

● Prof. Dr. Wilhelm Schwenk, Duisburg

Beurteilung der Korrosionsschutzwirkung einer Feuerverzinkung für Bewehrungsstahl in Beton

- Zusammenfassende Darstellung der FuE-Ergebnisse

Institut für angewandtes Feuerverzinken GmbH /
Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V.

● Bericht Nr. 134
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V.

Beurteilung der Korrosionsschutzwirkung einer Feuerverzinkung für Bewehrungsstahl in Beton

- Zusammenfassende Darstellung der FuE-Ergebnisse

Prof. Dr. Wilhelm Schwenk, Duisburg

Zusammenfassung

Seit über 30 Jahren wird mit Hinweis auf ausländische Anwendungen die Frage über den Korrosionsschutz von Betonstahl durch Feuerverzinken erörtert. Bedenken hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit des Zinks im alkalischen Beton-Porenwasser und der technologischen Eigenschaften, z. B. des Verbundes, sowie Fragen der Zulassung gehören der Vergangenheit an. In vielen Publikationen wurde über die Schutzwirkung der Feuerverzinkung berichtet. Dennoch blieb die erwünschte Akzeptanz am Markt aus. In dem vorliegenden Bericht soll versucht werden, an Hand der theoretischen Kenntnisse und mit Hilfe des vorliegenden Schrifttums darzulegen, welche Vorteile der Korrosionsschutz durch Feuerverzinken wirklich bringt und glaubhaft an den Kunden herangebracht werden kann. Dabei sind auch die Fragen zu Alternativen eingeschlossen, von denen sich seit etwa 15 Jahren die Epoxidharzbeschichtung am besten bewährt hat.

In einem theoretischen ersten Teil wird das elektrochemische Verhalten des Systems Stahl / Zementmörtel an Hand von Laboratoriumsversuchen dargestellt um aufzuzeigen, welche Einflußgrößen das Potential bestimmen und welche praktische Bedeutung der Unterscheidung zwischen freier Korrosion und der Elementbildung zukommt. Hierbei kann eine Korrosionsgefährdung sowohl am Bewehrungsstahl selbst als auch an fremden Objekten erfolgen.

Von der Feuerverzinkung hatte man sich eine zweifache Schutzwirkung versprochen - nämlich einen direkten Schutz der Bewehrung (im Falle einer möglichen freien Korrosion nach Depassivierung durch Carbonatisieren oder durch Chlorideinwirkung) und einen indirekten Schutz gegen Elementbildung durch Beeinflussen der Potentialeinstellung. Aufgrund von verhältnismäßig kurzzeitigen Laboratoriumsuntersuchungen waren beide Effekte auch nachgewiesen.

An Hand der Ergebnisse von mehr modellartigen Laboratoriumsuntersuchungen und deren theoretische Interpretation wurden Fragen formuliert, die in einem zweiten Teil an Hand der Schrifttumsangaben über Laboratoriums- und Technikumsuntersuchungen beantwortet werden sollten. Diese Durchsicht kann wie folgt zusammengefaßt werden:

- Langzeitige Potentialmessungen haben gezeigt, daß eine Beeinflussung des Potentials durch Feuerverzinken mit der Zeit abnimmt und daß verzinkter Bewehrungsstahl auch zur Kathode werden kann. Eine Elementbildung wird somit nicht oder nicht sicher bekämpft.
- In einem bauteilähnlichen Versuch wurde gezeigt, daß feuerverzinkter Stahl in gleicher Weise wie unverzinkter Bewehrungsstahl die Kathode in einem Element darstellt. Die Elementströme mit Stahl-Anoden im Tonboden unterscheiden sich nur unwesentlich.
- Eine Depassivierung des Bewehrungsstahls kann durch Carbonatisieren und durch Chloride erfolgen. Diese beiden Arten unterscheiden sich wesentlich.
- Die Feuerverzinkung gibt gegen freie Korrosion nach Carbonatisierung einen langzeitigen Schutz. Über die Schutzwirkung im Korrosions-element mit nicht depassiviertem Bewehrungsstahl als Kathode in einem Stahlbetonbau liegen keine ausreichenden Kenntnisse vor.
- Die Feuerverzinkung gibt gegen freie Korrosion nach Depassivierung durch Chloride nur einen zeitweisen Schutz, der aber einige Jahre anhalten kann. Dabei ist es gleichgültig, ob die Chloride von Beginn an im Beton vorlagen oder später zugetreten sind. Über eine zusätzliche Korrosionsförderung durch Kathoden im Stahlbetonbau liegen zwar keine Kenntnisse vor. Es ist aber aufgrund der erhöhten Leitfähigkeit durch Chloride mit merkbarer Elementwirkung zu rechnen.

- Ein vertretbarer Einsatz der Feuerverzinkung ist für einen Korrosionsschutz in Sonderfällen gegeben. Dazu zählen:
- feuerverzinkte Bewehrung bei bewehrtem Mauerwerk,
- feuerverzinkte Bewehrung bei Leichtbetonen mit Ausnahme Gasbeton und mit Ausnahme einer Chlorideinwirkung,
- Prophylaxe gegen Korrosion bei zu erwartender Carbonatisierung, z. B. bei geringer Betondeckung und bei Rissen im Beton.
- Eine Prophylaxe gegen Korrosion bei Chlorideinwirkung ist nicht zweckmäßig, weil keine dauerhafte Schutzwirkung zu erwarten ist.
- Als Alternative zur Feuerverzinkung kommt nur eine geeignete Beschichtung mit ausreichender Alkali- und Alterungsbeständigkeit in Frage. Dabei ist der elektrische Beschichtungswiderstand und weniger die Verletzungsfreiheit für die Schutzwirkung wichtig. Als Ausnahme ist die Schutzwirkung an Rissen im Beton zu sehen, wo im Falle durchgehender Risse die Beschichtung natürlich keinen Schutz geben kann. Inhibitoren scheiden als Alternativen aus.

	9-15
	9
Potential	10
	10
	11
	12
	12
ungestahl	13
19	13
19	13
0	14
	15-16
	15
	16
	18-19

Inhaltsverzeichnis

Beurteilung der Korrosionsschutzwirkung einer Feuerverzinkung für Bewehrungsstahl in Beton

	Seite
Deckblatt	I
Zusammenfassung	II-III
Inhalt	IV
1 Einleitung	1
Teil 1	
2 Korrosionstechnische Grundlagen	1-9
2.1 Das korrosionschemische Verhalten der elektrochemischen Halbzelle Stahl/Beton	1
2.2 Die korrosionschemischen Grundlagen bei Elementbildung	3
2.3 Beurteilung korrosionsgefährdeter Bereiche	5
2.3.1 Gefährdung des Bewehrungsstahls bei freier Korrosion	5
2.3.2 Gefährdung des Bewehrungsstahls bei Elementbildung	6
2.3.2.1 Schutzwirkung durch Feuerverzinkung	6
2.3.2.2 Schutzwirkung durch Beschichtung	8
2.3.2.3 Schutzwirkung durch Inhibitoren	8
2.3.2.4 Kathodischer Schutz	8
2.3.3 Gefährdung von Fremdobjekten	8
2.3.4 Gefährdung durch fremde Einflüsse und Maßnahmen	9
Teil 2	
3 Auswertung des Schrifttums	9-15
3.1 Allgemeine Hinweise und Ziele der Auswertung	9
3.2 Langzeitverhalten zum Korrosionsschutz und zum Potential	10
3.2.1 Untersuchungen in Salzwässern	10
3.2.2 Untersuchungen in Erdböden	11
3.2.3 Untersuchungen an Bauteilen	12
3.2.4 Temperatureinfluß	12
3.3 Einsatz von feuerverzinktem Bewehrungsstahl in Sonderfällen	13
3.3.1 Schutzwirkung bei Chloridbelastung	13
3.3.2 Schutzwirkung bei Carbonatisierung	13
3.3.3 Schutzwirkung bei Rissen im Beton	14
4 Erörterung der Auswertungen	15-16
4.1 Schutz der Stahlbeton-Konstruktion	15
4.2 Schutz fremder Objekte	16
Schrifttum	16-18

1 Einleitung

Seit mehr als 30 Jahren wird die Frage erörtert, ob die Feuerverzinkung der Bewehrung von Betonstahlbauten in der Lage ist, einen wesentlichen Beitrag zu Fragen des Korrosionsschutzes zu geben. Anfängliche Befürchtungen über technologische Nachteile, z. B. des Verbund- und Ausziehverhaltens konnten ausgeräumt werden und sind nicht Gegenstand dieses Berichtes. Feuerverzinkter Betonstahl ist zugelassen [43]. Offene Fragen bestehen aber hinsichtlich des Nachweises, ob die Feuerverzinkung aus allgemeinen Gründen des Korrosionsschutzes erforderlich und auch langfristig wirksam ist. Diese Frage soll an Hand der vorliegenden theoretischen Kenntnisse zum Korrosionsverhalten von Bewehrungsstahl in Beton behandelt werden. Hierzu wurden vom GAV die Schrifttumstellen [1-31,42,43] zur Verfügung gestellt. Die Stellen [32-41] sind weitere Hinweise nach Kenntnissen des Unterzeichners.

Zur Aufgabenstellung ist anzumerken, daß der Korrosionsschutz des Bewehrungsstahls folgende Korrosionsgefahren abdecken muß.

- Korrosion des Bewehrungsstahls selbst an neutralen Stellen innerhalb von Stahlbeton-Bauten,
- Korrosion von Fremdoobjekten, die bei metallleitender Verbindung mit dem Bewehrungsstahl gefährdet werden.

Bereits diese beiden Definitionen von Gefahrenpunkten veranschaulichen, daß die Fragen zum feuerverzinkten Bewehrungsstahl ohne eindeutige Beschreibung der korrosionstechnischen Grundlagen zu Mißverständnissen führen müssen. Aus diesem Grunde werden in diesem Bericht zunächst in einem ersten Teil die korrosionstechnischen Grundlagen und die Anforderungen an den Korrosionsschutz beschrieben.

In einem zweiten Teil dieses Berichtes werden die o. g. Schrifttum-Stellen ausgewertet, um die Fragen des ersten Teils zu beantworten.

2 Teil 1 Korrosionstechnische Grundlagen

2.1 Das korrosionschemische Verhalten der elektrochemischen Halbzelle Stahl/Beton

Lösungen der Probleme zum Korrosionsverhalten von Stahl in Beton oder Zementmörtel und damit auch das notwendige Verständnis zur Korrosionsgefährdung und zu besonderen Schutzmaßnahmen

können nur erreicht werden, wenn die Folgerungen aus dem Verhalten der Halbzelle Stahl/Porenwasser ausreichend durchdacht sind [37,38]. Bedingungsgemäß liegt der Stahl im intakten Mörtel im passiven Zustand vor. Dieser Zustand kann flächig oder örtlich aufgehoben sein, dabei wird der depassivierte Zustand auch als der aktive Zustand bezeichnet:

- flächige Aktivierung durch Carbonatisieren [2,26,32,37],
- flächige Aktivierung durch zu hohe Chloridgehalte im Mörtel [1,26, 32,35,37,40]
- örtliche Aktivierung an Rissen im Beton [19,24,26,29,34]
- örtliche Aktivierung bei örtlichem Zutritt von Chloridionen [6,21]

Die Korrosion von Metallen in Elektrolytlösungen besteht immer aus zwei elektrochemischen Teilreaktionen:

- 1) anodische Teilreaktion der Metallauflösung,
- 2) kathodische Teilreaktion der Reduktion einer Mediumkomponente (im allgemeinen Sauerstoff).

Im aktiven und im passiven Zustand unterscheiden sich die anodischen Teilstromdichte-Potential-Kurven ganz wesentlich. Weiterhin kann auch der Zementmörtel oder der Beton sich hinsichtlich der Belüftung oder Porigkeit sehr unterscheiden, was den Verlauf der kathodischen Teilstrom-Potential-Kurven bestimmt. In Bild 1 sind diese Teilstrom-Potential-Kurven dargestellt, wobei jeweils paarweise eine anodische und eine kathodische Teilreaktion zu betrachten sind.

Die Koordinaten des Schnittpunktes der beiden Kurven kennzeichnen das Ruhepotential und den Korrosionsstrom.

Aus der schematischen Darstellung in Bild 1 mit einer Darstellung der Teilströme für die anodische Eisenauflösung und für die kathodische Sauerstoffreduktion ergeben sich insgesamt vier Fälle:

1. Passiver Stahl (Kurve 1) und belüfteter Beton (Kurve 3) mit dem Ruhepotential (Schnittpunkt A)
2. Passiver Stahl (Kurve 1) und unbelüfteter Beton (Kurve 4) mit dem Ruhepotential (Schnittpunkt B)

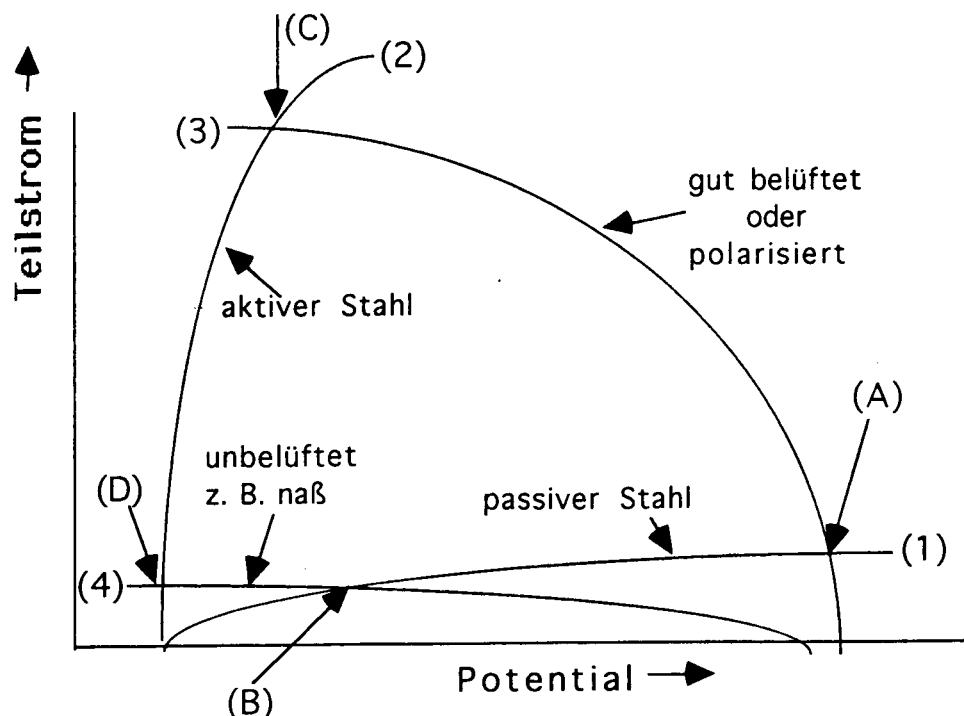


Bild 1: Schematische Darstellung der Teilstrom-Potential-Kurven und der Potentiale von Stahl in Beton

Teilstrom-Potential-Kurven

- | | |
|---|--|
| (1) anodische Teilstrom-Potential-Kurve des passiven Stahls | (D) Ruhepotential des aktiven Stahls im unbelüfteten Beton |
| (2) anodische Teilstrom-Potential-Kurve des aktiven Stahls | |
| (3) kathodische Teilstrom-Potential-Kurve für belüfteten Beton (auch anodische Polarisation bei unbelüfteten Beton) | 3. Aktiver Stahl (Kurve 2) und belüfteter Beton (Kurve 3) mit dem Ruhepotential (Schnittpunkt C) |
| (4) kathodische Teilstrom-Potential-Kurve für unbelüfteten Beton | 4. Aktiver Stahl (Kurve 2) und unbelüfteter Beton (Kurve 4) mit dem Ruhepotential (Schnittpunkt D) |

Potentiale

- (A) Ruhepotential des passiven Stahls im belüfteten Beton (auch Polarisationspotential bei anodischer Polarisation im unbelüfteten Beton)
- (B) Ruhepotential des passiven Stahls im unbelüfteten Beton
- (C) Ruhepotential des aktiven Stahls im belüfteten Beton (auch Polarisationspotential bei anodischer Polarisation im unbelüfteten Beton)

Unbelüfteter Beton liegt immer bei Wassersättigung vor [39,40]. Die kathodische Teilstrom-Potential-Kurve für Belüftung (Kurve 3) kann auch als eine (nicht potentiostatische) Strom-Potential-Kurve bei anodischer Polarisation durch eine fremde Stromquelle angesehen werden. Dann folgen aus dem Bild 1 die Aussagen:

Es liegen verhältnismäßig negative (unedle) Potentiale vor in den Fällen:

- a) aktiver Stahl, nahezu unabhängig von der Belüftung;
- b) unbelüfteter Beton, nahezu unabhängig vom Zustand des Stahls.
Es liegt nur in einem Fall ein verhältnismäßig positives (edles) Potential vor:
- c) passiver Stahl und belüfteter Beton.

Bei dem Fall c) handelt es sich um den Normalfall.

Die in Bild 1 wiedergegebenen Teilströme beziehen sich alle auf dieselbe Elektrodenfläche, d. h. Ströme sind durch Stromdichten ersetzbar. Dann informieren die anodischen Teilstromdichten unmittelbar über das relative Korrosionsverhalten des Stahls.

Es ist zu erkennen, daß mit einer nennenswerten Korrosionsgeschwindigkeit nur in einem einzigen Fall zu rechnen ist, nämlich bei aktivem Stahl in belüftetem Beton. Der aktive Zustand macht sich in ungelüftetem Beton nicht bemerkbar. Diese Aussage hat unmittelbar praktische Bedeutung für die Entwicklung von in-situ Prüfverfahren zum Detektieren korrosionsgefährdeter Bereiche des Bewehrungsstahls. Nach den Darlegungen in Bild 1 besagt ein positives Ruhepotential (A), daß sicherlich keine Korrosionsgefährdung besteht. In den USA hat man aber im Umkehrschluß und im Hinblick nur auf den Fall mit dem negativen Ruhepotential (C) eine Regel (ASTM C 876) aufgestellt, daß bei derartig negativen Ruhepotentialen eine Korrosionsgefährdung bestehen soll. Diese Beurteilung ist aber wegen der nicht bestehenden Korrosionsgefährdung in den Fällen mit den negativen Ruhepotentialen (B) und (D) irrig [37]. Man kann anmerken, daß der aktive Stahl seine Korrosionsanfälligkeit allgemein durch negative Ruhepotentiale anzeigt (C und D). Aber die Beurteilung des Stahlzustandes in unbelüfteten Beton (mit den negativen Ruhepotentialen B und D) ist grundsätzlich so nicht möglich.

Aufgrund der Kenntnisse aus anderen Bereichen der Korrosionstechnik (siehe auch DIN 50919) wurde im FE-KKs eine Methode entwickelt, aktive und passive Bereiche unabhängig von der Belüftung

des Betons eindeutig zu unterscheiden [33]. Hierbei wird die Teilstrom-Potential-Kurve (3) in Bild 1 durch (möglichst galvanostatische) anodische Polarisation ersetzt, wobei der passive Stahl das Potential (A) annimmt, während der aktive Stahl ein verhältnismäßig negatives Potential (C) behält. Diese Methode ist also in der Lage, zwischen aktivem und passivem Stahl eindeutig zu unterscheiden. Inzwischen wurde das Prüfverfahren so weiterentwickelt, daß Beurteilungsprofile in Flächenkoordinaten erstellt werden können.

Der positive Befund zur Korrosionsbeständigkeit des aktiven Stahls in nichtbelüftetem Beton hat seine praktische Bedeutung für marine Objekte und für Zementmörtel-Auskleidungen von Salzwasserleitungen [40]. In Wasser sind die Poren im Beton oder Mörtel gequollen und verhältnismäßig dicht, so daß Sauerstoff praktisch nicht zum Stahl Zutreten kann [39,40] - Hinweise hierzu finden sich bereits in [1].

2.2 Die korrosionschemischen Grundlagen bei Elementbildung

Nach den Angaben im vorstehenden Abschnitt zu Bild 1 besteht nur für den aktiven Stahl im belüfteten Beton eine Korrosionsgefährdung, wobei die Korrosionsgeschwindigkeit sich nach der Steilheit der Kurve (3) richtet, die der Geschwindigkeit des Sauerstoffzutritts entspricht. Entsprechend hat man auch Vorstellungen zum Korrosionsschutz entwickelt, den Sauerstoffzutritt zu hemmen [32].

Derartige Maßnahmen können aber vom Grundsatz her nicht sehr erfolgreich sein, wenn im Bauteil aktive und passive Bereiche benachbart vorliegen. Man muß nämlich von der Vorstellung ausgehen, daß die Aktivierung zunächst nur einzelne Flächenbereiche befällt und nicht sofort den gesamten Bewehrungsstahl eines Bauteils. Details sind hierzu in [37] beschrieben.

Die Problematik der Korrosion beliebiger Bauteil-Komponenten, die mit Bewehrungsstahl verbunden sind, liegt in der Elementbildung, wobei der korrosionsanfällige Partner sowohl eine fremde Komponente als auch Bestandteil der betrachteten Bewehrung sein kann.

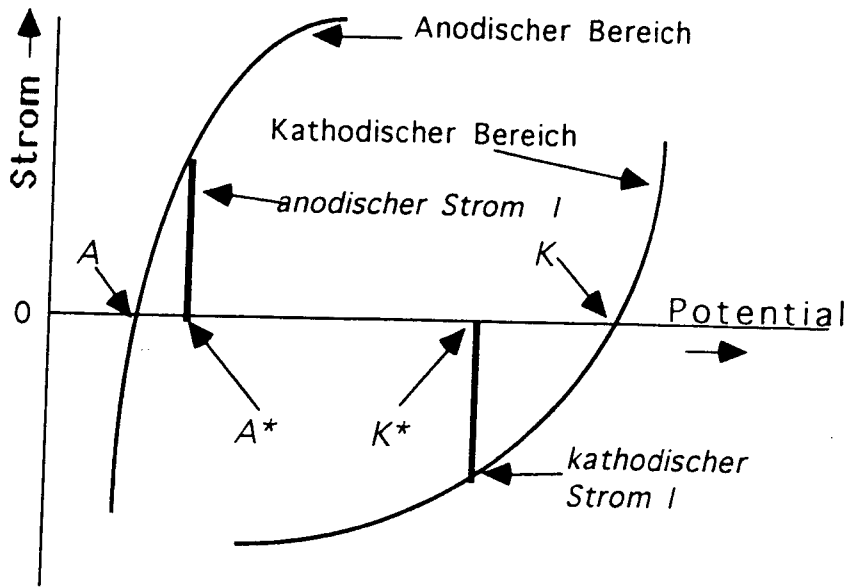


Bild 2: Schematische Darstellung der Strom-Potential-Kurven aktiver und passiver Bereiche bei Elementbildung

Bereich	anodischer	kathodischer
Ruhepotential	A	K
Potential im Element	A*	K*

Es bedeuten: Leerlaufspannung $U_0 = K - A$, Elementstrom I , Medium-widerstand W , Ohmscher Spannungsabfall im Element: $IW = K^* - A^*$. Mit den Polarisationswiderständen R_A und R_K folgt aus Bild 2:

$$I = \frac{U_0}{W + R_A + R_K}; \quad (1)$$

Einsetzen von $W = \frac{\rho L}{S_K}$ (dabei ist L eine effektive Stromlinien-Länge bei einem Leitungsquerschnitt S_K), der Flächen S_A und S_K sowie $S_K/S_A = V$ für Anode und Kathode und Einführen der spezifischen Polarisationswiderstände $r_A = R_A S_A$ sowie $r_K = R_K S_K$ in Gl. (1)

führt letztlich zu:

$$J = \frac{I}{S_A} = \frac{U_0 V}{\rho L + r_K + r_A V}. \quad (2)$$

Die elektrochemischen Grundlagen der Elementbildung folgen aus Bild 2 mit den Strom-Potential-Kurven der aktiven und passiven Bereiche sowie der Gl. (2). Die hier eingeführten Polarisationswiderstände ergeben sich aus der Neigung der Strom-Potential-Kurve ($R = \Delta U / \Delta I$). Die auf die Stromdichte bezogenen spezifischen Werte (r_A und r_K) folgen nach Multiplikation mit der zugehörigen Fläche. Im Element fließt der Strom I , wobei sich die Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode verringert und nur vom Ohmschen Widerstand des Betons W abhängt. Hierbei ist ρ der spezifische elektrische Widerstand des Betons und L ist eine effektive Stromlinien-Länge. Beide Daten sind in der Praxis im allgemeinen nicht bekannt und sicherlich auch zeitlich veränderlich, so daß quantitative Ableitungen nicht möglich sind.

Wegen der rechnerischen Details zur Korrosion durch Elementbildung wird weiter auf DIN 50919 verwiesen. Im folgenden wird die sogenannte Eigenkorrosion vernachlässigt und als korrosionsrelevante Größe nur die anodische Elementstromdichte betrachtet, die in der Gl. (2) angegeben ist. Aus dieser Gleichung lassen sich zwei Grenzfälle ableiten:

anodischer Bereich ist wenig gehemmt, d. h. r_A ist sehr klein, aus Gl. (2) folgt:

$$J = \frac{I}{S_A} = \frac{U_0 V}{\rho L + r_K}; \quad (2a)$$

anodischer Bereich ist stark gehemmt, d. h. r_A ist sehr groß, aus Gl. (2) folgt:

$$J = \frac{I}{S_A} = \frac{U_0}{r_A}. \quad (2b)$$

Die Gl. (2a) ist als Flächenregel bekannt, weil die Korrosionsgeschwindigkeit mit dem Flächenverhältnis V zunimmt. Sie besagt, daß der aktive Bereich um so mehr gefährdet ist, je größer ausge dehnte passive Bereiche in der Umgebung (mit leitfähigem Beton) vorliegen. So folgt aus Gl. (2a) eine Korrosionsbeständigkeit für die Fälle:

- a) trockener Beton ohne Leitfähigkeit,
d. h. $\rho \rightarrow \infty$
- b) isolierende Beschichtung (der Kathoden),
d. h. $r_K \rightarrow \infty$

Die Gl. (2b) besagt, daß im Falle eines wenig korrosionsanfälligen anodischen Bereiches, z. B. durch Zugabe von Inhibitoren oder Deckschichtbildnern, die Flächenregel nicht zutrifft. Die Korrosionsanfälligkeit wird in diesem Fall allein durch die Elementspannung und durch den großen anodischen Polarisationswiderstand bestimmt.

2.3 Beurteilung korrosionsgefährdeter Bereiche

2.3.1 Gefährdung des Bewehrungsstahls bei freier Korrosion

Unter freier Korrosion versteht man Korrosion beim Ruhepotential und ohne Elementbildung. Unter solchen Bedingungen werden im allgemeinen Laboratoriumsuntersuchungen [2] durchgeführt, wobei

allein aus geometrischen Gründen die Elementbildung nicht erfaßt wird - es sei denn, man sehe bei dem Versuch gezielt eine Elementkonstruktion vor [37].

Eine Korrosionsgefährdung besteht nach den Angaben zu Bild 1 nur bei depassiviertem Stahl durch Carbonatisieren oder durch Chloride. Als Schutzmaßnahmen kommen in Frage:

- 1) Feuerverzinkung
- 2) organische Beschichtung
- 3) Inhibitoren.

Die Feuerverzinkung bringt immer Vorteile [26], weil sie vor allem auch den örtlichen Korrosionsangriff durch Chloride vermeidet [1,21]. Letztlich handelt es sich um eine kathodische Schutzwirkung, wobei man sich an Hand von Bild 1 vorstellen kann, daß die Kurve (2) für die Auflösung des Zinks steht.

Auch eine organische Beschichtung sollte immer vorteilhaft sein, sofern sie mit dem alkalischen Porenwasser im Beton verträglich ist. (Daß dieses offensichtlich nicht immer der Fall ist [29] und auch geprüft werden muß, bleibt hier nur festzustellen, siehe auch S. 96-97 in [26]. Gegen die in USA eingeführten Epoxidharzbeschichtungen auf Betonstahl können keine korrosionstechnischen Einwände vorgebracht werden.)

Auch der Zusatz von Inhibitoren kann bei freier Korrosion nur vorteilhaft sein, wenn die Konzentration ausreichend groß ist. Dennoch ist der Einsatz von Inhibitoren fragwürdig, weil bei einer im Laufe der Zeit unvermeidbaren, örtlich unterschiedlichen Inhibitionswirkung die Gefahr einer Elementbildung besteht. Die Inhibition bewirkt nach Bild 1 den Übergang der Kurve (2) in Richtung zur Kurve (1). Es handelt sich hierbei um die Wirkung von anodischen Inhibitoren, zu denen auch die in der Praxis vorgestellten Nitrate zählen. Ohne diesen Nachteil wirken kathodische Inhibitoren, die die Kurve (3) in Richtung zur Kurve (4) verschieben. Derartige Inhibitoren konnten aber nicht gefunden werden oder erwiesen sich als zu wenig wirksam [32]. Sie wären ideal, weil bei abnehmender Konzentration keine Gefahr der Elementbildung besteht.

Die Ausführungen in diesem Abschnitt zur freien Korrosion können als Kommentar zu den meisten Untersuchungen im Schrifttum angegeben werden und sind im Grunde genommen für die Praxis wenig interessant aus den folgenden Gründen:

Alle Untersuchungen zeigen einen positiven Effekt der Korrosionsschutzmaßnahmen nur beim depassivierten Bewehrungsstahl an, der bestimmungsgemäß nicht vorliegen soll.

Im Falle eines depassivierten Bewehrungsstahls haben die Einflußgrößen der Elementbildung eine wesentlich größere Bedeutung, die durch Gl. (2a) wiedergegeben wird.

2.3.2 Gefährdung des Bewehrungsstahls bei Elementbildung

Eine Elementbildung ist dadurch gekennzeichnet, daß Bereiche mit unterschiedlichem Ruhepotential berücksichtigt werden. Da wir nur den praktischen Fall des depassivierten Bewehrungsstahls betrachten, interessieren alle Einflußgrößen nach Gl. (2a). Daraus können Hinweise für Schutzmaßnahmen und deren Wirksamkeit abgeleitet werden.

Die ernste Gefahr der Elementwirkung ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß zunächst nur kleine Bereiche aktiviert werden. Dann ist das Flächenverhältnis V groß. Katastrophale Schäden treten wahrscheinlich nur deswegen nicht auf, weil der Beton im Normalfall trocken ist und somit der spezifische Widerstand r sehr groß wird. Aus dieser Betrachtung folgt aber eine recht interessante Warnung für Reparaturmaßnahmen [32].

Bei einer Ausbesserung depassivierter Bewehrung, die nur die erste Lage betrifft, wird als Folge der Sanierung die Korrosion einer auch depassivierten zweiten Lage deutlich gefördert, weil neue und sehr nahe Kathoden in Form der sanierten ersten Lage vorliegen. Somit ist dringend zu empfehlen, den freigelegten Bewehrungsstahl in dem zu sanierenden Bereich zu beschichten. Dazu kommen in Frage:

Aufbringen von Zinkstaub-Beschichtungen (unsicher wegen der Wirkungsdauer)

Aufbringen einer ausreichend dicken (hoch-ohmigen) organischen Beschichtung.

Da im allgemeinen der Zustand der zweiten Lage wenig bekannt ist, sollte die Beschichtung generell erfolgen, damit nicht die Sanierung letztlich nur eine Korrosionsförderung darstellt. (Es liegt auf der Hand, daß solche Überlegungen recht branchenfremd sind.)

2.3.2.1 Schutzwirkung durch Feuerverzinkung

Die Schutzwirkung der Feuerverzinkung kann zwei Teilaufgaben haben: Im Bereich mit depassiviertem Bewehrungsstahl kann Zink - wie im Falle der

freien Korrosion - einen zeitlich begrenzten Schutz geben, wobei auch seine im Vergleich zu Stahl erhöhte Beständigkeit gegenüber einem örtlichen Korrosionsangriff nützlich ist.

In dem umgebenden Bereich, wo weder Carbonatisierung noch zu hohe Chloridgehalte vorliegen und in dem unverzinkter Bewehrungsstahl passiv und korrosionsbeständig sein würde, liegt aber die Hauptlast der Schutzwirkung durch Zink gegen Elementbildung. Sie beruht auf einer Verschiebung des Potentials zu negativeren Werten, wobei die Elementspannung U_0 vermindert wird oder sogar ihr Vorzeichen ändert. Diese Wirkungsweise ist ein elektrochemischer Effekt, der sich auf den gesamten Bewehrungsstahl erstreckt und nur indirekt an der korrosionsanfälligen Stelle wirkt. Die Wirkung geht verloren, wenn die Potentialverschiebung nicht mehr gegeben ist. Diese Schutzwirkung kann sich auch auf Risse im Beton auswirken, solange die Risse nicht zu breit sind [29].

Die wesentliche Frage zur Schutzwirkung durch Zink richtet sich nach dem Langzeitverhalten, insbesondere des Ruhepotentials. Zur näheren Erläuterung zeigt Bild 3 Ruhepotentiale, die über nahezu 2 Jahre in ruhender NaCl-Lösung an nur zum Teil eingetauchten Blechproben gemessen wurden [6,9,13]. Hierbei handelt es sich um folgende Proben:

- unbeschichteter Stahl als Beispiel eines depassivierten Bewehrungsstahls oder eines fremden Objektes,
- unbehandelter Stahl in Zementmörtel (1 cm dick),
- feuerverzinkter Stahl in Zementmörtel (1 cm dick).

Diese Versuchsbedingung entspricht für Probe b) dem korrosionsträchtigen Fall mit den Kurven (2) und (3) nach Bild 1, wobei die Depassivierung durch Eindringen der Chlorid-Ionen und die Belüftung aus dem Überwasserbereich erfolgen. Bei vollständig eingetauchter Probe würde der harmlose Fall mit den Kurven (2) und (4) nach Bild 1 vorliegen [40] - entsprechend $r_K \rightarrow \infty$. Bei Proben in der Luft ist der Beton trocken und es liegt der unkritische Fall mit den Kurven (1) und (3) nach Bild 1 vor - entsprechend $\rho \rightarrow \infty$.

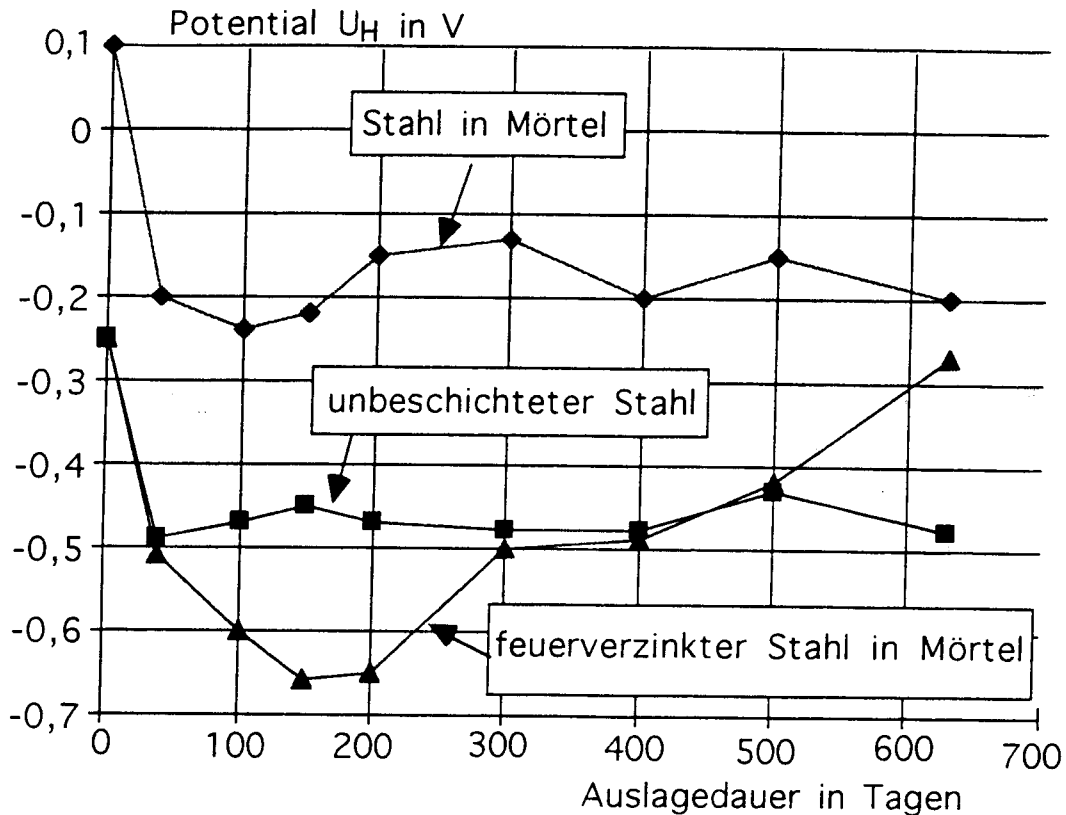


Bild 3:

Ruhepotential-Zeit-Kurven von nur teilweise eingetauchten Blechproben mit/ohne Verzinkung oder Mörtelbeschichtung in ruhender 0,5 M NaCl-Lösung nach [6]

Entsprechend den Angaben zu Bild 1 hat die Probe b) das positivste Ruhepotential und ist somit im Element immer die korrosionsfördernde Kathode. Ihr Potential ist annähernd konstant bei $U_H = -0,2$ V.

Das Ruhepotential der Probe a) liegt um $U_H = -0,45$ V deutlich negativer. Hier kann im Element die Korrosionsgeschwindigkeit im Vergleich zur freien Korrosion wesentlich zunehmen. Dieser Zustand liegt näherungsweise auch bei depassiviertem Bewehrungsstahl im Beton vor.

Das Ruhepotential der Probe c) liegt während einer verhältnismäßig langen Zeit bei negativeren Potentialen als das Potential des korrodierenden Stahls. Das besagt, daß der feuerverzinkte Bewehrungsstahl auch im Beton zunächst seine Eigenschaft zur kathodischen Polarisation des ungeschützten Stahls beibehält. Nach 200 d findet aber eine deutliche Veränderung des Potentials zu positiveren Potentialen statt. Zu Versuchsende glei-

chen sich die Potentiale der beiden Mörtelproben b) und c) an. Die Probe a) würde jetzt nicht mehr kathodisch geschützt, sondern eher durch Elementwirkung gefährdet.

Mit recht vielen Untersuchungen läßt sich eine schützende Wirkung des feuerverzinkten Bewehrungsstahls nachweisen. Die Angaben im Schrifttum lassen aber nur unzureichend Schlüsse auf das Langzeitverhalten zu. Nach den Ergebnissen in Bild 3 ist zumindest in Frage gestellt, ob nach einigen Jahren die erwünschten Unterschiede zwischen unverzinktem und verzinktem Bewehrungsstahl überhaupt noch bestehen.

Da Betonparameter als Einflußgrößen z. B. die Belüftung des Betons und dessen Porigkeit (Wasser/Zement-Wert) und wahrscheinlich auch die Korrosion und die Wirkung der Feuerverzinkung bestimmen, muß das Schrifttum auf diese Parameter hin durchgesehen werden.

2.3.2.2 Schutzwirkung durch Beschichtung

Die Schutzwirkung der Beschichtung kann sehr leicht falsch eingeschätzt werden. Es gibt hierzu wie bei der Feuerverzinkung wieder zwei verschiedene Betrachtungsweisen:

- 1) Von einer Beschichtung, die einen passiven Korrosionsschutz darstellen soll, wird im allgemeinen eine Porenfreiheit verlangt, weil man befürchtet, daß an Verletzungen oder Poren eine erhöhte Korrosionsgefahr besteht. Dies ist auch in dem folgenden System der Fall:

Anode ist der depassivierte Stahl an einer Verletzung, z. B. an einem Riß im Beton. Die Beschichtung begrenzt die anfällige Fläche in einem Element.

Kathode sind entfernte unbeschichtete Bereiche des Bewehrungsstahls oder Fremdoobjekte.

In diesem erdachten Fall besteht eine Korrosionsgefahr an Verletzungen in der Beschichtung. Die Korrosionsgefahr ist aber nur dann erhöht, wenn Kathoden, d. h. unbeschichteter Bewehrungsstahl, an nicht gefährdeten Bereichen vorliegen. Fehlen diese Kathoden, ist eine besondere Korrosionsgefährdung nicht gegeben. Im Nahbereich der Verletzungsstelle ist eine Elementbildung ausgeschlossen, weil die Beschichtung des Bewehrungsstahls den Sonderfall $r_K \rightarrow \infty$ in Gl. (2a) darstellt.

- 2) Die Beschichtung dient nicht dem o. g. passiven Schutz, sondern allein der Aufhebung der Elementbildung. Dies kann nach Gl. (2a) so verstanden werden, daß $r_K \rightarrow \infty$ oder $V \rightarrow 0$ gehen. Es ist dabei wenig wichtig, ob eine Verletzungsfreiheit der Beschichtung vorliegt. Entscheidend ist aber die Anforderung, daß alle Bewehrungsteile, auch solche an unproblematischen Bereichen, beschichtet sind. Es ist nämlich allein wichtig, daß ein möglichst großer Anteil der als Kathode wirksamen Flächen abgedeckt wird. Die Wirkungsweise der Beschichtung ist somit eine - wie bei der Feuerverzinkung auch - ausschließlich elektrochemische Maßnahme an einem Ort, der mit der gefährdeten Stelle (z. B. Betonriß) nur gemein hat, daß der Bewehrungsstahl insgesamt metallenleitend durchverbunden ist. Die Schutzwirkung erstreckt sich ausschließlich auf die Elementbildung, nicht aber auf freie Korrosion. Von dieser kann aber nach Abschnitt 2.3.1 angenommen werden, daß die Gefährdung nicht sehr groß ist.

Im Gegensatz zur Feuerverzinkung sollte diese Schutzwirkung durch Beschichten langfristig erhalten bleiben, soweit der Beschichtungsstoff in

dem alkalischen Porenwasser des Betons auch chemisch- und alterungsbeständig ist. Das ist bei einer ausreichend dicken Epoxidharz-Beschichtung sicherlich der Fall - offensichtlich aber nicht bei PVC-Beschichtungen [29]. Insgesamt kann man wohl davon ausgehen, daß bestehende Probleme keine Sachfragen berühren.

2.3.2.3 Schutzwirkung durch Inhibitoren

Die Schutzwirkung durch Inhibitoren wurde bereits im Abschnitt 2.3.1 über die freie Korrosion beschrieben. Solange der anodische Inhibitor aufgrund seiner Konzentration in der Lage ist, die Passivität des Bewehrungsstahls zu erhalten, ist seine Schutzwirkung gegeben. Die erforderliche Konzentration ist von dem Ausmaß der Carbonatisierung bzw. der Chloridionen-Konzentration sowie von der Rißbreite [29] abhängig. Im Laufe der Zeit wird der Inhibitor auch verbraucht oder ausgewaschen, so daß eine ausreichende Langzeitwirkung sicherlich nicht ernsthaft erörtert werden kann.

2.3.2.4 Kathodischer Schutz

Die Elementbildung und der kathodische Korrosionsschutz wirken elektrochemisch entgegengesetzt und folgen dabei den gleichen Abhängigkeiten von der Geometrie und der elektrischen Leitfähigkeit. Somit richtet sich auch dieses Schutzverfahren im wesentlichen gegen die Elementbildung und weniger gegen freie Korrosion, die ja bei hohen Widerständen ohnehin kein Problem darstellt. Frühere Befürchtungen über eine schädliche Wirkung der kathodischen Polarisation haben sich als unzutreffend [18] erwiesen. Der kathodische Korrosionsschutz ist eine wirksame Technik [32,36,37].

Der kathodische Korrosionsschutz unterscheidet sich von allen anderen Schutzmaßnahmen dadurch, daß er nicht wartungsfrei eingesetzt werden kann. Neben den Kontrollmessungen zum Nachweis der ausreichenden Schutzwirkung sind als zusätzliche Arbeiten die Wartung und gegebenenfalls auch die Erneuerung der Anodenanlagen zu nennen.

2.3.3 Gefährdung von Fremdoobjekten

Die Gefährdung von Fremdoobjekten folgt unmittelbar aus Bild 3, wobei die unbehandelte Blechprobe das Fremdoobjekt darstellt. Dieses Fremdoobjekt kann z. B. ein Behälter oder eine Rohrleitung im Erdboden oder in Gewässern (siehe hierzu DIN 50929 Teil 3) sowie eine beliebige Installation in feuchtem Mauerwerk (siehe hierzu DIN 50929 Teil 2) sein. Umgekehrt ist für den Betreiber des Fremdoobjektes die gefährdende Komponente mit dem positiveren Potential eine sogenannte Fremdkathode [36].

Zum Korrosionsschutz ist eine Feuerverzinkung wirksam, wenn im Laufe des Betriebes das Potential des verzinkten Bewehrungsstahls ausreichend negativ bleibt [6,9,13]. Dieser Effekt ist sicherlich von den Betoneigenschaften abhängig, was auch bei der Durchsicht des Schrifttums zu beachten ist.

Im wesentlichen aus praktischen Überlegungen hinsichtlich der Flächenanteile von unverzinktem und verzinktem Bewehrungsstahl werden zum Korrosionsschutz gegen die Wirkung von Fremdkathoden folgende Maßnahmen ergriffen [36]:

- a) Auftrennen der metallleitenden Verbindung durch Einbau von Isolierstücken, vgl. z. B. in Gashausschlußleitungen nach DVGW-Arbeitsblatt G 600 (TRGI)
- b) Lokaler kathodischer Korrosionsschutz (z. B. in Industrieanlagen, wenn die Maßnahme a) nicht durchführbar ist, siehe Kapitel 12 in [36])
- c) Schutz durch isolierende Beschichtung, wenn diese sicher durchführbar ist, z. B. Hausinstallation (DIN 50929 Teil 2)

Da diese Maßnahmen sicher gehandhabt werden können, liegt kein Grund für die Verwendung von verzinktem Bewehrungsstahl vor - es sei denn, es werden lokale Sonderfälle behandelt, bei denen der Betreiber der gefährdeten Objekte auch der Eigner des Stahlbeton-Gebäudes ist.

2.3.4 Gefährdung durch fremde Einflüsse und Maßnahmen

Eine Korrosionsgefährdung des Bewehrungsstahls durch fremde Einflüsse oder Maßnahmen ist in den folgenden Fällen denkbar:

- a) Anodische Polarisation durch Streustrom-Beeinflussung
- b) Kathodische Korrosion des Stahls im alkalischen Porenwasser des Betons

Von diesen beiden Fällen kann Fall a) ein Problem darstellen, das an sich bekannte Streustrom-Schutzmaßnahmen fordert, siehe Kapitel 15 in [36]. Sowohl eine Verzinkung als auch eine Beschichtung sind in diesem Falle als Schutzmaßnahme ungeeignet.

Der Fall b) kommt nach den Untersuchungen in [18] unter praktischen Bedingungen nicht vor. Im anderen Falle hätten sich längst in der Praxis sowohl beim Anwenden des kathodischen Schutzes von Bewehrungsstahl als auch beim lokalen kathodischen Korrosionsschutz Schäden gezeigt.

3 Teil 2 Auswertung des Schrifttums

3.1 Allgemeine Hinweise und Ziele der Auswertung

Im ersten Teil dieses Berichtes wurden die korrosionstechnischen Eigenschaften und möglichen Probleme des Bewehrungsstahls behandelt und die Grundlagen der Schutzwirkung durch Feuerverzinken im Vergleich zu anderen Schutzmaßnahmen erörtert. Dabei wurden weitgehend Detailaussagen durch Schrifttumshinweise gekennzeichnet. Die Ergebnisse dieser theoretischen Zusammenstellung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Feuerverzinkung ist für den Normalfall eines passiven Bewehrungsstahls nicht erforderlich, aber auch nicht schädlich.
 - Die Feuerverzinkung kann im Falle eines depassivierten Bewehrungsstahls sowohl gegen freie Korrosion als auch bei Elementbildung nützlich sein. Diese Schutzwirkung ist aber zeitlich begrenzt und von Betonparametern abhängig. Daraus folgen für diesen Teil des Berichtes folgende Aufgaben:
- 1) Zusammenstellen der Befunde über das Langzeitverhalten der Schutzwirkung durch Feuerverzinken
 - 2) Zusammenstellen von Beispielen für einen sinnvollen Einsatz von feuerverzinkten Bewehrungsstählen in Sonderfällen.

Alternativen zum Korrosionsschutz durch Feuerverzinken sind:

- Beschichten mit Epoxidharz,
- kathodischer Korrosionsschutz.

Beide Verfahren sind technisch erprobt und langfristig wirksam. Dagegen ist der Einsatz von Inhibitoren keine Alternative.

Folgende Eigenschaften der verzinkten Bewehrungsstähle sind nicht Gegenstand der Beurteilung in diesem Bericht und bleiben unbehandelt.

- a) mechanisch-technologische Eigenschaften,
- b) wasserstoffinduzierte Korrosion von Spannstahl.

Zu a) ist zusammenfassend festzustellen, daß die mechanischen Eigenschaften die Verwendung feuerverzinkter Bewehrungsstähle nicht in Frage stellen [2,4,5,11,12,14,15,16,20,25,26] und Fragen

der Zulassung [43] auch im Hinblick auf Betonzusätze [23] beantwortet sind.

Zu b) ist zusammenfassend festzustellen, [3,7,8,11,19,] daß wasserstoffinduzierte Rißbildung mit einer Wasserstoffaufnahme aus der Korrosion des Zinks mit der Betonfeuchte auftreten kann. Da das Potential jedoch sehr schnell mit der Zeit zu positiveren Potentialen verschoben wird, besteht diese Gefährdung nur zu Beginn und auch nur an Verletzungen der Zinkschicht, die bis zum Stahl führen. Dabei können Mediumparameter (z. B. Chromatzusätze) schützen. Es ist somit wahrscheinlich, daß im Laufe der Zeit eine spezifische negative Wirkung durch die Zinkschicht verloren geht und umgekehrt eine normale Schutzwirkung des Zinks im Falle einer Depassivierung eintritt [19].

Eine besondere Betrachtung der feuerverzinkten Spannstähle entfällt somit bei den nachfolgenden Betrachtungen.

3.2 Langzeitverhalten zum Korrosionsschutz und zum Potential

3.2.1 Untersuchungen in Salzwässern

Bild 3 stammt aus ersten Untersuchungen [6,9,13] zur Bestimmung des Langzeitverhaltens des Potentials von Elektroden im Beton. Zu Beginn liegt überall der Zustand der freien Korrosion vor, wobei die nur teilweise eingetauchten Proben von der Luftseite her als gut belüftet angesehen werden müssen. Das Ruhepotential des unverzinkten Stahls im Mörtel liegt bei $U_H = 0,1$ V und entspricht dem Wert A in Bild 1. Bei der feuerverzinkten Stahlprobe im Mörtel wird das Potential deutlich negativer, wobei eine Aktivierung des Zinks durch das alkalische Porenwasser zu vermuten ist.

Im Laufe der Zeit wandern Chlorid-Ionen durch die 1 cm dicke Mörtelschicht. Da ihre Diffusion im wassergesättigten Mörtel des Tauchbereiches langsamer erfolgt als im Wasser/Luftbereich, werden sie in diesem kritischen Bereich zu einer frühen Depassivierung führen, wobei letztlich eine Elementbildung zwischen depassivierten und noch passiven Bereichen entsteht. Das Potential des unverzinkten Stahls im Beton liegt dann um $U_H = -0,2$ V und entspricht dem Wert C in Bild 1. Beim feuerverzinkten Stahl laufen die gleichen Vorgänge ab, wobei das Potential sich kontinuierlich ändert und nach etwa 2 Jahren das Potential des unverzinkten Stahls im Mörtel erreicht.

Nach dem Ausbau der Stahlproben zeigten sich bei der unverzinkten Probe Mörtelabplatzungen und Eindringtiefen I_{max} bis zur Perforation von 1 mm dickem Blech entsprechend einer Eindringge-

windigkeit von $w_I > 0,5$ mm/a. Bei der verzinkten Probe erfolgte lediglich eine Abzehrung der Zinkschicht von etwa 50 μ m ohne nennenswerten Angriff an der Stahlprobe.

Aus diesen Untersuchungen sind folgende Schlüsse zu ziehen:

1. Das Potential wird im Laufe der Zeit so positiv, daß die Elementbildung sicherlich nicht verhindert wird. Diese Aussage bezieht sich aber nur auf den extremen Belastungsfall mit Salzwasser.
2. Die Zinkschicht ist in der Lage, den Korrosionsangriff am Stahl im Salzwasser/Luftbereich deutlich zu verzögern, sie kann ihn aber nicht verhindern.

In einer Fortsetzungsarbeit [21a] mit Versuchszeiten bis zu 5 Jahren wurden weitere Parameter untersucht: Erhärtingsbedingung (Feucht- oder Wasserlagerung), verzinkt/unverzinkt und vollständig/teilweise eingetaucht. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Alle nur teilweise eingetauchten Proben haben nach 3 Jahren das gleiche Potential um $U_H = -0,3$ V. Alle vollständig eingetauchten Proben zeigen sehr negative Potentiale, die sich mit der Zeit nur geringfügig ändern. Die verzinkten Proben liegen um $U_H = -0,7$ V, die unverzinkten je nach Aushärtebedingung bei $U_H = -0,5$ bis $-0,3$ V. Dies entspricht dem Wert D in Bild 1.

Die elektrischen Widerstände nehmen bei allen Proben mit der Zeit zu, siehe auch [38].

Bei den vollständig eingetauchten, nicht verzinkten Proben findet ein nur geringer Korrosionsangriff statt, der nicht zu Schäden führt und auf den Sauerstoffgehalt des Mörtels bei Versuchsbeginn zurückzuführen ist. Bei den teilweise eingetauchten Proben treten mit Eindringtiefen $I_{max} = 0,5$ bis 1 mm Schäden auf. Ein hoher Wasser/Zement-Wert ist nachteilig.

Bei den vollständig eingetauchten, verzinkten Proben liegt kein Korrosionsangriff vor. Bei den teilweise eingetauchten Proben ist nach 5 Jahren ein Korrosionsangriff um $I_{max} = 0,1$ bis 0,3 mm zu erkennen, der noch nicht als Schaden angesehen werden muß.

Bei allen Untersuchungen [6,21] war die Mörtelhaftung auf dem verzinkten Stahl deutlich besser als auf unverzinktem Stahl.

Diese Untersuchungen wurden ausschließlich mit Portlandzement-Mörtel durchgeführt. Unveröffent-

lichte Untersuchungen [21b] mit Hochofenzement-Mörtel, in dem die Diffusion der Chlorid-Ionen erschwert ist, zeigten wider Erwarten keine bessere Korrosionsbeständigkeit.

Aus diesen Befunden kann zusammenfassend gefolgert werden, daß die Feuerverzinkung bei starker Salzwasserbelastung das Auftreten von Korrosionsschäden deutlich verzögert. Eine elektrochemische Wirkung zur Vermeidung einer Elementbildung geht aber nach wenigen Jahren verloren, wenn die Bereiche mit feuerverzinkter Bewehrung nicht ständig eingetaucht sind.

Bei diesen Untersuchungen in Salzwässern lagen zwar extreme Verhältnisse vor, bei denen allein wegen der zu geringen Betondeckung mit Schäden zu rechnen war. Dies ändert aber nicht die Aussagen der Schlußfolgerungen. Wenn bei den nur teilweise eingetauchten verzinkten Proben trotz Korrosion im Bereich der Wasser/Luft-Zone verhältnismäßig positive Potentiale gemessen wurden, dann sind für den Fall einer Korrosionsbeständigkeit eher noch positivere Werte zu erwarten.

3.2.2 Untersuchungen in Erdböden

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen in Erdböden dienten im wesentlichen zur Beantwortung der Frage über den zeitlichen Verlauf der Potentiale. Die Versuche wurden über vier Jahre durchgeführt, wobei die Befunde der ersten drei Jahre in [22a] veröffentlicht sind. Die Ergebnisse der Untersuchungen im vierten Jahr sind in einem Ergänzungsbericht für den GAV zusam-

Bei den insgesamt acht Kathoden wurden variiert: verzinkt ja/nein, Wasser/Zement-Wert 0,5/0,7 sowie die Zementart des Betons. Die Ruhepotentiale wurden jeweils 1 Stunde nach dem Abtrennen aller Anodenproben gemessen und sind in der Tabelle 1 für den Beginn der Messungen und am Ende nach vier Jahren angegeben. Aus diesen Befunden von Untersuchungen mit nicht korrodierendem Bewehrungsstahl in Beton können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Beim unverzinkten Bewehrungsstahl ändern sich die Potentiale nur wenig und liegen um $U_H = 0,0$ bis $+0,2$ V. Nur beim dichten HZ-Beton liegen die Ruhepotentiale etwas negativer um $U_H = -0,1$ V. Allgemein sind die Ruhepotentiale im weniger dichten Beton (W/Z-Wert = 0,7) wegen der besseren Belüftung positiver.
- Beim verzinkten Bewehrungsstahl sind die Ruhepotentiale in allen Fällen zu Beginn deutlich negativer als die der unverzinkten Proben, jedoch wird dieser Unterschied mit der Zeit merkbar kleiner. Wider Erwarten ist das Ruhepotential beim weniger dichten PZ-Beton (W/Z-Wert = 0,7) deutlich negativer als im weniger dichten HZ-Beton. Im HZ-Beton unterscheiden sich die Ruhepotentiale nur wenig.

Tabelle 1: Ruhepotentiale des Bewehrungsstahls nach [22] Zahlenwerte U_H in V

Nr.	1	5	2	6	3	7	4	8
verzinkt	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja
W/Z-Wert	0,5		0,7		0,5		0,7	
Zement*)	PZ		PZ		HZ		HZ	
Beginn	+0,05	-0,20	+0,05	-0,30	$\pm 0,00$	-0,20	+0,10	-0,15
Ende	+0,05	$\pm 0,00$	+0,15	-0,10	-0,10	-0,10	+0,15	-0,05

PZ = Portlandzement, HZ = Hochofenzement

mengestellt [22b]. Als Kathoden dienten bewehrte Zylinder der Abmessungen: 1 m Durchmesser, 1 m Höhe und 10 cm Dicke. Diese Zylinder waren wie bei einem Stahlbetonbau-Fundament innen nicht gefüllt und außen mit Erdbreich umgeben. Die Oberfläche des Bewehrungsstahls betrug jeweils 2,4 m². Mit diesen Kathoden wurden jeweils 8 Stahlproben einer Oberfläche von 58 cm² verbunden, die separat über Meßeinrichtungen angeschlossen waren. Neben den Elementströmen wurden in Zeitabständen auch die Massenverluste bestimmt.

Die im Tonboden installierten Anoden zeigten ein mittleres Ruhepotential um $U_H = -0,45$ V, d. h. alle acht Kathoden waren auch als Kathoden eines Elementes mit ungeschütztem Stahl im Erdboden als Anoden wirksam. Eine vermutete Schutzwirkung der Feuerverzinkung durch Potentialverschiebung zu negativeren Werten war also in keinem Falle gegeben oder ausreichend.

Die korrosionschemischen Untersuchungen der Anoden zeigten, daß der Abtrag im wesentlichen auf die Elementbildung zurückzuführen ist. Der Elementstrom zeigt recht große jahreszeitliche Schwankungen und nimmt nur im ersten Jahr zeitlich ab. Dabei liegen die Ströme für die verzinkten und unverzinkten Kathoden jeweils in einem Streubereich.

Die zeitlichen Mittelwerte der Elementströme liegen bei den unverzinkten Kathoden um $I = 0,6 \text{ mA}$ und bei den verzinkten Proben um $0,4 \text{ mA}$ und somit nur wenig kleiner. Dabei weist aber die Probe Nr. 5, die nach der Tabelle 1 auch das positivste Potential hat, etwas höhere Stromwerte auf und unterscheidet sich somit praktisch nicht von den Werten bei unverzinktem Stahl. Ein Elementstrom von 1 mA führt bei Vernachlässigung der Eigenkorrosion zu einer flächenbezogenen Massenverlustrate von $0,2 \text{ mm/a}$. Die Eigenkorrosion beträgt einige 10% .

Aus diesen Untersuchungen kann zusammenfassend geschlossen werden, daß die Elementwirkung nur unwesentlich durch Feuerverzinken des Bewehrungsstahls vermindert werden kann und daß die Abtragswerte zu hoch sind. Das Flächenverhältnis lag bei $V = 50$ bis 100 und somit durchaus realitätsnah.

3.2.3 Untersuchungen an Bauteilen

Im Rahmen eines Hochschul-Bauvorhabens der TU Hannover bestand die Gelegenheit, das Verhalten von unverzinktem und verzinktem Bewehrungsstahl langfristig zu verfolgen. Es handelt sich um einen Wellenkanal, an dem in Fensterbereichen ein Kontakt zum Bewehrungsstahl bestand, so daß dessen Potential gegen das Wasser gemessen werden konnte. Nach nunmehr einer Betriebsdauer von über 10 Jahren traten keinerlei Korrosionserscheinungen auf, d. h. die Bewehrung ist noch als passiv anzusehen. Die Potentiale des verzinkten und des unverzinkten Stahls hatten sich inzwischen angeglichen [41]. Bei Vorliegen einer depassivierten Stelle oder bei Kontakt mit ungeschützten Fremdobjekten hätte demnach der feuerverzinkte Bewehrungsstahl eine Elementbildung nicht verhindern können.

3.2.4 Temperatureinfluß

Beim Kontaktelement Fe/Zn ist im allgemeinen Fe die Kathode und Zn die Anode mit Strom-Potential-Kurven entsprechend Bild 2. Für den Fall, daß Zink durch Korrosionsprodukte passiviert ist, kann in belüftetem Medium in der Darstellung von Bild 1 das Ruhepotential von C nach A verschoben werden. Diese "Veredelung" des Zinks ist insbesondere im Warmwasser-Bereich bekannt, so daß für dieses Medium Zink als galvanische Anode ausscheidet, siehe Kapitel 6 in [36]. Wird das Zink-

Potential positiver als das Potential von ungeschütztem Stahl (sogen. Potentialumkehrung), kann der Stahl durch Elementbildung mit Zink korrosionsgefährdet werden. Dazu liegen in der Praxis Beispiele vor. Entsprechend wurden auch Befürchtungen hinsichtlich des Einsatzes von feuerverzinktem Bewehrungsstahl geäußert, was dann experimentell geklärt werden sollte.

Bei den Untersuchungen wurden jeweils feuerverzinkter und unverzinkter Betonrippenstahl ($\varnothing = 8 \text{ mm}$) in einem zylinderförmigen Mörtelkörper ($\varnothing = 70 \text{ mm}$) achsenparallel eingebracht, wobei überall eine Betondeckung von mindestens 2 cm eingehalten war. Als Mörtelvariante wurde der Chloridgehalt verändert: ohne und mit Zusatz von $2 \text{ Mass.-% Chlorid}$ (als CaCl_2) bezogen auf den Zementanteil. Die Proben wurden in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung bei 60° C gelagert. Es wurden die Ruhepotentiale und die Elementströme gemessen.

Die Untersuchungsergebnisse [17] zeigen, daß in keinem Fall eine Potentialumkehrung auftritt, wobei die Ruhepotentiale in chloridfreiem Mörtel mit der Zeit merkbar zu positiveren Potentialen verschoben werden. Nach 200 Tagen liegen die Potentiale des unverzinkten Stahls um $U_H = +0,05 \text{ V}$ und die des verzinkten Stahls um $U_H = -0,35 \text{ V}$.

Beim chloridhaltigen Mörtel verändern sich die Potentiale nur wenig. Sie liegen beim unverzinkten Stahl um $U_H = -0,40 \text{ V}$ und beim verzinkten Stahl um $U_H = -0,70 \text{ V}$.

Die Elementströme nehmen beim chloridfreien Mörtel sehr schnell bis auf etwa $0,1 \mu\text{A cm}^{-2}$, im Falle des chloridhaltigen Mörtels auf etwa $1 \mu\text{A cm}^{-2}$ ab. Im Falle des chloridreichen Mörtels bleibt also das Zink aktiv, was sich im Element durch einen merkbaren Abbau der Verzinkung und einen merkbar geringeren Angriff am unverzinkten Bewehrungsstahl äußert.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Im chloridfreien Mörtel findet bei erhöhter Temperatur keine Potentialumkehr des Zinks statt. Aber die Potentialdifferenz zwischen verzinktem und unverzinktem Bewehrungsstahl sowie die Elementströme nehmen mit der Zeit deutlich ab.
- In chloridhaltigem Mörtel stellen sich völlig andere Potentiale ein, die auch bei den Versuchen mit Salzwässern (Abschnitt 3.2.1) nicht beobachtet wurden. Das Zink nimmt langfristig (200 Tage) ein recht negatives Potential ein und schützt kathodisch. Dieser Effekt kann

naturgemäß aber nur so lange wirken, wie metallisches Zink auch noch vorhanden ist. In den 30 Wochen wurde bereits ein merkbarer Zinkabbau an metallografischen Schliffen beobachtet!

- Zur Beurteilung der Korrosionsschutzwirkung der Feuerverzinkung sind aber die gemessenen Potentiale wesentlich. Im chloridfreien Bereich liegt das Potential des verzinkten Bewehrungsstahl um 0,05 V positiver als das des unverzinkten Stahls und um 0,35 V positiver als das des verzinkten Stahls jeweils im chloridhaltigen Mörtel. Es wird demnach zunächst recht schnell mit 0,35 V das Zink abgetragen und dann mit 0,05 V der Stahl korrodiert. Hierbei muß man nach den Befunden in Abschnitt 3.2.2 noch davon ausgehen, daß diese Potentialdifferenz mit der Zeit noch größer wird. Damit ist erwiesen, daß auch der verzinkte Bewehrungsstahl die Korrosion des durch Chlorid-Ionen depassivierten Bewehrungsstahls durch Elementbildung fördert. Das Ausmaß dieser Korrosionsgefährdung richtet sich aber nicht nur nach den Potentialdifferenzen, sondern gemäß Gl. (2) in Abschnitt 2.2 auch nach dem Flächenverhältnis, d. h. nach den geometrischen Details des Stahlbeton-Baus.

3.3 Einsatz von feuerverzinktem Bewehrungsstahl in Sonderfällen

Die Darlegungen im Abschnitt 3.2 haben gezeigt, daß eine Feuerverzinkung des Bewehrungsstahls auf die Dauer nur wenig geeignet ist, Korrosionselemente durch eine Potentialbeeinflussung zu vermeiden. Als Schutzmaßnahme gegen freie Korrosion unter Bedingungen, bei denen unverzinkter

reicher Mörtel) ausführlich beschrieben. Sie ist nur zu Beginn wirksam und geht mit der Zeit verloren.

Die Wirkungskdauer ist bei chloridreichem Mörtel verhältnismäßig kurz. Sie kann bei Salzwasserbelastung mehrere Jahre betragen. Korrosionsfördernde Elementbildung mit feuerverzinktem Bewehrungsstahl als Kathode in intakten Mörtelbereichen ist möglich.

Die geringe Schutzwirkung in chloridreichen Medien wurde auch bei freier Korrosion in Leichtbeton [31] und an Rissen im Beton [24,29] beobachtet.

3.3.2 Schutzwirkung bei Carbonatisierung

Die ersten umfangreichen Untersuchungen über die Schutzwirkung der Feuerverzinkung bei freier Korrosion nach Carbonatisierung sind in [2] beschrieben. Die Versuchskörper waren mit 4 x 4 x 16 cm und mittig eingebautem Bewehrungsstahl recht klein. Die Proben wurden unter CO₂ carbonatisiert und dann bei verschiedenen Feuchten bis zu zwei Jahren ausgelagert. Die Zinkkorrosion im carbonatisierten Mörtel wurde durch Analyse der Zinkkorrosionsprodukte bestimmt. Die Mittelwerte sind in der Tabelle 2 angegeben und zeigen, daß nach einer Woche der Angriff am Zink praktisch aufhört. Nur bei 100 % rel. Feuchte nimmt nach einer Woche der Abtrag noch etwas zu. Insgesamt sind diese Werte extrem niedrig.

Der Schwerpunkt der damaligen Untersuchung lag im Nachweis, daß das Zink in dem alkalischen Beton-Porenwasser nur vernachlässigbar langsam korrodiert. Die Versuche mit carbonatisiertem Beton wurden geringfügig abgeändert durchgeführt, wobei leider direkt vergleichbare Messungen der Dickenabnahmen nicht vorliegen. Die Abträge sollen aber mit denen in Tabelle 2 vergleichbar sein. Relativzahlen bestätigen darüber hinaus den glei-

Tabelle 2: Zinkabtrag in nichtcarbonatisiertem Beton nach [2], Zahlenwerte sind Mittelwerte in µm

relative Feuchte in %	40	60	80	100
nach einer Woche	3,0	3,3	3,0	2,5
nach zwei Jahren	3,2	4,7	4,3	7,4

Stahl depassiviert wird, scheint die Feuerverzinkung aber Vorteile zu bieten. Dieser Schutzeffekt kann naturgemäß nur zeitweise und je nach System auch unterschiedlich lange anhalten, so daß eine Bewertung nur für den Einzelfall möglich ist.

3.3.1 Schutzwirkung bei Chloridbelastung

Die Schutzwirkung wurde in den Abschnitten 3.2.1 (äußere Salzwasserbelastung) und 3.2.4 (chlorid-

chen Zeiteinfluß wie in Tabelle 2 nach dem Ausbau des Bewehrungsstahls nach zwei Jahren konnte keine Rostbildung und nur geringfügiger Zinkangriff festgestellt werden, wohingegen bei ungeschützten Betonstahl nach einem halben Jahr Rostbildung eintrat.

Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch neuere Untersuchungen mit Leichtbetonen [31]. Die Untersuchungen wurden an größeren Platten der Abmessung 100 x 62,5 x 25 cm durchgeführt, in de-

nen der Bewehrungsstahl ($\varnothing = 8 \text{ mm}$) mit Betondeckungen von 1,5 bis 8 cm eingebaut wurde. Die Platten wurden unter verschiedenen Klimabelastungen bei Freibewitterung mit/ohne Dach und teilweise auch mit Chloridbelastung ausgelagert. Die Proben wurden nach 1 und nach 2,5 Jahren untersucht. Als Betonvariante waren vorgesehen: Normalbeton, Konstruktionsleichtbeton, haufwerksporiger Beton, Gasbeton und Schaumbeton. Es liegt auf der Hand, daß die porösen Betonarten schnell carbonatisieren.

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, daß in allen Fällen die Feuerverzinkung einen recht guten Schutz im carbonatisierten Beton liefert. Die gemessenen Zinkabträge liegen nach 2,5 Jahren bei einer Betondeckung von 1,5 cm unter $20 \mu\text{m}$ und bei einer Betondeckung von 2,5 cm unter $10 \mu\text{m}$. Unter diesen Bedingungen kann also der Feuerverzinkung eine ausreichende Schutzwirkung zugesprochen werden. Eine Ausnahme stellt aber der Gasbeton dar, bei dem der Zinkangriff zu groß ist, so daß die Schutzwirkung nicht lange anhält.

Die günstigen Befunde gelten auch nicht für eine Salzwasserbelastung. Die Chlorid-Ionen dringen verhältnismäßig schnell in die porösen Betone ein und führen zu einer nicht vernachlässigbar starken Zinkkorrosion. Völlig anders als in dichten Betonen (vergl. mit Abschnitt 3.2.1) treten in den Leichtbetonen beim korrodierenden verzinkten Bewehrungsstahl eher Risse auf als beim korrodierenden unverzinkten Bewehrungsstahl.

Nach diesen Untersuchungen kann also geschlossen werden, daß der feuerverzinkte Bewehrungsstahl sinnvoll eingesetzt werden kann, wenn Depassivieren durch Carbonatisieren zu erwarten ist. Diese Aussage erscheint trotz der verhältnismäßig geringen Versuchsdauer um zwei Jahre aufgrund des geringen Zinkangriffs vertretbar. Sie gilt allerdings nur für den Zustand der freien Korrosion.

Weitere Informationen über das langzeitige Korrosionsverhalten von verzinktem und unverzinktem Bewehrungsstahl in Betonbalken der Abmessungen $15 \times 15 \times 76 \text{ cm}$ folgen aus dem Abschlußbericht [42], der Daten über eine Auslagerung an Luft bis zu 12 Jahre enthält. Die Überdeckung lag in allen Fällen unter 2 cm bei einer zu Versuchsbeginn durch CO_2 -Begasen eingestellten Carbonisierungstiefe von 2,6 cm. Somit lagen alle Bewehrungsstähle im carbonatisierten Beton. Im Laufe dieser Zeit korrodierte der unverzinkte Stahl recht stark, während der verzinkte Stahl nur einen Zinkabtrag mit einer Korrosionsgeschwindigkeit von $10 \mu\text{m a}^{-1}$ aufwies. Kontakt zwischen unverzinktem und verzinktem Stahl bewirkte einen kathodischen Schutz, der die Korrosion des unverzinkten Stahls etwas verringerte zu Lasten der Zinkauflösung. Nach Extrapolation sollte in 20 Jahren der gesamte

Zinküberzug korrodiert sein. Dieser Vorgang kann noch frühzeitiger auftreten, wenn passiver Bewehrungsstahl in nichtcarbonatisierten Betonbereichen die Zinkauflösung durch Elementbildung fördert. Die Untersuchung dieses wichtigen Aspektes war leider bei den Versuchen nicht vorgesehen. Eine Versuchsvariante mit erhöhten Chloridgehalten zeigte eine starke Korrosionsanfälligkeit des verzinkten Bewehrungsstahls, d. h. dessen Schutzwirkung war praktisch nicht vorhanden.

Zur Beurteilung einer Korrosionsgefährdung durch Elementbildung müßten für den verzinkten und für den unverzinkten Bewehrungsstahl in carbonatisierten und in nichtcarbonatisierten Bereichen Potentiale gemessen werden. Solche Meßwerte für belüfteten nichtcarbonatisierten Beton liegen in [22] vor und zeigen, daß feuerverzinkter Bewehrungsstahl Potentiale um $U_H = -0,1$ bis $0,0 \text{ V}$ annimmt. Meßwerte für Stahl in carbonatisiertem Beton liegen leider nicht vor und müßten geschätzt werden. Es ist wahrscheinlich, daß diese Werte negativer als $-0,2 \text{ V}$ sind, so daß eine Elementbildung durchaus gegeben sein kann. Diese Elementbildung ist aber sicherlich weniger wirksam als die mit unverzinktem Bewehrungsstahl.

Zur Beurteilung des Ausmaßes einer möglichen Elementbildung spielen gemäß Gl. (2) in Abschnitt 2.2 wieder Details des Stahlbeton-Baus eine Rolle. Die Elementbildung dürfte auch aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeit bei Carbonatisierung weniger schwerwiegend sein als bei Chloridbelastung. Einen langzeitigen Schutz gegen Korrosion nach Depassivieren durch Chlorid-Ionen gibt die Feuerverzinkung nicht, siehe Abschnitt 3.3.1, im Falle der Carbonatisierung kann aber keine eindeutige Antwort gegeben werden. Daraus folgt, daß auch bei Fehlen einer Chloridbelastung Argumente z. B. für eine Reduzierung der Betondeckung beim Einsatz von feuerverzinktem Bewehrungsstahl unzureichend sind.

Depassivierung durch Carbonatisieren soll bei Beachten der DIN 1045 nicht auftreten. Sie ist in der Praxis zu erwarten, wenn eine zu geringe Betondeckung oder wenn Risse im Beton vorliegen, siehe Abschnitt 3.3.3. Eine ausreichende Betondeckung ist bei der Technik des bewehrten Mauerwerks nicht möglich [28]. Hier müssen für die der Witterung ausgesetzten Bereiche korrosionsgeschützte Bewehrungsstähle eingesetzt werden, wozu die Feuerverzinkung vorgeschlagen wurde.

3.3.3 Schutzwirkung bei Rissen im Beton

Über das Korrosionsverhalten von Bewehrungsstahl im Bereich von Rissen in Beton liegen mehrere Arbeiten vor [19,24,26,29,34], die alle zu gleichartigen Ergebnissen kommen, die wie folgt zusammengefaßt werden können:

- Von den möglichen Schutzmaßnahmen kommt nur die Feuerverzinkung in Frage, weil sie im Falle von Rissen, die bis zum Bewehrungsstahl durchgehen, noch einen kathodischen Schutz geben kann. Dieser Schutzeffekt ist bei organischen Beschichtungen naturgemäß nicht möglich.

(Bei dieser Betrachtung ist nur übersehen, daß die Kombination einer organischen Beschichtung mit einem kathodischen Korrosionsschutz als bessere Alternative angesehen werden

Tabelle 3: kritische Rißbreiten in Abhängigkeit von der Betondeckung und der Korrosionsbelastung nach [29]
Zahlenwerte in mm

Betondeckung in cm	1,5	2,5	5,0
Industrieatmosphäre	0,3	0,4	>0,5
Salzwasser-Belastung	0,1	0,2	0,4

kann, weil sie zeitlich unbegrenzt wirksam ist.)

Die Schutzwirkung durch Inhibitoren ist zu gering und zu kurzzeitig und scheidet als Alternative sicherlich aus.

- Die Schutzwirkung der Feuerverzinkung ist von der Rißbreite, der Betondeckung und von Betonparametern abhängig, siehe Tabelle 3.
- Die Schutzwirkung ist bei Einwirken von Chlorid-Ionen (Salzwasser-Belastung) verhältnismäßig gering und zeitlich nur begrenzt.
- Die Schutzwirkung ist bei carbonatisierten Rißflanken (als Folge einer Witterungsbelastung) recht gut, wobei in Analogie zu den Angaben im Abschnitt 3.3.2 nur dann ausreichend lange Schutzzeiten erwartet werden können, wenn die Zinkschichtdicken über 100 µm liegen.

Zusammenfassend wird zum Korrosionsverhalten an Rissen in Beton ein Anwendungsbereich der Feuerverzinkung für atmosphärische Belastungen gesehen. Der Hinweis auf die erforderlichen Schichtdicken des Zinküberzuges verraten, daß das Langzeitverhalten auch nur geschätzt werden kann, wobei man von Zinkabträgen um 10 µm während der Versuchsdauer um zwei Jahre und einer zeitlich abnehmenden Korrosionsgeschwindigkeit ausgeht. In allen Fällen kann aber an Hand der Probenabmessungen gefolgert werden, daß die Korrosionsgefährdung durch großflächige Elemente nicht beurteilt werden kann.

4 Erörterung der Auswertungen

Nach diesen Auswertungen des Schrifttums kann die Frage nach vertretbaren Gründen für das Feuerverzinken von Bewehrungsstahl für den Einsatz bei Stahlbetonbauten wie folgt erörtert werden:

4.1 Schutz der Stahlbeton-Konstruktion

Die Feuerverzinkung des Bewehrungsstahls hat nur dann einen Sinn, wenn eine Korrosionsgefährdung besteht, die aber nach Einhalten der Regeln (DIN 1045) nicht eintreten soll.

Als Anwendungsbereich des Korrosionsschutzes durch Feuerverzinken verbleiben folgende Teilbereiche:

- Die erforderlichen Betondeckungen sind bedingungsgemäß nicht einhaltbar. Hierzu wird aber nur das Beispiel des bewehrten Mauerwerkes genannt.
- Es liegen besondere Betonarten vor, die den Bewehrungsstahl nicht oder nur ungenügend schützen. Hierzu zählen die Leichtbetone mit Ausnahme des Gasbetons.
- Der Korrosionsschutz wird als Sicherheitsreserve eingeplant.

In diesem Fall sind zu unterscheiden:

- a) anomaler Beton (Chloride im Anmachwasser),
- b) anomale Konstruktion (geringe Betondeckung),
- c) anomale Korrosionsbelastung (Salzwasser).

Von diesen Möglichkeiten scheiden sicherlich der Fall a), wahrscheinlich aber auch der Fall b) aus. Korrosionstechnisch wäre eine Schutzwirkung durch Feuerverzinken bei a) und c) nur zeitweise, bei Fall b) dagegen gut möglich.

Bei realistischer Betrachtung der korrosionstechnischen Möglichkeiten und der praktischen Gegebenheiten verbleibt als mögliches Anwendungsgebiet nur der Fall b), wobei vor allem an eine Schutzwirkung bei Rißbildung zu denken ist. Für eine Reduktion der Betondeckung bei feuerverzinktem Bewehrungsstahl fehlen durchschlagende Argumente.

Insgesamt verbleibt die Schutzmaßnahme Feuerverzinken im Bereich der Vorsorge gegen Korrosion bei Carbonatisieren.

Für die korrosionstechnisch wichtigeren Probleme des Korrosionsschutzes in den Fällen a) und c) stellt die Feuerverzinkung keine dauerhafte Lösung dar. Es ist aufgrund der Schrifttumsangaben nicht zu vertreten, feuerverzinkten Bewehrungsstahl als vorsorgliche Schutzmaßnahme gegen eine befürchtete Salzwasserbelastung (mariner Bereich oder Tausalze) einzusetzen, weil die Schutzwirkung zeitlich begrenzt ist.

Ein weiterer Punkt betrifft korrosionstechnische Alternativen. Dazu kommen in Frage:

- Beschichten z. B. mit Epoxidharzen. Gegen diese Alternative können keine korrosionstechnischen Einwände erhoben werden. Mit diesen Maßnahmen sollten sich die Problemfälle a) und c) lösen lassen.
- Einsatz von korrosionsbeständigen Werkstoffen, z. B. nichtrostende Stähle. Diese Alternative ist für den Einsatzbereich Leichtbeton untersucht [32]. Auf weitere Entwicklungen (Werkst-Nr. 1.4003) soll nur hingewiesen werden.

Insgesamt folgt aus dieser Betrachtung, daß der Einsatz von feuerverzinktem Bewehrungsstahl allenfalls für wenige Sonderfälle Interesse finden kann und daß die größeren Probleme durch Salzbelastung nicht sicher gelöst werden können. Nur zur Vervollständigung soll noch darauf hingewiesen werden, daß beim Einsatz von verzinktem Bewehrungsstahl auch auf korrosive Baustoffe zu achten ist [30].

4.2 Schutz fremder Objekte

Beim Schutz fremder Objekte besteht eine andere Interessenslage, da nicht die Stahlbeton-Konstruktion, sondern fremde Objekte gefährdet werden, wobei nach dem Verursacherprinzip der Ersteller oder Eigner von Stahlbeton-Fundamenten auf seine korrosionsgefährdende Wirkung hin angesprochen werden könnte. Die Langzeituntersuchungen haben hierzu aber gezeigt, daß eine Verzinkung des Bewehrungsstahls im Gegensatz zu

früheren Annahmen keine einfache Lösung zur Verminderung der Wirksamkeit von Fremdkathoden darstellt.

Wenn man bei Berücksichtigung der erheblichen Aufwendungen für die Installation eines lokalen kathodischen Schutzes in Industrieanlagen betonstahlseitige Lösung erörtert, dürfte wohl die Feuerverzinkung zugunsten der Epoxidharzbeschichtung ausscheiden.

Literatur

- [1] H. Kaesche: Zum Elektrodenverhalten des Zinks und des Eisens in Calciumhydroxidlösung und in Mörtel, Werkstoffe und Korrosion 20 (1969), S. 119-124.
- [2] H. Martin u. A. Rauen: Untersuchungen über das Verhalten verzinkter Bewehrung in Beton, Deutscher Ausschuß für Stahlbau, Heft 242, Berlin Dezember. 1974 (GAV-Ber. Nr. 68 (GAV-Ber. Nr. 68)).
- [3] P. Heiligenstaedt u. K. Bohnenkamp: Untersuchungen zum wasserstoffinduzierten Sprödbruch verzinkter Spannstähle in Beton, Arch. Eisenhüttenwesen 47 (1976) S. 107-122.
- [4] G. Rehm, u. U. Nürnberger: Eigenschaften von feuerverzinkten Überzügen auf kaltumgeformten Spannstählen, Stahl & Eisen 98 (1978), S. 399-402 (GAV-Ber. Nr. 76).
- [5] G. Rehm u. U. Nürnberger: Technologische Eigenschaften kaltgezogener und nachträglich feuerverzinkter Spannstähle, Stahl & Eisen 98 (1978), S. 399-402 (GAV-Ber. Nr. 77).
- [6] H. Hildebrand u. W. Schwenk: Korrosionsverhalten von Stahl in Zementmörtel, 3R international 18 (1979), S. 285-287.
- [7] E. Riecke: Untersuchungen über den Einfluß des Zinks auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen, Werkstoffe u. Korrosion 30 (1979), S. 619-631 (GAV-Ber. Nr. 79).
- [8] D. Horstmann u. E. Riecke: Fracture characteristics of hot dip galvanised steels in prestressed concrete in cases of corrosion in neutral and alkaline media, 12. intern. Verzinkertagung, Paris 1979, Proceedings S. 111-114, Portcullis Press, London 1981.

- [9] H. Hildebrand u. W. Schwenk: Korrosionsschäden an erdverlegten Stahlrohren und -behältern bei Kontakt mit Stahl in Beton, *Der Stahlbau* 49 (1980), S. 56-57.
- [10] GAV Vortrags- und Diskussionstagung Hannover 1980, GAV-Schrift IV, Düsseldorf 1980.
- [11] D. Horstmann: Stand der Untersuchungen zum Feuerverzinken von Beton- und Spannstählen, in [10], S. 95-137.
- [12] R. Schneider: Zur Frage der Zulassung des Einsatzes von feuerverzinkten Beton- und Spannstählen, in [10], S. 149-157.
- [13] W. Schwenk: Diskussionsbeitrag über Korrosionsschäden an erdverlegten Rohren und Behältern aus Stahl bei Kontakt mit Stahl in Beton, in [10], S. 139-148.
- [14] U. Nürnberger: Eigenschaften von feuerverzinkten Überzügen auf kaltumgeformten Betonrippenstählen und Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl, *Deutscher Ausschluß für Stahlbeton*, Berlin, Januar 1981, Heft 318, S. 3-30 (GAV-Ber. Nr. 82).
- [15] U. Nürnberger: Technologische Eigenschaften von kaltumgeformten Betonrippenstählen aus kaltgewalztem Betonrippenstahl nach einer Feuerverzinkung, *Deutscher Ausschluß für Stahlbeton*, Berlin, Januar 1981, S. 31-50 (GAV-Ber. Nr. 83).
- [16] R. Mang, H.-H. Müller: Untersuchungen zur Anwendbarkeit feuerverzinkter Bewehrung im Stahlbetonbau, *Stahl & Eisen* 102 (1982), S. 889-894 (GAV-Ber. Nr. 90).
- [17] J. Rückert u. F. Neubauer: Zum Kontaktverhalten von feuerverzinktem und unverzinktem Bewehrungsstahl in Beton bei erhöhter Temperatur, *Werkstoffe und Korrosion* 34 (1983), S. 295-299 (GAV-Ber. Nr. 92).
- [18] H. Hildebrand, M. Schulze u. W. Schwenk: Korrosionsverhalten von Stahl in Zementmörtel bei kathodischer Polarisierung in Meerwasser und in 0,5 M NaCl-Lösung, *Werkstoffe u. Korrosion* 34 (1983), S. 281-286.
- [19] U. Nürnberger: Korrosionsverhalten verzinkter Spannstähle in gerissenem Beton, *Deutscher Ausschluß für Stahlbeton*, Heft 353, Berlin, 1984 (GAV-Ber. Nr. 94).
- [20] P. Schießl u. U. Schwarzkopf: Verbundverhalten von feuerverzinkten Betonrippenstählen in Mauerwerk, *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 51 (1985), S. 735-740 (GAV-Ber. Nr. 99).
- [21] H. Hildebrand u. W. Schwenk: Einfluß einer Verzinkung auf die Korrosion von mit Zementmörtel beschichtetem Stahl in NaCl-Lösung, *Werkstoffe u. Korrosion* 37 (1986), S. 163-169.
 - a) Untersuchungen nach [21] mit Portlandzement-Mörtel
 - b) W. Schwenk: unveröffentlichte Untersuchungen an unverzinkten Stahlproben mit Hochfenzement-Mörtel in Ergänzung zu a), 1990.
- [22] H. Hildebrand, C.-L. Kruse u. W. Schwenk: Einflußgrößen der Fremdkathoden aus Bewehrungsstahl in Beton auf die Erdbodenkorrosion von Stahl, *Werkstoffe u. Korrosion* 38 (1987), S. 696-703 (GAV-Ber. Nr. 103).
 - a) Der Bericht nach [22] umfaßt die Auswertungen über drei Jahre.
 - b) H. Hildebrand: Korrosionsverhalten von Stahlbauteilen im Erdboden bei Kontakt mit Stahl in Beton (Auswertung der Ergebnisse für das 4. Jahr), Bericht für den GAV vom 15. 03. 1988.
- [23] R. Koch u. R. Wohlfahrt: Einfluß von Betonzustatzstoffen und -mitteln auf das Verbundverhalten feuerverzinkter Betonstähle, *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 54 (1988), S. 64-70 (GAV-Ber. Nr. 106).
- [24] G. Rehm, U. Nürnberger u. B. Neubert: Chloridkorrosion von Stahl in gerissenem Beton; Auslagerung gerissener, mit unverzinkten und feuerverzinkten Stählen bewehrter Stahlbetonbalken auf Helgoland, *Deutscher Ausschluß für Stahlbeton*, Berlin, 1988, Heft 390, S. 89-144 (GAV-Ber. Nr. 107).
- [25] R. Koch u. R. Wohlfahrt: Verzinkte Stäbe - Rippengeometrie und Verbundverhalten feuerverzinkter Betonstähle, *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 55 (1989), S. 52-57 (GAV-Ber. Nr. 110).
- [26] U. Nürnberger: Korrosion und Korrosionsschutz der Bewehrung im Massivbau (neuere Forschungsergebnisse, Folgerungen für die Praxis, Hinweise für das Regelwerk), *Deutscher Ausschluß für Stahlbeton*, Berlin, 1990, Heft 405, S. 82-96.
- [27] GAV Vortrags- und Diskussionstagung Iserlohn 1990, GAV-Schrift VII, Düsseldorf 1991.

- [28] M. Martin: Feuerverzinkter Bewehrungsstahl für bewehrtes Mauerwerk, in [27], S. 187-202.
- [29] U. Nürnberger: Einfluß einer Feuerverzinkung und PVC-Beschichtung von Bewehrungsstählen und von Inhibitoren auf die Korrosion von Stahl in gerissenem Beton, Werkstoffe u. Korrosion 42 (1991), S. 537-546.
- [30] U. Nürnberger: Korrosionsverhalten von Zinküberzügen bei Kontakt mit Baustoffen, in [27], S. 203-226.
- [31] U. Nürnberger, T. Mansour, W. Beul u. G. Onuseit: Korrosionsverhalten feuerverzinkter Bewehrung in Leichtbeton, Mitteilung 83/1992 der FMPA Baden-Württemberg, Stuttgart (GAV-Ber. Nr. 120).
- [32] H. Gräfen u. A. Rahmel: Korrosion verstehen - Korrosionsschäden vermeiden, 20 Jahre FE-KKs, Kapitel 16, Verlag I. Kuron, Bonn 1994.
- [33] U. Nürnberger u. K. Menzel: zerstörungsfreier Nachweis der Korrosion an Bewehrungsstahl in Beton, in [32], S. 687-689.
- [34] U. Nürnberger: Korrosion von Bewehrungsstahl in gerissenem Beton, in [32], S. 690-692.
- [35] P. Schießl, W. Breit u. M. Raupach: Untersuchungen über den kritischen, korrosionsauslösenden Chloridgehalt und die Korrosionsgeschwindigkeit des Bewehrungsstahls in Stahlbeton bei Chlorideinwirkung auf die Betonoberfläche, in [32], S. 697-700.
- [36] W. v. Baeckmann, W. Schwenk u. W. Prinz: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes, 3. Auflage, VCH-Verlag, Weinheim 1989.
- [37] B. Isecke: Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstahl in Betonbauten, in [36], Kapitel 19.
- [38] W. Schwenk: Prinzipien des korrosionschemischen Verhaltens von Baustahl, Betonwerk + Fertigteil-Technik 51 (1985), S. 216-223.
- [39] H. Hildebrand und M. Schulze: Korrosionsschutz durch Zementmörtelauskleidungen in Rohren, 3R international 25 (1986), S. 242-245.
- [40] W. Schwenk: Elektrochemische und korrosionschemische Untersuchungen an unlegiertem Stahl in Zementmörtel, 3R international 28 (1989), S. 666-668.
- [41] C.-L. Kruse: Ausarbeitung (in Vorbereitung) für den GAV (Wellenkanal TU Hannover) und persönliche Mitteilung 1996.
- [42] H. H. Müller: Untersuchungen des Einflusses einer Feuerverzinkung auf das Korrosionsverhalten von unbehandeltem Betonrippenstahl, TU München, Abschlußbericht zum GAV-Ber. Nr. 90, Dezember 1995.
- [43] Deutsches Institut für Bautechnik, Zulassungsbescheid für feuerverzinkte Betonstähle vom 01. 12. 1989, Ergänzung vom 01. 12. 1994.