

H. Hildebrand, C.-L. Kruse und W. Schwenk

Einflußgrößen der Fremdkathoden aus Bewehrungsstahl in Beton auf die Erdbodenkorrosion von Stahl

Factors influencing the activity of reinforcing steel as cathode on the soil corrosion
of steel

„Werkstoffe und Korrosion“ 38 (11), S. 696–703 (1987)

Bericht Nr. 103
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.

Einflußgrößen der Fremdkathoden aus Bewehrungsstahl in Beton auf die Erdbodenkorrosion von Stahl

Factors influencing the activity of reinforcing steel as cathode on the soil corrosion of steel

H. Hildebrand*, C.-L. Kruse** und W. Schwenk*

Herrn Professor Dr. Alfred Rahmel zum 60. Geburtstag gewidmet

In dreijährigen Feldversuchen wurden die Einflußgrößen des Elementes Stahl/Erdboden (Anode) und Bewehrungsstahl/Beton (Kathode) untersucht. In allen Fällen war die Erhöhung der Korrosionsrate im Vergleich zur freien Korrosion größer als der gemessene Elementstrom. Dieser Effekt der Zunahme der Eigenkorrosion durch Elementwirkung (negativer Differenzeffekt) wird auf eine verminderte Hemmung der kathodischen Teilreaktionen durch Deckschichten aus Korrosionsprodukten im Vergleich zu der bei freier Korrosion gedeutet.

Bei den Kathoden haben betonseitige Parameter nahezu keinen, eine Verzinkung des Bewehrungsstahls aber einen wesentlichen Einfluß auf die Elementwirkung. Da der Elementwiderstand überwiegend durch den Mediumwiderstand (Ausbreitungswiderstand der Anode) bestimmt wird, können Änderungen des Polarisationswiderstandes der Kathoden kaum wirksam werden.

Eine Verminderung der Elementwirkung durch Verzinken des Bewehrungsstahls ist zwar deutlich vorhanden, stellt jedoch keinen ausreichenden Schutz dar. Somit kommen nur konventionelle elektrochemische Maßnahmen gegen die Elementwirkung oder eine Passivbeschichtung des Bewehrungsstahls als wirksame Schutzmaßnahmen infrage.

Factors influencing the corrosion cell established between steel/soil (anode) and reinforcing steel in concrete (cathode) were investigated in field tests extending up to 3 years. In all cases, the differences between the corrosion rates measured in the cell and under free corrosion conditions were higher than the equivalent cell current. This effect means an increase of the cathodic partial reaction by cell action (negative difference effect), and is related to better protecting layers in the case of free corrosion.

As to the cathodes, the parameters of the concrete have nearly no effect. But galvanizing of the reinforcing steel has a strong influence on the cell action. Since the cell resistance is mainly controlled by the electrolyte resistance (ground resistance of the anodes) the changes in the polarization resistance of the cathodes can hardly influence the cell action.

A decrease of cell currents due to galvanizing the reinforced steel is no doubt present, but the effect is too poor for proper protection against cell activities. Therefore, only conventional electrochemical methods or organic coatings on the reinforcing steel can be applied as protective measures.

1 Problemstellung

Die Verwendung von stahlbewehrtem Beton für Bauten und Fundamente ist eine anerkannte Technik mit zunehmender Tendenz. Dabei kommt es häufig vor, daß erdverlegte Konstruktionsteile aus Stahl, z.B. Behälter und Rohrleitungen, über beliebige metallische Konstruktionselemente eine metallleitende Verbindung mit dem Bewehrungsstahl haben. In solchen Fällen entsteht ein korrosionschemisches Kurzschlußelement, bei dem der im Beton passive Bewehrungsstahl die Kathode und der dem Erdboden ausgesetzte Stahl, z.B. an Bereichen verletztter Umhüllung, die Anode darstellen [1-3]. Derartige Elemente sind eine große Gefährdung für z.B. Gashaushaltsanschlüsse. Dies wurde erstmals in Neubaugebieten beobachtet [4], wobei schon frühzeitig zum

Korrosionsschutz eine elektrische Trennung gefordert wurde [3, 5, 6]. Aber auch in Stadtzentren nehmen im Zuge von Bausanierungen der Einsatz von Stahlbetonfundamenten und mit diesen die Korrosionsgefahren zu [7].

Die Elementbildung erdverlegter Objekte mit Fremdkathoden aus bewehrtem Stahl ist in Korrosionsschutznormen [8, 9] ausreichend behandelt und kommentiert [10], wobei vor allem auf den Tatbestand hingewiesen wird, daß durch Verbesserung der Umhüllung das Problem eher verschärft als gelöst werden kann [7]. Andererseits scheint es aber betonseitige Einflußgrößen zu geben, die das Gefährdungsmaß merkbar beeinflussen und für Korrosionsschutzmaßnahmen Interesse finden. So wurde bei früheren Arbeiten gefunden, daß die Wirksamkeit der Kathode entscheidend vom Ausmaß der Belüftung abhängt [11-14], wobei andauernd in Wasser eingetauchte Kathoden nahezu wirkungslos sind, nach dem der von der Herstellung stammende Sauerstoff im Beton verbraucht ist. Als kathodenseitige Einflußgrößen sind folgende Parameter von Interesse:

* H. Hildebrand und Prof. Dr. W. Schwenk, Mannesmann Forschungsinstitut GmbH, Postfach 25 11 67, 4100 Duisburg 25.

** Dr. C.-L. Kruse, Staatliches Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, Postfach 41 03 07, 4600 Dortmund 41.

- Verzinkung des Bewehrungsstahls [2, 11, 14, 15],
- Zementart [2, 12, 16],
- Porosität (Wasserszementwert) [16].

Diese Fragen sollten durch Feldversuche beantwortet werden.

2 Versuchsdurchführung und -parameter

Für die Untersuchungen dienten Kathoden aus Stahlbeton-Rohrkörpern der Abmessungen: Länge = 1 m, Durchmesser = 1 m, Wanddicke = 10 cm. Die Stahlbewehrung bestand aus einem Stahldrahtnetz mit einer Oberfläche $S_k = 2,4 \text{ m}^2$. Die Eigenschaften der Kathoden bzw. die Versuchsparameter sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Die Kathoden wurden senkrecht in Gruben von 1 m Tiefe angeordnet, so daß die Außenflächen mit dem Boden Kontakt hatten, während die Innenflächen bodenfrei nur der Luft ausgesetzt waren.

Als Anoden dienten Stahlplatten der Abmessung $5 \times 5 \text{ cm}$, 5 mm dick mit einer Fläche $S_{a1} = 58 \text{ cm}^2$. Diese Proben wurden in Anlehnung an frühere Untersuchungen [17] gleichartig mit etwa 1 dm^3 Tonboden allseitig umgeben und in einem Abstand von 1 m von den Kathoden in einer Tiefe von etwa 0,5 m eingegraben. Jeder Kathode wurden zehn Proben in kreisförmiger Anordnung zugeordnet. Dabei war jeweils eine der Proben für einen Vergleich feuerverzinkt (Proben Z).

Alle Proben hatten Kabelanschlüsse. Jeweils acht Proben einer zugehörigen Kathode waren mit derselben über einen 10-Ohm-Shunt verbunden. Die neunte Probe korrodierte frei (Proben O). Zur Potentialmessung wurden an folgenden Stellen jeder Gruppe Bezugselektroden angeordnet:

- in unmittelbarer Nähe der Anode Nr. 8,
- zwischen den Proben O und Z,
- unmittelbar an der Außenfläche der Kathode mit Hilfe eines 25-mm-Kunststoffrohres als „Sonde“.

Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- Strommessungen an den Shunts;
- Einschaltpotentialmessung (U_{ein}) der Kathode und der Anode Nr. 8;
- Ausschaltpotentialmessung (U_{aus}) der Kathode (innerhalb einer Sekunde nach dem Unterbrechen);
- Ruhepotentialmessungen (bei ausgeschalteten Strömen aller Elemente)
 - Kathode und Anode Nr. 8 als U_{aus} (1 h) (eine Stunde nach der Unterbrechung),
 - Proben O und Z;
- Massenverlustmessungen an ausgebauten Proben. Hierzu wurden halbjährlich den einzelnen Gruppen je eine Probe entnommen (Nr. 1 bis 6) sowie je Zeiteinheitnahme eine Probe der Art O und Z (aus den Gruppen Nr. 1 bis 6).

Tabelle 1. Eigenschaften der Kathoden und Versuchsparameter
Table 1. Properties of the cathodes and test variables

Nr.	Zementart	Wasser/Zement-Verhältnis (W/Z)	Bewehrungsstahl
1	Portlandzement (PZ)	0,5	unverzinkt
2	Portlandzement (PZ)	0,7	unverzinkt
3	Hochofenzement (HOZ)	0,5	unverzinkt
4	Hochofenzement (HOZ)	0,7	unverzinkt
5	Portlandzement (PZ)	0,5	verzinkt
6	Portlandzement (PZ)	0,7	verzinkt
7	Hochofenzement (HOZ)	0,5	verzinkt
8	Hochofenzement (HOZ)	0,7	verzinkt

(Es war beabsichtigt, durch Ersatz der ausgebauten Proben die Flächenverhältnisse konstant zu halten. Da frisch eingebaute Proben jedoch ein verhältnismäßig negatives Potential hatten, ergaben sich wesentliche Verzerrungen der Elementtätigkeit. Aus diesem Grunde wurde auf Ersatzproben verzichtet und variable Flächenverhältnisse von $V = S_k/S_a = 52$ bis 138 in Kauf genommen. Im zeitlichen Mittel (bis zu 3 Jahren) lagen die Flächenverhältnisse zwischen 52 und 84.)

Im allgemeinen wurden Messungen zu a) bis c) zweiwöchentlich, die Messungen zu d) vierwöchentlich durchgeführt. Der Massenverlust wurde nach Reinigen, z.B. Beizen mit inhibierter Salzsäure, durch Differenzwägen ermittelt. Die verzinkten Proben wurden mit warmer Chromsäure gereinigt.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Korrosionsbefund der Stahlproben

Alle Elementproben zeigten einen muldenförmigen Korrosionsangriff, wie er in gleicher Weise bei früheren Elementversuchen [17] beobachtet wurde. Im allgemeinen nahmen die Muldentiefen mit der Versuchsdauer bzw. mit ansteigendem Massenverlust zu. Die frei korrodierenden Proben O und vor allem Z zeigten einen nur sehr geringen Angriff. Aus den Massenverlusten wurden die flächenbezogenen Daten m_a ermittelt. Sie sind in Abhängigkeit von der Versuchsdauer in Abb. 1 zusammengestellt.

3.2 Auswertung der Massenverluste und der Elementströme

Aus den Elementstrom-Zeit-Messungen wurde über die Ladungsmenge ein äquivalenter Massenverlust m_e errechnet nach der Beziehung:

$$\left(\frac{m_e}{\text{gm}^{-2}} \right) = \frac{1,04}{(S_a/\text{m}^2)} \left(\frac{\int I_e dt}{Ah} \right) \quad (1)$$

Hier und im folgenden entsprechen die Formelzeichen den Angaben in DIN 50905 Teil 2 und DIN 50919. Die Größe m_e ist ebenfalls in Abb. 1 eingetragen. In Anlehnung an DIN 50919 (Erläuterung) lassen sich die m_a - und m_e -Werte mit den folgenden Verhältniszahlen weiter auswerten [17]:

$$f_1 \equiv \frac{I_{Aa}}{I_e} = \frac{m_a}{m_e} \quad (2)$$

$$f_2 \equiv \frac{I_{Aa} - I_{Aa}(U_R)}{I_e} = \frac{m_a - m_a^0}{m_e} \quad (3)$$

$$f_3 \equiv \frac{I_{Aa}}{I_{Aa}(U_R)} = \frac{m_a}{m_a^0} \quad (4)$$

Hierbei bedeutet $m_a^0 = m_a(U_R)$ = Massenverlust bei freier Korrosion. In den Gln. (2) bis (4) ist für I_{Aa} und m_a Proportionalität angenommen, was nur für lineare Korrosionsraten zulässig ist. Diese Annahme ist aber mit guter Näherung richtig, da die f -Werte sich nicht als signifikant zeitabhängig erwiesen.

Nach den Angaben in DIN 50919 und in [18] ist stets $f_1 > 1$. Bei positiven differentiellen Polarisationswiderständen der kathodischen Teilreaktion ist stets $f_2 < 1$, was einem „positiven Differenzeffekt“ entspricht [19]. Hierbei ist aber voraus-

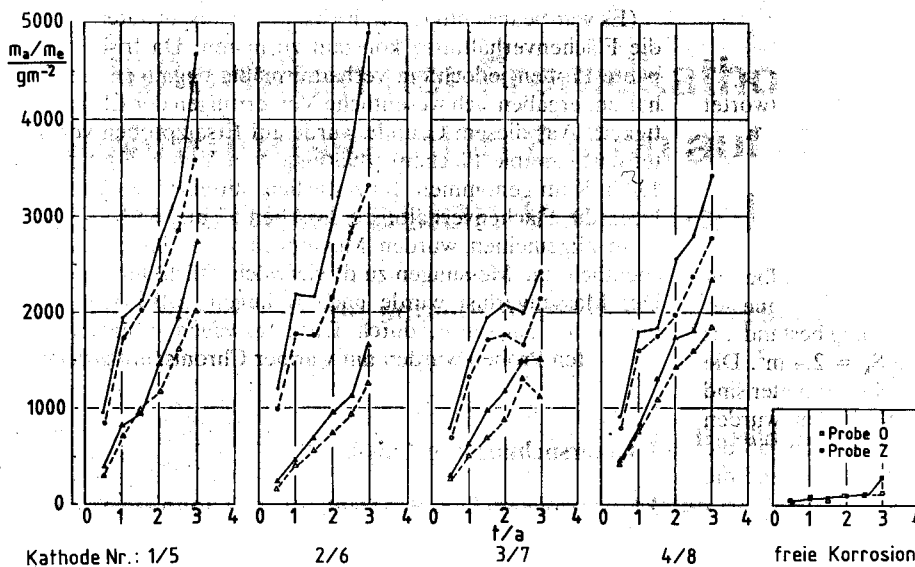


Abb. 1. Zeitabhängigkeit der flächenbezogenen Massenverluste m_a und m_e der Anoden und der Proben O und Z bei freier Korrosion

Bewehrungsstahl unverzinkt verzinkt

m_a ● ▲
 m_e ○ △

Fig. 1. Time dependence of the weight losses per unit area m_a and m_e of the anodes and of the freely corroding specimens O and Z

reinforcing steel not galvanized galvanized
 m_a ● ▲
 m_e ○ △

gesetzt, daß eine Abdeckung der Probe durch Deckschichten sich nicht verändert. Bei kathodischen Grenzströmen wird $f_2 = 1$. Für den Fall der Sauerstoffkorrosion werden im allgemeinen kathodische Grenzströme angenommen, wobei der Sauerstoffzutritt durch Deckschichten kontrolliert werden kann. Dieser Effekt wird nach Gl. (5) durch α -Werte berücksichtigt, wobei hier abweichend zu [18] und DIN 50919 noch zwischen α_a und α_a^0 unterschieden wird:

$$i_{gr} = I_{Ka} \frac{\alpha_a}{S_a} = I_{Kk} \frac{\alpha_k}{S_K} = I_{Ka}(U_R) \frac{\alpha_a^0}{S_a} \quad (5)$$

Unter Berücksichtigung der Strombilanzen $I_{Aa} = I_{Ka} + I_e$ und $I_{Aa}(U_R) = I_{Ka}(U_R)$ sowie Vernachlässigung einer Korrosion der Kathode ($I_e = I_{Kk}$) folgt aus den Gln. (2) bis (5) mit $V = S_K/S_a$:

$$f_1 = 1 + \frac{\alpha_k}{\alpha_a} \frac{1}{V} \quad (6)$$

$$f_2 = 1 + \frac{\alpha_k}{\alpha_a} \frac{1}{V} \left(1 - \frac{\alpha_a}{\alpha_a^0} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\alpha_k}{\alpha_a} = V(f_1 - 1) = V \left(\frac{m_a - m_e}{m_e} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\alpha_a}{\alpha_a^0} = \frac{f_1 - f_2}{f_1 - 1} = \frac{m_a^0}{m_a - m_e} \quad (9)$$

Nur zum Vergleich wird $i_{gr} = 10 \mu A cm^{-2}$ angenommen. Dem entspricht mit den Gln. (1) und (5) die Beziehung:

$$\alpha_a^0 = 0,104 \frac{t/h}{m_a^0/gm^{-2}} \quad (10)$$

Durch Einsetzen in Gl. (9) kann dann α_a und durch Einsetzen in Gl. (8) auch α_k ermittelt werden. Wegen des zeitlich nicht konstanten Flächenverhältnisses V , was durch einen Mittelwert berücksichtigt ist, können diese Werte etwas fehlerhaft sein. Für $\alpha_a^0 > \alpha_a$ folgt aus Gl. (7): $f_2 > 1$, was einem „negativen Differenzeffekt“ entspricht. Dieser Fall ist aber nicht auf eine anomale $I_K(U)$ -Kennlinie mit negativen Polarisationswiderständen, sondern auf eine Potentialabhängigkeit der Bedeckung durch Deckschichten bzw. deren Wirkung zurückzuführen. Dies wurde in DIN 50919 und in [18] nicht erörtert

Tabelle 2. Zeitliche Mittelwerte der Auswertung nach den Gln. (2) bis (4) und (7) bis (10)

Table 2. Mean values over time of calculated results according to eqs. (2) to (4) and (7) to (10)

Element	f_1	f_2	f_3	α_k/α_a	α_a/α_a^0	α_a (Relativwerte für $i_{gr} = 10 \mu A cm^{-2}$)	α_k	α_k -Bereich
1	1,15	1,12	32,7	10,9	0,32	5,8	45,0	26– 65
2	1,30	1,26	35,3	19,9	0,13	2,4	46,4	23– 68
3	1,15	1,10	23,2	9,9	0,35	6,5	65,5	31–106
4	1,17	1,13	27,7	11,7	0,36	6,4	53,5	29– 84
5	1,22	1,15	15,7	15,4	0,37	6,7	89,6	67–115
6	1,27	1,14	9,8	17,4	0,52	9,3	152,7	128–181
7	1,29	1,18	12,0	19,0	0,40	7,3	129,2	88–205
8	1,16	1,09	16,6	11,1	0,48	8,6	84,4	55–122
Streuung ²⁾ in %	6,2	6,3	14,3	48,8 ³⁾	43,8	43,0	33,1 ³⁾	

¹⁾ $\alpha_a^0 = 18,2 \pm 1,7$ (zeitlicher Mittelwert \pm Stand-abw.)

²⁾ (Stand-abw./Mittelwert) 100%

³⁾ deutliche Zeitabhängigkeit

und erstmalig bei der Sauerstoffkorrosion in Meerwasser beobachtet [20].

Für eine Auswertung nach den Gln. (2) bis (4) und (8) bis (10) wurden in Abhängigkeit von der Versuchsdauer alle m_a -Werte einer Gruppe sowie zeitlich interpolierte Werte für m_a^0 eingesetzt. In den Gln. (6) und (8) wurde für das Flächenverhältnis V gegebenenfalls ein zeitlicher Mittelwert eingesetzt. In der Tabelle 2 sind die zeitlichen Mittelwerte der f - und α -Daten und für α_k zusätzlich die Streubereiche angegeben. Nur für diesen Wert lag auch eine Zeitabhängigkeit vor. Diese Zeitabhängigkeit ist aber größer als aufgrund des möglichen Fehlers im V -Wert zu erwarten war. Die Streuung ist für die f -Werte verhältnismäßig gering und für die α -Werte erwartungsgemäß größer.

3.3 Auswertung der Potentiale

Die Ruhepotentiale der Proben O und Z sowie der Kathoden ($U_{\text{aus}}(1 \text{ h})$) sind in Abb. 2 zusammengestellt. Diese Daten vermitteln einen Überblick der Elementspannung, der Wirkung der Versuchsparameter und vor allem der Zeit. Es fällt auf, daß die Ruhepotentiale der Proben Z und die Proben der Kathoden mit verzinktem Bewehrungsstahl mit der Zeit deutlich positiver werden. Die Einschaltpotentiale der Kathoden lagen im Durchschnitt 0,1 V negativer. Die Potentialmaxima der Proben O sind auf eine Trockenperiode zurückzuführen und nur vorübergehend. Sie sind nur wenig negativer als die Potentiale der Anoden Nr. 8 ($U_{\text{aus}}(1 \text{ h})$).

Aus den Potentialen der Kathoden und der zugehörigen Anoden Nr. 8 sowie aus den Elementströmen lassen sich Umhüllungswiderstände R_u , Polarisationswiderstände R_p und Mediumwiderstände R_M ableiten:

a) Kathoden

$$R_u(t) = \frac{U_{\text{ein}} - U_{\text{aus}}(1 \text{ s})}{-\Sigma I_e} \quad (11)$$

$$R_p(t) = \frac{U_{\text{aus}}(1 \text{ s}) - U_{\text{aus}}(1 \text{ h})}{-\Sigma I_e} \quad (12)$$

b) Anoden (Probe Nr. 8)

Tabelle 3. Mittelwerte der Widerstände nach den Gln. (11) bis (15) (gemittelt über alle Gruppen)

Table 3. Mean values of the different kinds of resistances according to eqs. (11) to (15) (averaged for all cathodes)

Gegenstand: t d	Kathode R_u Ω	R_p Ω	Anode R'_u Ω	R'_p Ω	Medium R_M Ω
127	12	28	22	78	205
365	16	34	25	63	241
547	31	42	26	59	277
731	27	51	23	40	300
911	25	59	24	63	347
1092	21	56	91	185	1216
Mittelwert	22	45	35	55	431

$$R'_u = \frac{U_{\text{ein}} - U_{\text{aus}}(1 \text{ s})}{I_e} \quad (13)$$

$$R'_p = \frac{U_{\text{aus}}(1 \text{ s}) - U_{\text{aus}}(1 \text{ h})}{I_e} \quad (14)$$

c) Mediumwiderstand

$$R_M(t) = \frac{U_{\text{ein}}(\text{Kathode}) - U_{\text{ein}}(\text{Probe 8})}{I_e(\text{Probe 8})} \quad (15)$$

Für Zeiten mit halbjährlichen Abständen sind die für alle Probengruppen gemittelten Widerstände in der Tabelle 3 zusammengestellt. Hierbei ist zu erkennen, daß mit Ausnahme starker Abweichungen zu Versuchsende, das mit einer trockenen Witterungsphase zusammenfällt, nur beim Polarisationswiderstand der Kathoden (R_p) eine signifikante Zeitabhängigkeit vorliegt. Dieser Effekt macht sich aber im Gesamtwiderstand kaum bemerkbar, da dieser überwiegend durch R_M bestimmt ist.

Mit Hilfe der Elektrodenoberflächen ergeben sich für die angegebenen Mittelwerte zum Vergleich folgende flächenbezogenen Werte:

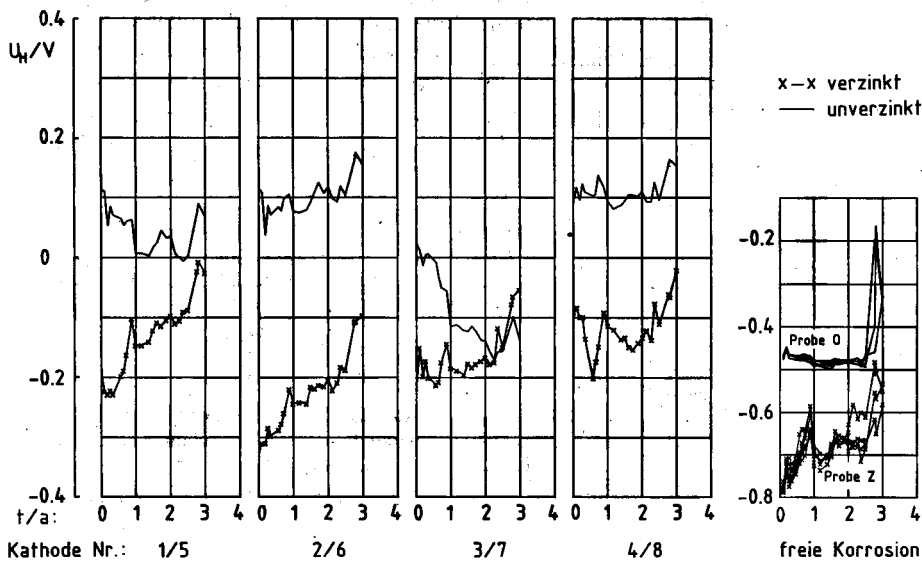


Abb. 2. Zeitabhängigkeit der Ruhepotentiale der Kathoden ($U_{\text{aus}}(1 \text{ h})$) und der Proben O und Z bei freier Korrosion (U_R)

Fig. 2. Time dependence of the open-circuit-potentials of the cathodes (U_{off} after 1 h) and corrosion potentials (U_R) of the specimens O and Z

	Kathoden	Anoden
$R_u/k\Omega cm^2$	530	2,0
$R_p/k\Omega cm^2$	1080	3,2

Diese Werte liegen in einem erwarteten Bereich. Nur machen sich diese Größenunterschiede im Element wegen des Flächenverhältnisses nicht bemerkbar.

Stichprobenweise Auswertungen über eine detailliertere Zeitabhängigkeit der Meßwerte zeigten, daß die Widerstandswerte ganz wesentlich streuen und daß bei den R'_u -Werten zuweilen irrealer Resultate auftreten, die offensichtlich auf Potentialfehler zurückzuführen sind. Bei den weniger fehlerhaften R_M -Werten zeigen sich zuweilen deutlich jahreszeitliche Schwankungen mit Höchstwerten bei Frost und Trockenheit, vgl. Abb. 3. Die Ergebnisse sind aber für die einzelnen Gruppen nicht einheitlich, so daß unbekannte bzw. örtlich statistische Widerstandsschwankungen als essentielle Einflußgrößen angenommen werden müssen. Weiterhin konnte in Stichversuchen ermittelt werden, daß die R_M -Werte den Ausbreitungswiderständen der Anoden entsprechen.

Die Tabelle 4 enthält zeitlich gemittelte Werte und die Streuung der Widerstände unterteilt nach den einzelnen Gruppen. Der nach [2] erwartete Einfluß der Zementart auf den Umhüllungswiderstand R_u besteht nur beim verzinkten Bewehrungsstahl. Ein Einfluß des Wasserzementwertes ist nicht erkennbar. Demgegenüber ist beim Polarisationswiderstand R_p deutlich ein günstiger Einfluß der Verzinkung zu erkennen. Weiterhin führen durchweg die Mörtel mit höherem Wasserzementwert zu etwas höheren Polarisationswiderständen.

Die R'_u - und R_M -Werte sollten theoretisch völlig unabhängig von den Kathodengruppen sein. Die beobachteten Unterschiede sind wenig verständlich. Man könnte einen Zusammenhang mit der Elementwirksamkeit vermuten, jedoch läßt sich dieser nicht nachweisen. Auch die R'_u -Werte zeigen für die einzelnen Gruppen nicht verständliche Unterschiede. Ein Zusammenhang mit R_M (Bodenwiderstand) und den Elementströmen (Anionenüberführung) besteht nicht. Die R'_p -Werte sind nicht aufgeführt, da hier in der zweiten Versuchshälfte meist irrealer Werte ermittelt wurden. Es ist anzunehmen, daß die Abweichungen lediglich auf eine starke Streuung zurückzuführen sind.

Tabelle 4. Zeitliche Mittelwerte und Streuung (Standardabweichung/Mittelwert in %) der Widerstände

Table 4. Mean values over time and the scatter (standard deviation/mean values in %) of the resistances

Nr.	R_u Ω	$\pm \sigma/\bar{x}$ %	R_p Ω	$\pm \sigma/\bar{x}$ %	R'_u Ω	$\pm \sigma/\bar{x}$ %	R_M Ω	$\pm \sigma/\bar{x}$ %
1	22	115	25	37	28	71	376	65
2	13	131	32	43	20	49	518	105
3	19	11	10	19	35	103	779	114
4	17	49	34	38	26	50	756	76
5	12	52	47	37	40	12	240	92
6	12	54	71	31	44	98	179	26
7	41	22	53	27	21	42	346	110
8	40	49	65	32	75	127	237	91

3.4 Übersicht der Elementströme

In den Abb. 4a und b sind die Elementströme der Anoden Nr. 8 und in den Abb. 5a und b sind die Summen der Elementströme einer jeweiligen Kathode zusammengestellt. Die Summe der Elementströme und der Elementstrom der zugehörigen Anoden Nr. 8 einer jeweiligen Kathode sind weitgehend verhältnismäßig, wenn die zeitliche Abnahme der Anzahl der Anoden mitberücksichtigt wird.

Wesentliche Unterschiede in den Elementströmen sind auf die Verzinkung des Bewehrungsstahls zurückzuführen. Sonst zeigen die Kurven auffällige synchrone Schwankungen, die mit Witterungsverhältnissen zusammenhängen. Diese Schwankungen entsprechen der Zeitabhängigkeit der R_M -Werte, vgl. Abb. 3. Weiterhin fällt auf, daß die Elementströme im Laufe der Zeit ständig abnehmen.

4 Erörterung der Untersuchungsergebnisse

Die Ergebnisse der Abb. 1 zeigen, daß die Abtragungsraten zwischen 0,1 bis 0,3 mm/a liegen. Sie nehmen alle in den ersten zwei Jahren etwas ab. Diese Werte informieren aber nicht über örtliche Eindringraten bis zu 1 mm/a, welche hier nicht weiter untersucht sind.

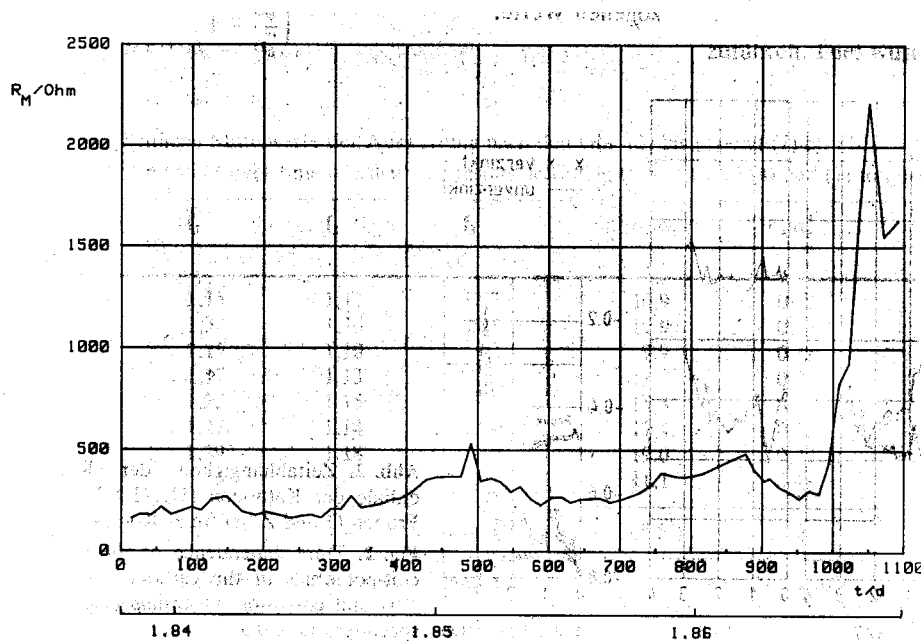


Abb. 3. Zeitabhängigkeit des Mediumwiderstandes R_M zwischen Kathode 2 und zugehöriger Anode Nr. 8

Fig. 3. Time dependence of the electrolyte resistance R_M between cathode No. 2 and corresponding anode No. 8

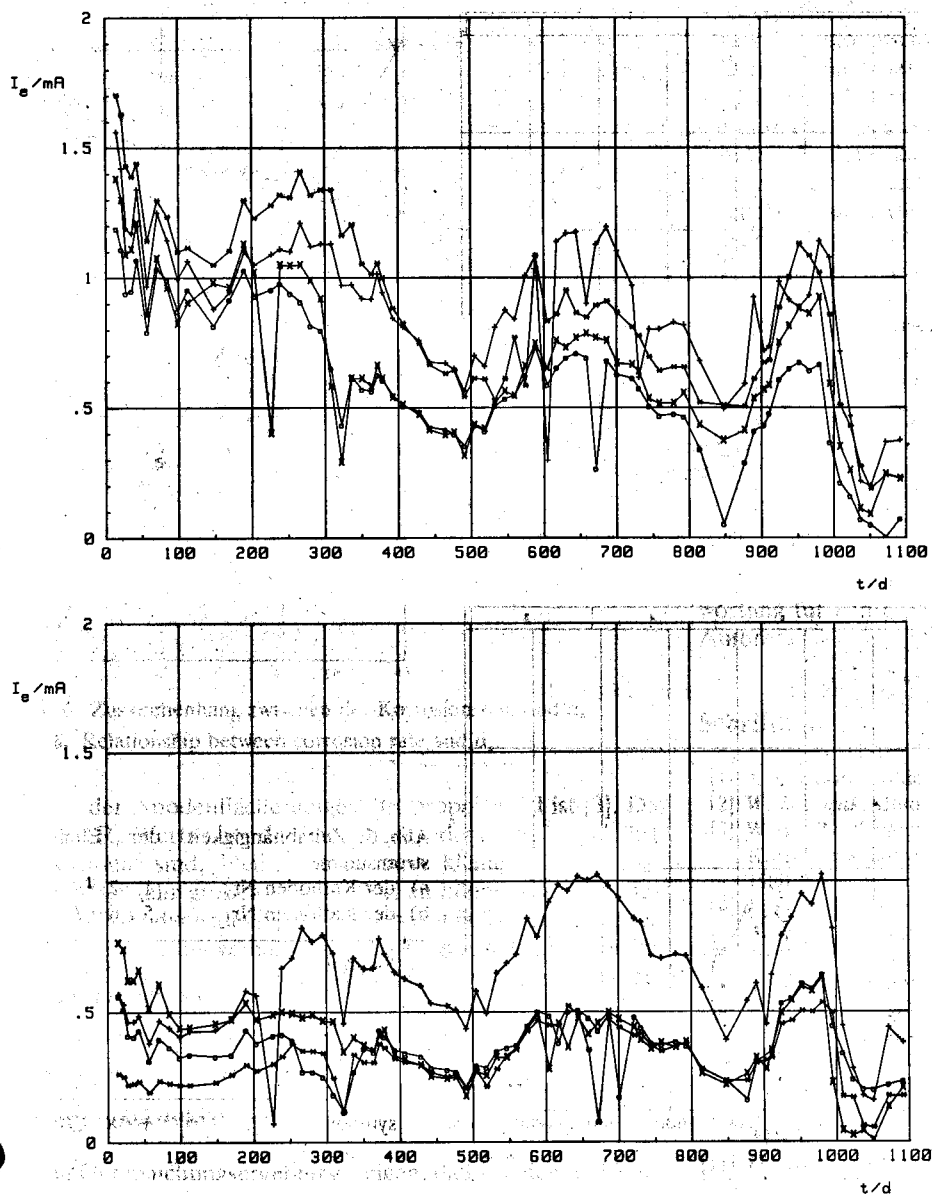


Abb. 4. Zeitabhängigkeit des Elementstromes der Anode Nr. 8

a) mit Kathoden Nr. 1 2 3 4
b) mit Kathoden Nr. 5 6 7 8

Symbol + × ○ □

Fig. 4. Time dependence of cell current of anode No. 8

a) coupled to cathode No. 1 2 3 4
b) coupled to cathode No. 5 6 7 8

symbol + × ○ □

Zur Beurteilung der Versuchsparemeter wurden Verhältnisse der Massenverluste gebildet, deren zeitliche Streubereiche in der Tabelle 5 zusammengestellt sind. Zusätzlich ist der Mittelwert der jeweils vier Paare und die Streuung angegeben, die sich bei allen Paarungen als gleich groß erwies.

Der Einfluß einer Feuerverzinkung des Bewehrungsstahls ist deutlich zu erkennen. Er beträgt aber im Mittel nur einen Faktor 2 und nimmt mit der Zeit schwach ab. Weiterhin hat die Betonart einen Einfluß. Die Wirkung der Verzinkung ist bei porösem PZ (6/2) am größten und beim HOZ allgemein am geringsten.

Tabelle 5. Verhältnisse der Massenverluste.

Table 5. Ratios of weight losses.

Stahl verzinkt/unverzinkt Elemente	Streubereich	PZ/HOZ Elemente	Streubereich	W/Z-Wert 0,5/0,7 Elemente	Streubereich
5/1	0,41–0,59	1/3	1,1–2,0	1/2	0,8–1,0
6/2	0,20–0,34	2/4	1,2–1,4	3/4	0,8–1,1
7/3	0,39–0,74	5/7	1,0–1,8	5/6	1,3–1,7
8/4	0,50–0,72	6/8	0,5–0,7	7/8	0,7–0,8
Mittelwert	0,49		1,1		1,0
Streuung*	32%		34%		35%
geringfügige Zunahme mit der Zeit		geringfügige Zunahme mit der Zeit		keine Zeitabhängigkeit	

* Stand.-abw./Mittelwert.

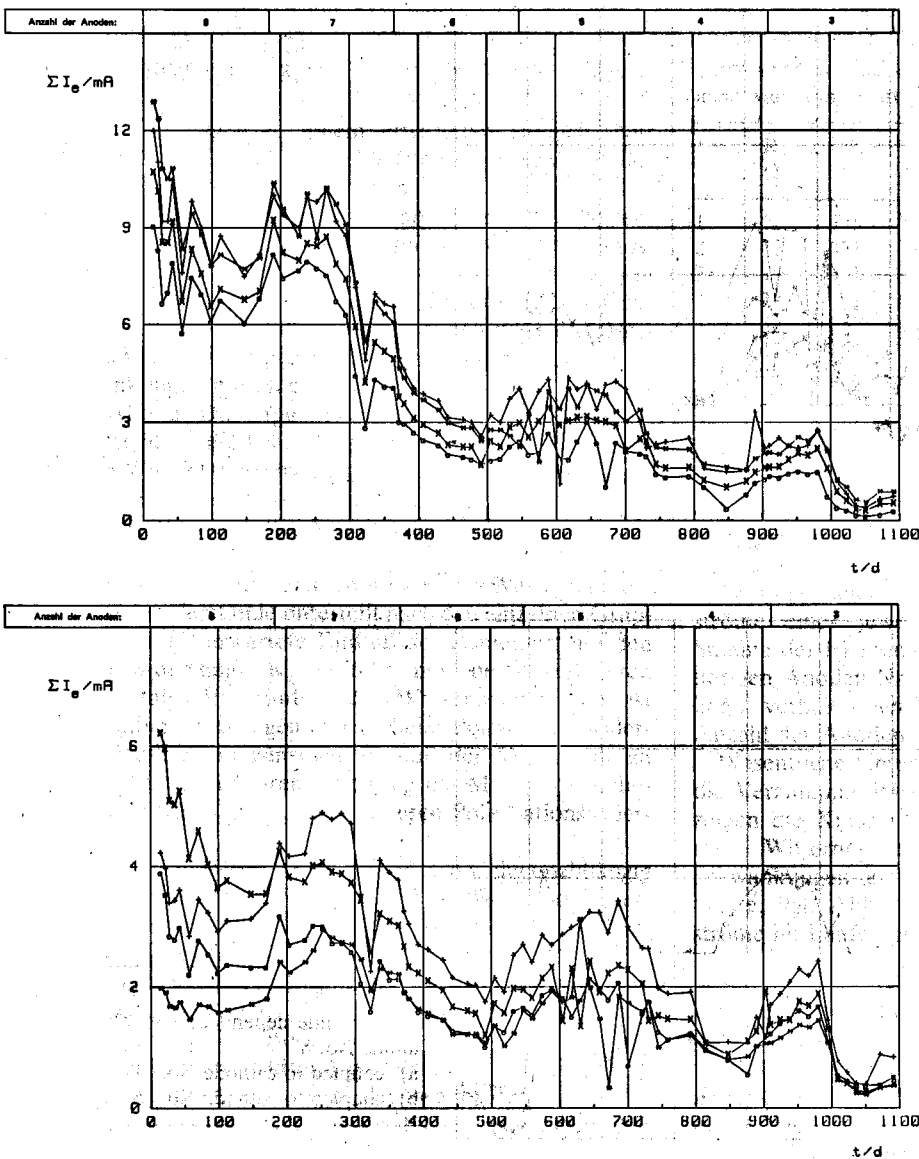


Abb. 5. Zeitabhängigkeit der Elementstromsumme

a) der Kathoden Nr.	1	2	3	4
b) der Kathoden Nr.	5	6	7	8

Symbol + × ○ □

Fig. 5. Time dependence of the sum total of the cell currents

a) of the cathodes No.	1	2	3	4
b) of the cathodes No.	5	6	7	8

symbol + × ○ □

Der Einfluß der Zementart ist unterschiedlich. Im allgemeinen ist HOZ günstiger als PZ, jedoch gibt es Ausnahmen (6/8). Auch beim Wasser-Zement-Wert ist kein eindeutiger Einfluß zu erkennen. Die größere Porosität ist beim unverzinkten Stahl schwach negativ und beim verzinkten Stahl nur beim PZ positiv zu bewerten.

Die Ergebnisse in Tabelle 2 besagen, daß in allen Fällen wegen $f_2 > 1$ formal ein „negativer Differenzeffekt“ vorliegt, der nach Gl. (7) durch $\alpha_a^0 > \alpha_a$ gedeutet wird, d.h. bei freier Korrosion wird durch Deckschichten die kathodische Teilreaktion stark gehemmt. Dies stimmt mit den sehr geringen m_a^0 -Werten in Abb. 1 bzw. mit den hohen Beträgen für f_3 überein.

Die α_a -Werte zeigen keine deutliche Zeitabhängigkeit. Sie sind aber bei den verschiedenen Elementgruppen nicht gleich, sondern korrelieren reziprok mit den f_3 -Werten. Dieser Zusammenhang ist noch deutlicher aus Abb. 6 zu erkennen, in dem alle ermittelten α_a -Werte reziprok zu den zugehörigen v_{int} -Werten aufgetragen sind. Demnach wird die Eigenkorrosion durch die Korrosionsrate im Element erhöht. Hierzu ist anzunehmen, daß eine Anionenüberführung durch den Elementstrom die Schutzwirkung der Deckschicht und somit die α -Werte vermindert, so daß die kathodische Teilreaktion

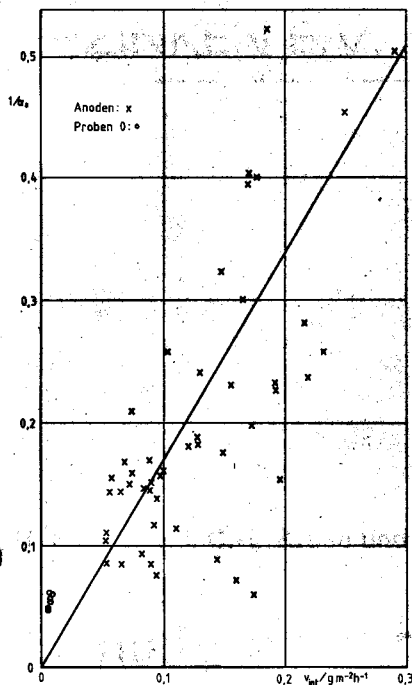
weniger stark als bei freier Korrosion gehemmt ist. Dies erklärt auch die f_2 -Werte.

Die α_k -Werte sind erwartungsgemäß wesentlich größer als selbst die α_a^0 -Werte. Dabei lassen sich noch deutlich die verzinkten von den unverzinkten Bewehrungsstählen unterscheiden. Insbesondere fällt aber hier eine Zeitabhängigkeit auf. Die Widerstände nehmen mit der Zeit zu, was dem Verhalten von R_p in Tabelle 3 entspricht.

Für die Zeitabhängigkeit der Elementwirkung, die am besten durch die Ströme in Abb. 4 verdeutlicht wird, sind mehrere Faktoren wirksam:

- die Elementspannung wird mit der Zeit etwas geringer,
- die Polarisationswiderstände der Kathoden (Tabelle 3) und die α_k -Werte (Tabelle 5) werden mit der Zeit größer,
- die Bodenwiderstände (Abb. 3) sind gekennzeichnet durch starke zeitliche Schwankungen.

Von diesen Einflußgrößen ist besonders die erste wirksam. Da der Bodenwiderstand ganz wesentlich den Elementwiderstand bestimmt, sind die zeitlichen und örtlichen Schwankungen in Abb. 4 verständlich. Der Bodenwiderstand zwischen Anode und Kathode entspricht im wesentlichen dem Ausbreitungswiderstand der kleinflächigen Anode, welcher der Wur-

Abb. 6. Zusammenhang zwischen der Korrosionsrate und α_a .Fig. 6. Relationship between corrosion rate and α_a .

zel aus der Anodenfläche umgekehrt proportional ist [3]. Da R'_a - und R'_p -Werte aber der linearen Anodenfläche umgekehrt proportional sind, bleiben diese stets kleiner als die R_M -Werte. Bei sehr großen Anodenflächen könnten somit lediglich die Kathodenwiderstände ins Gewicht fallen, dann ist aber wegen des Flächenverhältnisses die Elementwirkung verringert. Eine wesentliche Einflußnahme der Kathodenwiderstände ist allenfalls bei niederohmigen Böden zu erwarten, bei denen aber ohnehin die Elementwirkung immer sehr groß ist.

Schlußfolgerungen

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß von den drei Versuchsparametern die Feuerverzinkung des Bewehrungsstahls die größte Wirkung hat. Jedoch wird die Elementtätigkeit nur um etwa 50% vermindert. Weiter wird bestätigt, daß PZ im Vergleich zu HOZ und große W/Z-Werte im Vergleich zu kleinen bei unverzinktem Bewehrungsstahl ungünstig sind. Im Laufe der Zeit wird die Elementwirkung zwar etwas verlangsamt. Nach zwei Jahren deutet sich jedoch ein nahezu stationäres Verhalten an. Somit kann die Elementwirkung mit stahl-armiertem Beton als Kathode durch die untersuchten Parameter nicht ausreichend bekämpft werden. Diese Ergebnisse stimmen mit jüngeren Langzeit-Laboratoriumsversuchen [13] überein.

Als Schutzmaßnahmen gegen Elementbildung mit Fremdkathoden kommen nach den Korrosionsschutznormen [8–10] in Betracht:

- elektrische Trennung mit Isolierstücken,
 - Lokaler kathodischer Korrosionsschutz.
- Diese Maßnahmen sind sehr aufwendig und bedürfen auch der ständigen Überwachung, die sicherlich bei kleinen Objekten in der Praxis kaum durchführbar sein dürfte. Als weitere Schutzmaßnahme kann eine Erhöhung der Kathodenwiderstände mit organischen Beschichtungen, z.B. mit Epoxidharz, versucht werden. Derartige Maßnahmen sind aber noch nicht erprobt und auch nicht untersucht.

Die in Abb. 1 gezeigten Korrosionsabträge können nicht direkt auf praktische Gegebenheiten übertragen werden. Die Potentialmessungen zeigten bei den Flächenverhältnissen um 50 bis 100 eine Polarisation der Kathoden um durchschnittlich 0,1 V. Bei größeren Flächenverhältnissen ist mit einer wesentlich geringeren Kathodenpolarisation zu rechnen, so daß dann die Abtragungsraten durchaus in der Größenordnung von 1 mm/a liegen können.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (Förderungskennzeichen 03S511 0) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Schrifttum

- [1] 3. Korrosionum der AGK, 3R-International 18 (1979) Heft 8/9.
- [2] W. Schwenk: Beton + Fertigteil – Technik 51 (1985) 216–223.
- [3] W. v. Baeckmann, W. Schwenk: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes, 2. Auflage, Verlag Chemie, Weinheim 1980.
- [4] J. Pohl: Diskussionsbemerkung in „Korrosion 19, Elementbildung und Korrosion“, Verlag Chemie, Weinheim 1967, S. 150.
- [5] DVGW-Arbeitsblatt G 600 (TRGI) ZfGW-Verlag, Frankfurt, 1972 und 1986.
- [6] W. Schwenk: gwf gas/erdgas 113 (1972) 546–550.
- [7] F. Schwarzbauer: 3R-intern. 25 (1986) 272–274.
- [8] DIN 30 675 Teil 1 (1985).
- [9] DIN 50 929 Teil 3 (1985).
- [10] W. Schwenk: gwf gas/erdgas 123 (1982) 157–168; 127 (1986) 304–314.
- [11] H. Arup: Mat. Perform. 18 (1979), H. 4, S. 41–44.
- [12] H.-J. Abel, C.-L. Kruse: Werkst. Korros. 33 (1982) 89–93.
- [13] H. Hildebrand, W. Schwenk: Werkst. Korros. 37 (1986) 163–169.
- [14] H. Hildebrand, M. Schulze: 3R-intern. 25 (1986) 242–245.
- [15] GAV-Vortrags- und Diskussionsveranstaltung 1982, Gemeinschaftsausschuß Verzinken, Düsseldorf 1982.
- [16] H. Hildebrand, M. Schulze, W. Schwenk: Werkst. Korros. 34 (1983) 281–286.
- [17] H. Hildebrand, W. Schwenk: Werkst. Korros. 29 (1978) 92–97.
- [18] W. Schwenk: Metalloberfläche 35 (1981) 158–163.
- [19] U. R. Evans: Korrosion, Passivität und Oberflächenschutz von Metallen, übersetzt von E. Pietsch, Springer Verlag, Berlin 1939, S. 286.
- [20] E. Hargarter: Unveröffentlichte Untersuchungsergebnisse (FE-KKs Proj.-Nr. H 7. 9/1), 1986.

(Eingegangen: 3. 2. 1987)

W2486