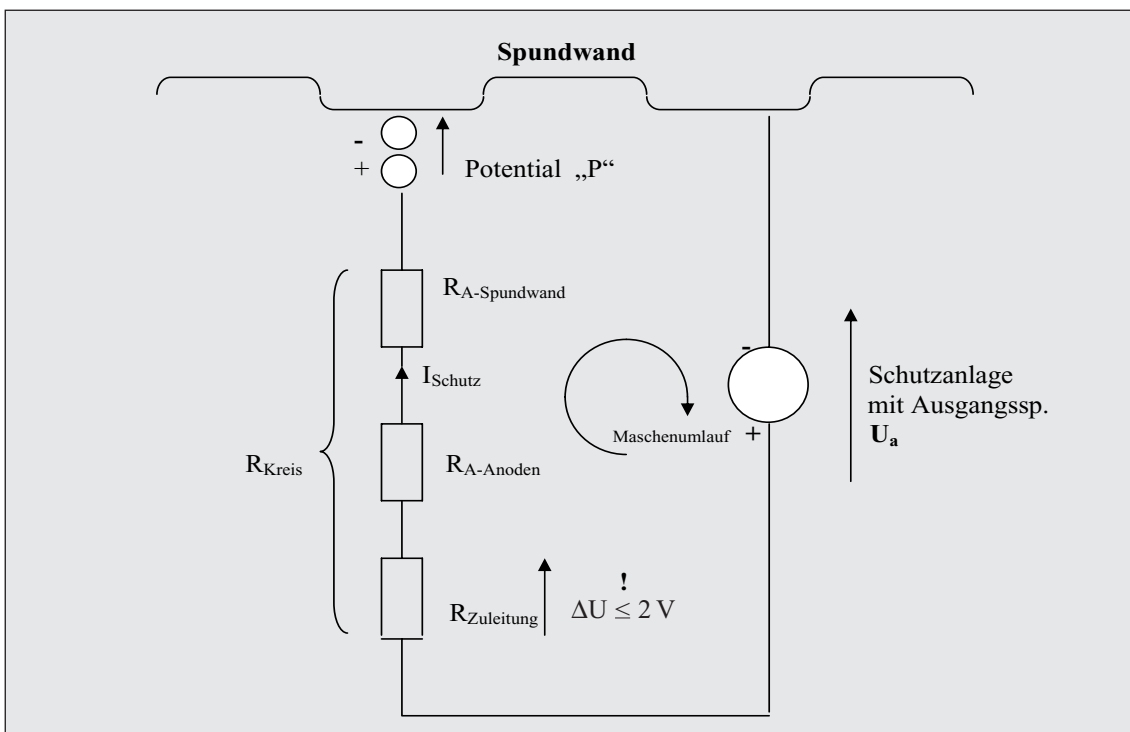
### 1. Einleitung

Bei Einsatz des kathodischen Schutzverfahrens im Bereich des Stahl/ Wasserbaues stehen in der Regel große mehr oder weniger blanke Stahloberflächen an, für die der kathodische Korrosionsschutz eingerichtet werden soll. Als Folge der großen häufig unbeschichteten Oberflächen, die mit Elektrolyten, die in der Regel sehr niedrige spezifische Widerstände aufweisen (Hafen Flensburg:  $50 \Omega \cdot \text{cm}$ ) in

Verbindung stehen, stellt sich eine Schutzstromdichte ein, die im Gegensatz zu den Werten, die von gut umhüllten Rohrleitungen bekannt sind, nicht im Bereich von  $\mu\text{A} / \text{m}^2$  liegen sondern bis zu einigen zehn  $\text{mA} / \text{m}^2$  betragen können. Entsprechend hoch fällt der gesamte Schutzstrombedarf aus, so dass in der Regel bei unbeschichteten oder schlecht beschichteten Bauwerken das Fremdstromverfahren zur Anwendung kommt. Neben den Fragen des günstigsten Stromtransportes

(Aufteilung auf mehrere Schutzbereiche, Fragen der Kabelführung und des Kabelquerschnittes) ist auch die Betrachtung des Verbleibes der zugeführten elektrischen Arbeit von Interesse, um daraus gegebenenfalls eine Minimierung der laufend entstehenden Stromkosten zu ermitteln. Anhand einer Analyse der einzelnen „Verbraucher“ soll diese Optimierung für die Planung neuer Stahl/ Wasserbauwerke durchgeführt werden.

### 2. Prinzipieller Aufbau einer Schutzanlage nach dem Fremdstromverfahren



#### Inhalt

#### Seite 1

Betrachtungen zum Verbrauch elektrischer Arbeit auf der Gleichstromseite bei Einsatz des Fremdstromverfahrens für den kathodischen Korrosionsschutz von Stahl/ Wasserbauwerken  
Fachaufsatz von  
Dipl.-Ing. Wolfgang Vesper, Technische Akademie Wuppertal

#### Seite 4

Der neu gewählte Vorstand

Bei Ansatz einer Schutzstromdichte von  $60 \text{ mA/m}^2$  (blanker Stahl) wird  $A_{II}^{60}$  zu

$$A_{II}^{60} = 2,88 \text{ Wh / (Tag * m}^2\text{)}$$

Variabel ist in Term II praktisch nur der Wert für die Schutzstromdichte in Abhängigkeit von der Güte der Beschichtung; alle anderen Parameter sind durch das Bauwerk (zu schützende Oberfläche) und das eingestellte Potential vorgegeben.

### c) Term I

Die Grenzbeträge sollen wieder für die Werte  $1 \text{ mA/m}^2 \leq j_s \leq 60 \text{ mA/m}^2$ ,  $A = 1500 \text{ m}^2$  und  $R_{\text{Kreis}} = 0,2 \Omega$  für  $j_s = 1 \text{ mA/m}^2$  und  $R_{\text{Kreis}} = 0,1 \Omega$  für  $j_s = 60 \text{ mA/m}^2$  ermittelt werden.

Für eine Schutzstromdichte von  $1 \text{ mA/m}^2$  wird Term I zu

$$R_{\text{Kreis}} * j_s^2 * A^2 = 0,2 \Omega * 1 \text{ mA/m}^2 * 1500 \text{ m}^2 = 0,45 \text{ W}$$

Innerhalb von 24 Stunden beläuft sich die elektrische Arbeit  $A_I^1$ , die für Term I zur Verfügung gestellt werden muss auf:

$$A_I^1 = 0,45 \text{ W} * 24 \text{ h / Tag} = 10,8 \text{ Wh / Tag}$$

und bezogen auf eine Fläche von  $1500 \text{ m}^2$  wird die auf  $1 \text{ m}$  bezogene elektrische Arbeit  $A_I^1$  zu:

$$A_I^1 = 10,8 \text{ Wh / Tag} / 1500 \text{ m}^2 = 0,0072 \text{ Wh / (Tag * m}^2\text{)}.$$

Bei Ansatz einer Schutzstromdichte von  $60 \text{ mA/m}^2$  (blanker Stahl) wird  $A_I^{60}$  zu:

$$A_I^{60} = 810 \text{ W} * 24 \text{ h / Tag} = 19,440 \text{ Wh / Tag}$$

und bezogen auf eine Fläche von  $1500 \text{ m}^2$  wird die auf  $1 \text{ m}$  bezogene Arbeit  $A_I^{60}$  zu:

$$A_I^{60} = 19,440 \text{ Wh / Tag} / 1500 \text{ m}^2 = 12,96 \text{ Wh / (Tag * m}^2\text{)}.$$

In Term I sind als variable Größen die Schutzstromdichte  $j_s$  und der Kreiswiderstand enthalten. Der Leistungsbedarf wächst (vergl. Punkt a) linear mit steigendem Ausbreitungswiderstand der Anodenanlage und dem Kupferwiderstand der Zuleitungen und quadratisch mit der Schutzstromdichte. Bezüglich der Kosten für die Verdrahtung hat sich als günstiger Kompromiss zwischen Aufwand für das Kupfer und die dauernden Stromkosten in der Praxis die Auslegung des Spannungsfalles auf den Zuleitungen auf maximal  $2 \text{ V}$  herausgestellt.

Der Ausbreitungswiderstand der Anodenanlage ergibt sich in der Regel als Folge der Auswahl der Anodenart und Anodenstandorte nach Gesichtspunkten der Lebensdauer und Stromverteilung im Wasser. Er ist daher nicht beliebig variabel.

## 4.2 Auflistung der Ergebnisse zu 4.1 und Bewertung

	Term I [Wh / (Tag * m <sup>2</sup> )]	Term II [Wh / (Tag * m <sup>2</sup> )]	Term III [Wh / (Tag * m <sup>2</sup> )]	Σ Term I – III [Wh / (Tag * m <sup>2</sup> )]
$j_s = 1 \text{ mA/m}^2$	0,0072	0,048	0,16	0,2152
$j_s = 60 \text{ mA/m}^2$	12,96	2,88	0,16	16
$j_s = 13,3 \text{ mA/m}^2$	0,6368	0,6384	0,16	1,4352

Im Sinne des Aufbaues von Polarisation für den kathodischen Korrosionsschutz stellt der Term I eine reine Verlustleistung an den ohm'schen Widerständen im Stromkreis dar. Die hier verbrauchte elektrische Arbeit wird in Wärme umgesetzt und trägt zum eigentlichen kathodischen Korrosionsschutz nichts bei.

Term II ist der Ausdruck für die Leistung, die in den Aufbau der Polarisation gesteckt werden muss. Dies ist der Wert, der für den Korrosionsschutz direkt wirksam ist. Die hierfür verbrauchte elektrische Arbeit verhindert das Rosten der Spundwand.

Term III stellt einen Wert dar, der durch Depolarisation, bewirkt durch das „Entladen“ der polarisierten Spundwand durch den Kreiswiderstand, der Polarisationswirkung entgegenwirkt.

Die hieraus resultierende elektrische Arbeit muss hingenommen werden, da sie durch Vergrößern des Kreiswiderstandes zwar verkleinert werden könnte, dies jedoch die Verlustleistung nach Term I nochmals erhöhen würde.

Die Schutzstromdichte kann in der Planungsphase einer Spundwand durch den Einsatz geeigneter Beschichtungswerkstoffe gering gehalten werden. Gegenüber unbeschichtetem Stahl nimmt der Bedarf an elektrischer Leistung quadratisch mit der kleiner werdenden Schutzstromdichte ab.

Bei nachträglichem Einsatz des kathodischen Schutzes an bereits bestehenden Bauwerken aus unbeschichtetem Stahl wird der größte Teil der elektrischen Arbeit in Wärme umgesetzt. In gewissem Masse abmildernd wirkt hier lediglich eine Deckschichtbildung nach einiger Polarisationszeit sowie ein Ausschaltpotential, das nicht viel negativer als  $-0,9 \text{ V}$  betragen sollte.

Für den Ansatz zur Berechnung werden die Spannungen in der „Masche“ des Prinzipschaltbildes vorzeichenrichtig aufaddiert:

$$-U_a + \underbrace{(R_{A\text{-Anoden}} + R_{A\text{-Spundwand}} + R_{Zuleitung})}_{R_{\text{Kreis}}} \cdot I_{\text{Schutz}} + P = 0$$

Daraus lässt sich die zum Treiben des Schutzstromes erforderliche Ausgangsspannung des Schutzstromgerätes  $U_a$  errechnen zu

$$U_a = R_{\text{Kreis}} \cdot I_{\text{Schutz}} + P$$

### 3. Erforderliche Gleichstromleistung

Der erforderliche Schutzstrom  $I_{\text{Schutz}}$  wird vorgegeben von der Art und der Güte der Beschichtung und der daraus resultierenden Schutzstromdichte  $j_s$  sowie von der zu schützenden Oberfläche  $A$  der Spundwand. Weitere Parameter wie spezieller Wasserwiderstand, Strömungsgeschwindigkeit des Wassers und seine Temperatur sollen nicht berücksichtigt werden.

Für den Arbeitsbereich des kathodischen Schutzes um  $-1\text{V}$  herum kann die Schutzstromdichte als konstant angesehen werden, sodass sich der erforderliche Schutzstrom errechnet zu:

$$I_{\text{Schutz}} = j_s \cdot A$$

Damit kann für die Ausgangsspannung geschrieben werden:

$$U_a = R_{\text{Kreis}} \cdot j_s \cdot A + P$$

Die zur Verfügung zu stellende Gleichstromleistung beträgt

$$P = U_a^2 / R_{\text{Kreis}} = (R_{\text{Kreis}} \cdot j_s \cdot A + P)^2 / R_{\text{Kreis}}$$

$$= [(R_{\text{Kreis}} \cdot j_s \cdot A)^2 + 2 \cdot R_{\text{Kreis}} \cdot j_s \cdot A \cdot P + P^2] / R_{\text{Kreis}}$$

$$= \underbrace{R_{\text{Kreis}} \cdot j_s^2 \cdot A^2}_{\text{Term I}} + \underbrace{2 \cdot j_s \cdot A \cdot P}_{\text{Term II}} + \underbrace{P^2 / R_{\text{Kreis}}}_{\text{Term III}}$$

## 4. Zuzuführende elektrische Arbeit

### 4.1 Grenzbetrachtungen zu den Termen I bis III

#### a) Term III

Das Potential (Ausschaltpotential) beträgt in der Regel um  $-1\text{V}$ . Als Rechenwert wird  $1\text{V}$  als Absolutwert eingesetzt.

Der Ausbreitungswiderstand der Spundwand ist – unbeschichteter Stahl entsprechend einer Schutzstromdichte von  $60\text{mA}/\text{m}^2$  vorausgesetzt – sehr niederohmig; mit einem Schutzstrom von  $90\text{A}$  wird z.B. eine Änderung des Einschaltpotentials bei einer Spundwandoberfläche von

$1500\text{m}^2$  von  $90\text{mV}$  erreicht (Beispiel: Hafen Flensburg, Nordertorkai), d.h. der Ausbreitungswiderstand der Spundwand beträgt  $1\text{m}\Omega$  und kann in der weiteren Rechnung für unbeschichtete Spundbohlen vernachlässigt werden; bei beschichtetem Stahl und einer Schutzstromdichte von  $1\text{mA}/\text{m}^2$  kann mit einem Ausbreitungswiderstand von ca.  $0,1\Omega$  gerechnet werden.

Der Wert für den Widerstand aus Ausbreitungswiderstand der Anodenanlage und Widerstand der Zuleitungen liegt in der Größenordnung von  $0,1\Omega$ :

$90\text{A}$  Schutzstrom werden typischerweise mit einer Ausgangsspannung der Schutzanlage von  $9\text{V}$  getrieben; bei Abzug eines Wertes von  $1\text{V}$  für Polarisation und Division der verbleibenden Spannung durch den Schutzstrom erhält man den Wert von ca.  $0,1\Omega$ . (Beispiel: Hafen Flensburg, Schutzbereich Nordertorkai).

Der Term III wird dann zu:

$$P^2 / R_{\text{Kreis}} = 1^2\text{V}^2 / 0,1\Omega = 10\text{W}$$

Innerhalb von 24 Stunden beläuft sich die elektrische Arbeit  $A_{\text{III}}$ , die für Term III bereitgestellt werden muss auf:

$$A_{\text{III}} = 10\text{W} \cdot 24\text{h} / \text{Tag} = 240\text{Wh} / \text{Tag} \text{ und bezogen auf eine Fläche von } 1500\text{m}^2 \text{ wird die auf } 1\text{m}^2 \text{ bezogene Arbeit } A_{\text{III}'} \text{ zu}$$

$$A_{\text{III}'} = 240\text{Wh} / \text{Tag} / 1500\text{m}^2 = 0,16\text{Wh} / (\text{Tag} \cdot \text{m}^2)$$

Die einzige Variable in Term III ist der Kreiswiderstand: je niederohmiger er wird, um so größer wird die benötigte elektrische Arbeit.

Die Überlegung, den Kreiswiderstand zugunsten eines kleineren Wertes für  $A_{\text{III}'}$  größer zu machen, bringt mit Blick auf das Verhalten von Term I keinen Vorteil (s. Punkt c).

#### b) Term II

Die Schutzstromdichte variiert mit der Art und Güte einer Beschichtung der Spundwand zwischen Werten von  $1\text{mA}/\text{m}^2$  für sehr gute Beschichtungen bis etwa  $60\text{mA}/\text{m}^2$  für unbeschichteten Stahl; es ist also  $1\text{mA}/\text{m}^2 \leq j_s \leq 60\text{mA}/\text{m}^2$ .

Das Beispiel mit einer zu schützenden Spundwandfläche von  $1500\text{m}^2$  soll fortgeführt werden.

Der Kreiswiderstand wird daher wieder zu  $0,1\Omega$  eingesetzt.

Der Term II wird für eine Schutzstromdichte von  $1\text{mA}/\text{m}^2$  zu:

$$2 \cdot j_s \cdot A \cdot P = 2 \cdot 1\text{mA} / \text{m}^2 \cdot 1500\text{m}^2 \cdot 1\text{V} = 2 \cdot 1,5\text{A} \cdot 1\text{V} = 3\text{W}$$

Innerhalb von 24 Stunden beläuft sich die Arbeit  $A_{\text{II}}$ , die für Term II bereitgestellt werden muss auf:

$$A_{\text{II}} = 3\text{W} \cdot 24\text{h} / \text{Tag} = 72\text{Wh} / \text{Tag} \text{ und bezogen auf eine Fläche von } 1500\text{m}^2 \text{ wird die auf } 1\text{m}^2 \text{ bezogene Arbeit } A_{\text{II}'} \text{ zu:}$$

$$A_{\text{II}'} = 72\text{Wh} / \text{Tag} / 1500\text{m}^2 = 0,048\text{Wh} / (\text{Tag} \cdot \text{m}^2).$$



#### Der Autor

Dipl.-Ing. Wolfgang Vesper ist im TAW-Labor für Korrosionsschutz und Elektrotechnik bei der TAW Technischen Akademie e.V. in Wuppertal beschäftigt und für die Verleihung der vom Fachverband gestifteten Kuhn-Ehrenmedaille im Jahr 2006 nominiert.

#### 5. Schutzstromdichte für einen Wirkungsgrad von 50 %

$$j_{s-50\%} = 2 * P / (R_{Kreis} * A)$$

$$= 2 * 1 V / (0,1 \Omega * 1500 m^2)$$

$$= 13,3 mA / m^2.$$

Setzt man an, dass unter Vernachlässigung von Term III der Wirkungsgrad wenigstens 50% betragen sollte (50% Verlustleistung und 50% für Aufbau der Polarisation), so kann geschrieben werden:

$$\text{Term I} = \text{Term II oder}$$

$$R_{Kreis} * j_s^2 * A^2 = 2 * j_s * A * P$$

Hieraus lässt sich ein Wert für  $j_s$  ausrechnen:

Über eine Beschichtung im Wasser-Tauchbereich der Spundbohlen (nicht Rammbereich, hier liegt der Wert für die Schutzstromdichte in der Regel höher) wäre dieser Wert realisierbar. Die laufenden Stromkosten könnten hierdurch auf einen Wert von 9 % der Kosten ohne Beschichtung reduziert werden (siehe die Tabelle unter 4.2, Werte für 13,3 mA/m<sup>2</sup>).

Aus dem Verband

## Neuwahl des Vorstandes

Auf der Jahreshauptversammlung 2005 des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e.V. am 17. und 18. Februar 2005 in Halle an der Saale wählte die Mitgliederversammlung den neuen Vorstand. Die vorzeitige Vorstandswahl wurde durch den Tod von Herrn Dipl.-Ing. Willi Fleig notwendig.

Zum neuen 1. Vorsitzenden wurde Herr Ing. Holger Wachsmann, Bad Hindelang, gewählt. In seinem Amt als 2. Vorsitzender wurde Herr Dipl.-Ing. Klaus Horras, Wuppertal, bestätigt. Als weitere Mitglieder im Vorstand wurden Herr Dipl.-Ing. Klaus Riegel, Greppin, sowie Herr Johann Scholten, Nordhorn und Herr Konrad Steffel, Celle, berufen.

Weiterhin wurde eine neue Geschäftsaufteilung bei der vom Fachverband durchgeführten Güteüberwachung festgelegt: Herr Wachsmann leitet nunmehr den Prüfausschuss Süd, Herr Horras betreut den Prüfausschuss West, Herr Steffel (Vorsitzender) und Herr Scholten (Stellvertreter) leiten gemeinsam den Prüfausschuss Nord sowie Herr Riegel ist wie bislang für den Prüfausschuss Ost zuständig.

Als neuer Geschäftsführer wurde Herr Hans-Gerhard Köpf bestellt. Herr Köpf war bislang für die Geschäftsstelle zuständig.

Wir gratulieren allen Herren herzlich.



Herr Ing.  
**Holger Wachsmann**  
1. Vorsitzender



Herr Dipl.-Ing.  
**Klaus Horras**  
2. Vorsitzender

Aus dem Verband

#### Neue Mitglieder

Wir begrüßen als neue Mitglieder im Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz e.V.:

Firma Jan Lobenstein  
Elektro-Service  
Kreuzfeldring 78  
29353 Ahsbeck

und  
Bruns Elektrotechnik GmbH & Co. KG  
Birkenstraße 17  
27252 Schwaförden