

## **Standzeiterhöhung von thermisch gespritzten Zinkanoden zum Korrosionsschutz von Stahlbetonstrukturen durch zusätzliche organische Beschichtungen**

Jochen Priestersbach, Armin Melzer, Jürgen Wisniewski, Andrea Winkels  
Grillo-Werke AG, Duisburg /D

Michael Knepper  
OSU Maschinenbau GmbH, Duisburg/D

### **Kurzfassung**

Korrosionsschäden an Stahlbetonstrukturen sind weit verbreitet und führen häufig zu schweren Schäden und damit aufwendigen Reparaturmaßnahmen. Die Installation eines aktiven Korrosionsschutzsystems für Stahlbetonbauwerke, die unter stark korrosiven Umgebungsbedingungen errichtet worden sind, ist daher notwendig. Thermisch gespritzte Zinkbeschichtungen auf Stahl haben sich zum Korrosionsschutz bestens bewährt und sind weit verbreitet. Diese Systeme haben einen großen Stellenwert im Korrosionsschutz erreicht, da sie große Vorteile hinsichtlich ihrer Effektivität und den geringen Kosten bieten. Mittlerweile werden thermisch gespritzte Zinkbeschichtungen auch für den Korrosionsschutz der Stahlbewehrung in Stahlbetonstrukturen eingesetzt. Sie können zum Korrosionsschutz von reparaturbedürftigen Stahlbetonbauwerken, als auch für Neubauten eingesetzt werden. In diesem Beitrag wird über die Einsatzmöglichkeiten und Leistungsfähigkeit der Spritzverzinkung von Stahlbeton mit zusätzlicher organischer Beschichtung berichtet. Hierbei wird neben Laboruntersuchungen auch über ein Projekt an einer Marinen Stahlbetonstruktur im Arabischen Golf berichtet.

### **Einleitung**

Zum kathodischen Korrosionsschutz der Stahlbewehrung im Beton sind in den letzten Jahren signifikante Fortschritte bei der Entwicklung von speziellen Opferanoden gemacht worden. Unter normalen klimatischen Bedingungen ist die Stahlbewehrung durch die natürliche Alkalität des Betons ( $\text{pH} > 12.5$ ) ausreichend vor Korrosion geschützt. Dieser pH Wert führt zu einer Passivierung der Stahloberfläche, welche die Korrosion unterbindet. Ungünstige Umweltbedingungen oder eine fehlerhafte Ausführung während der Bauphase sind häufig die Ursachen für Korrosionsschäden, die weltweit zu umfangreichen Reparaturmaßnahmen führen.

Abplatzungen der Betondeckung sind auf die sich bildenden Korrosionsprodukte auf der Stahlbewehrung zurückzuführen, die ein fünffaches Volumen des Stahles einnehmen

können. Verschiedene Umweltbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit), aber auch betonspezifische Ursachen (Zementtyp, Wasser-Zement Verhältnis, Additive) haben einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Passivierung der Stahlbewehrung [1-3]. Korrosionsmechanismen im Beton sind die Karbonatisierung und die Chloridkontaminierung (kritischer Chloridgehalt im Beton). Gerade in Maritimer Umgebung ist das Eindringen von Chloridionen durch Salzwasser eine häufige Ursache für die Korrosion der Stahlbewehrung im Beton. Das trifft aber ebenfalls auf Inlandbauwerke zu, die durch saisonale Gründe mit Chloridionen belastet werden, z.B. durch Streusalz im Winter.

### **Aktiver Korrosionsschutz**

Beim kathodischen Korrosionsschutz bleibt die zu schützende Oberfläche weiterhin ganz oder zumindest teilweise dem aggressiven Medium ausgesetzt, wobei jedoch ein aktiver Eingriff in die Korrosionsprozesse vorgenommen wird. Hierbei werden Elektronen, die von einer Opferanode geliefert werden, der zu schützenden Stahlbewehrung angeboten. Das wird erreicht durch eine elektrische Verbindung zwischen der Opferanode und der Stahlbewehrung. Der elektrische Stromkreis wird dann durch den Beton, der gleichzeitig den Elektrolyten bildet, geschlossen. Auf diese Weise wird ein Stromfluss realisiert, wobei die negativen Chloridionen zu der Anode wandern und sich somit von der Stahlbewehrung weg bewegen. Ein galvanisches Korrosionsschutzsystem erfordert einen stetigen elektrischen Stromfluss von der Anode zur Stahlbewehrung.

Bei kathodischen Korrosionsschutzsystemen, die mit Fremdstrom arbeiten, werden die Elektronen von einer Gleichstromquelle bereitgestellt. Titannetze werden hier als Anode verwendet, die unter einer frischen Schicht aus Spritzbeton verlegt werden. Hohe Kosten für die Titannetze und die Notwendigkeit diese Netze im Beton einzubetten, führten zur Entwicklung der Spritzverzinkung der Betonoberfläche. Die thermisch gespritzte Zinkanode kann sowohl galvanisch als auch mit Fremdstrom betrieben werden.

### **Die Spritzverzinkung als Anode**

Galvanische kathodische Korrosionsschutzsysteme (GCP), welche Opferanoden einsetzen, zeichnen sich durch ihren einfachen Aufbau aus und stehen als Alternative zu Fremdstromsystemen (ICCP) zur Verfügung [4]. Im Gegensatz zu Fremdstromsystemen benötigen diese keine aufwendige elektrische Verkabelung und keine Stromquelle.

Thermisch gespritzte Zinkanoden wurden 1983 zuerst in den USA für den Korrosionsschutz von Stahlbeton untersucht [5]. Prinzipiell kann die Spritzverzinkung in drei verschiedene kathodische Korrosionsschutzsysteme eingeteilt werden:

1. Als galvanisches kathodisches Korrosionsschutzsystem bei Reparaturarbeiten ohne eine Reprofilierung der Betonoberfläche. Bei diesem System werden Betonabplatzungen nicht wieder mit neuem Beton versehen, d.h. die Betonoberfläche wird nicht repariert. Die Zinkspritzschicht wird direkt auf den freiliegenden Stahl aufgebracht.
2. Als galvanisches kathodisches Korrosionsschutzsystem mit Reprofilierung der Betonstruktur. Dieses System ist immer dann anwendbar, wenn Abplatzungen aufgetreten sind oder diese bereits repariert worden sind. Diese Variante erlaubt die Messung der galvanischen Schutzströme zwischen Bewehrung und Zinkspritzschicht. Durch elektrische Widerstände können die galvanischen Schutzströme zusätzlich geregelt werden. Ferner ist die Möglichkeit vorhanden eine zusätzliche Fremdstromquelle zu installieren, so dass durch diese Maßnahme ein Fremdstromsystem aufgebaut werden kann.
3. Als Fremdstromsystem mit Zinkspritzschicht. Bei diesem System muss die Betonstruktur reprofiliert werden. Der kathodische Korrosionsschutz wird hierbei durch eine Gleichstromquelle erzeugt, die zwischen Stahlbewehrung und Zinkschicht geschaltet wird.

Die wesentlichen Unterschiede der oben beschriebenen Systeme werden in Tabelle 1 dargestellt. Bild 1 zeigt das Korrosionsschutzsystem als galvanisches System und als Fremdstromsystem.

	Galvanisch ohne Reprofilierung	Galvanisch mit Reprofilierung	Fremdstromsystem
Reprofilierung erforderlich	nein	ja	ja
Schutzstrom messbar	nein	ja	ja
Schutzwirkung nachweisbar	nein	ja	ja
Schutzstrom regelbar	nein	bedingt	ja
Fremdstrom nachrüstbar	nein	ja	ja
Einsatz in trockener Umgebung	mit organischer Beschichtung	mit organischer Beschichtung	ja
Einsatz in feuchter Umgebung	ja	ja	möglich, aber nicht notwendig

Tab. 1: Unterschiedliche Korrosionsschutzsysteme durch Spritzverzinkung [6]

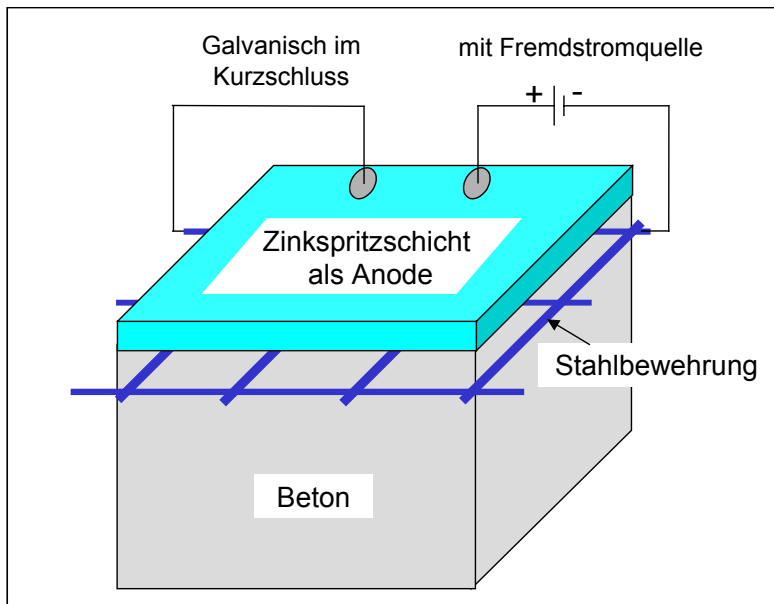


Bild 1: Spritzverzinkung mit und ohne Fremdstrom

Grundsätzlich muss vor der Auswahl des jeweiligen Systems eine Studie durchgeführt werden, ob eine zusätzliche Fremdstromquelle notwendig ist. Optimale Bedingungen für das Korrosionsschutzsystem ohne Fremdstrom sind in Regionen ohne lange trockene Perioden, wie Küsten- und Tropenregionen, zu finden.

### **Thermisches Spritzen von Zink auf Beton**

Thermische Spritzschichten mit Zink und Zinklegierungen werden entweder mit dem Drahtlichtbogenspritzverfahren oder dem Drahtflammspritzverfahren hergestellt. Das Drahtlichtbogenspritzen (Bild 2) arbeitet mit zwei Drähten, die in einer Spritzpistole zusammengeführt werden. Die beiden Drähte sind elektrisch verschaltet, sodass sich ein Lichtbogen an den Drahtenden ausbildet, der zum Aufschmelzen der Drahtspritzen führt. Es bilden sich Schmelztropfen, die durch Druckluft zerstäubt und auf die Substratoberfläche hin beschleunigt werden. Beim Aufprall auf die zu beschichtende Oberfläche erstarren die Tropfen und bilden eine festhaftende Beschichtung aus [7].

Beim Drahtflammspritzen (Bild 3) wird ein Brenngas (Acetylen-Sauerstoff oder Propan-Sauerstoff) eingesetzt, um den Draht aufzuschmelzen. Hierbei wird nur ein Draht in die Flamme geführt. Die sich bildenden Schmelztropfen werden durch ein zusätzliches Zerstäubergas (Druckluft) in Richtung auf die Substratoberfläche hin beschleunigt.

Bezüglich der Kosten und Wirtschaftlichkeit verfügt das Drahtlichtbogenspritzen über deutliche Vorteile gegenüber dem Drahtflammspritzen. Die Anlagenkosten beim

Drahtlichtbogenspritzern sind zwar etwas höher, was aber durch die höheren Abschmelzleistungen und die geringeren Betriebskosten schnell ausgeglichen wird [8]. So sind bereits Drahtlichtbogenspritzbrenner im Einsatz, die in der Lage sind bis zu 200 kg Zinkdraht pro Stunde zu verspritzen.

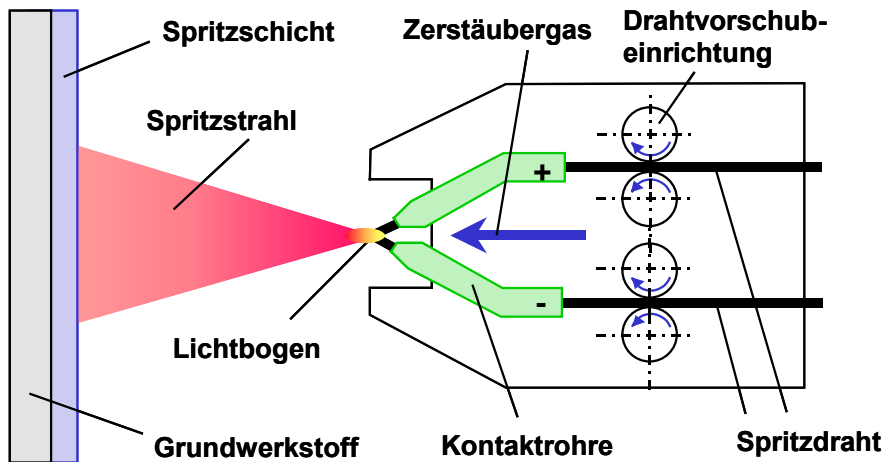


Bild 2: Prinzip des Drahtlichtbogenspritzens DIN EN 657

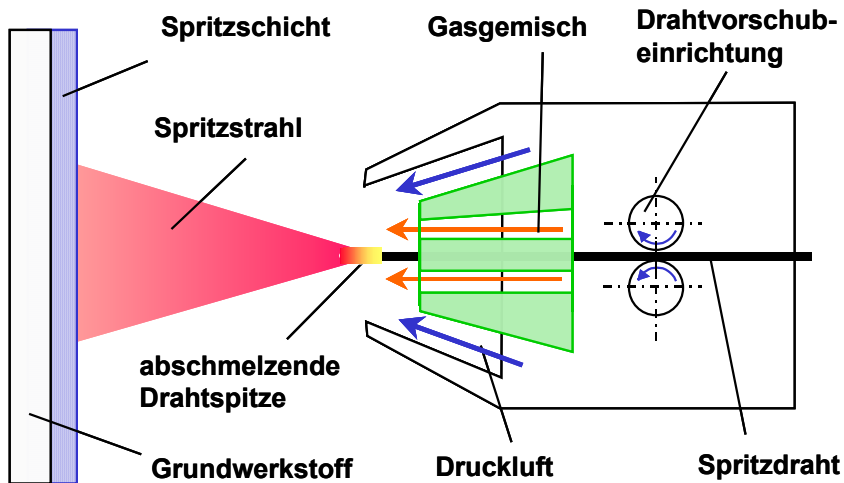


Bild 3: Prinzip des Drahtflammspritzens DIN EN 657

Bei der Spritzverzinkung von Beton muss die Betonoberfläche zunächst gereinigt und aufgeraut werden, damit eine gute mechanische Haftfestigkeit erreicht wird. Zusätzlich wird die Betonoberfläche unmittelbar vor der Beschichtung vorgewärmt, um die Restfeuchtigkeit an der Betonoberfläche zu entfernen. Die Spritzverzinkung wird dann in mehreren Lagen aufgebracht. Über spezielle elektrische Kontakte wird die Zinkschicht mit der Stahlbewehrung verbunden. Die Schichtdicke der Zinkanode beeinflusst die

Lebensdauer des Korrosionsschutzsystems und liegt gewöhnlich im Bereich von 300 bis 500  $\mu\text{m}$ . Die Haftfestigkeit der Zinkschicht liegt im Bereich von 1.5 bis 3.5 Mpa. Spezielle Meßmethoden ermöglichen die Bestimmung der mechanischen Stabilität der Zinkschicht auf dem Beton.

Studien, die in den USA durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass die Lebensdauer einer thermischen Spritzverzinkung auf Beton bis zu 20 Jahren betragen kann, sofern eine korrekte Analyse der Betonstruktur sowie der vorherrschenden Umgebungsbedingungen durchgeführt worden ist [9].

### **Verlängerung der Lebensdauer durch zusätzliche organische Beschichtungen**

Die Lebensdauer einer Zinkbeschichtung kann deutlich verlängert werden, wenn eine zusätzliche organische Beschichtung auf die Zinkschicht aufgebracht wird (Bild 4). Dieses System ist anwendbar für alle Stahlbetonstrukturen und wurde entwickelt von Grillo-Werke AG 1997 auch für besonders aggressive Umgebungsbedingungen.

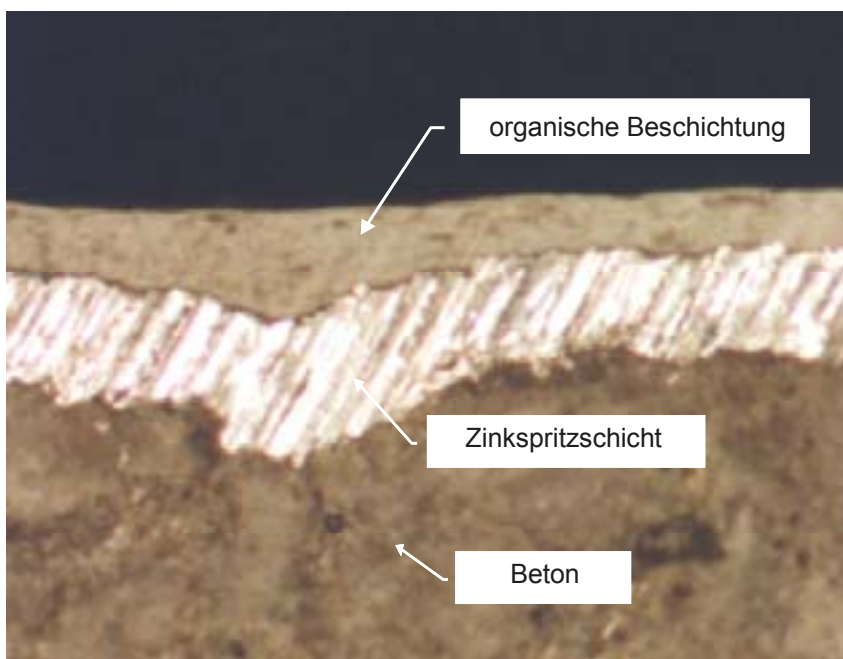


Bild 4: Zinkspritzschicht auf Beton mit organischer Beschichtung

Die Vorteile der zusätzlichen organischen Beschichtung liegen darin, dass die Zinkschicht keinen direkten Kontakt mit der Atmosphäre hat und daher keiner äußeren Korrosion unterliegt. Der Zinkverbrauch, d.h. die anodische Auflösung der Zinkschicht, findet nur im Interface zwischen Beton und Zinkschicht statt. Auf diese Weise kann der Zinkverbrauch um etwa 50 % reduziert werden. Die Lebensdauer der Spritzverzinkung kann nach dem 2

Faraday'schen Gesetz berechnet werden. Ein weiterer wesentlicher Vorteil liegt darin, dass ein weiteres Eindringen von Chloridionen durch die dichte organische Beschichtung verhindert wird.

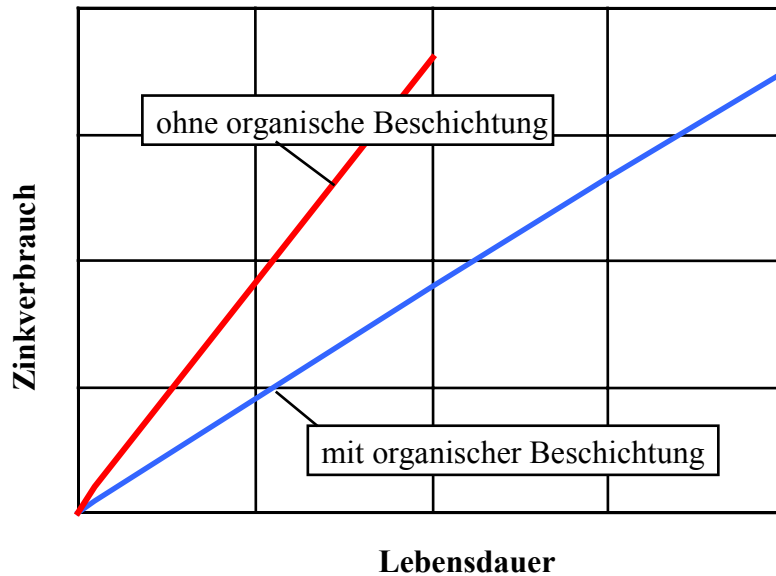


Bild 5: Lebensdauererläuterung durch eine zusätzliche organische Beschichtung

In Laboruntersuchungen sind unterschiedliche Kombinationen von Zinkspritzschichten und organischen Beschichtungen getestet worden. Auf diese Weise wurden die günstigsten Systemkonfigurationen ermittelt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen wurde hierbei auf die Haftfestigkeit des Beschichtungssystems auf der Betonoberfläche gelegt. Gleichzeitig wurde das anodische Verhalten der Zinkschicht untersucht. Korrosionsuntersuchungen wurden auch unter beschleunigten Laborbedingungen im Salzsprühtest durchgeführt. Es wurde beobachtet, dass die richtige Auswahl der organischen Beschichtung auf der Zinkschicht von großer Bedeutung für die Haftfestigkeit auf dem Beton und das Verhalten der Zinkschicht als Anode ist. Aus den erzielten Ergebnissen wurden verschiedene Systeme ausgewählt. Auf einem Außenprüffeld der Grillo-Werke AG wurden diese Proben anschließend ausgelagert (Bild 6). Um Meeresbedingungen simulieren zu können, wurden diese Betonproben mit NaCl kontaminiert. Seit der Installation der Proben werden permanent Schutzströme und Potentialmessungen durchgeführt. Ferner werden regelmäßig Depolarisationskurven aufgenommen. Bild 7 zeigt die Depolarisationskurve einer Probe mit zusätzlicher organischer Beschichtung. Diese Ausschaltmessung wurde 1,5 Jahre nach der Installation durchgeführt. Es ist der Potentialverlauf der Stahlbewehrung und der Zinkschicht dargestellt, nachdem die Stahlbewehrung von der Zinkschicht elektrisch getrennt worden ist. Der Potentialverlauf der Stahlbewehrung ist ein entscheidendes Kriterium für die kathodische Schutzwirkung durch die Zinkschicht. Hierbei muss das sogenannte 100 mV Kriterium erfüllt werden, d.h. es muss ein Potentialabfall an der

Stahlbewehrung von 100 mV innerhalb von 4 Stunden nach der elektrischen Trennung erreicht werden. In Bild 7 sind aktuelle Messergebnisse an einer spritzverzinkten Betonprobe mit zusätzlicher organischer Beschichtung dargestellt. Das 100 mV Kriterium wurde an dieser Probe bereits nach weniger als 15 Minuten erreicht. Diese Werte verdeutlichen das ausgezeichnete Funktionieren dieses kathodischen Korrosionsschutzsystems. Für die Potentialmessungen werden Mangandioxid Referenzelektroden verwendet, die fest in den Betonproben eingebaut sind.

Vergleichende Untersuchungen mit spritzverzinkten Proben ohne zusätzliche organische Beschichtung ergaben, dass die erzielten Schutzströme bei den Proben mit organischer Beschichtung deutlich konstanter und weniger abhängig von der Feuchtigkeit sind. Gleichzeitig liegen die Schutzströme insgesamt auf einem höheren Niveau.



Bild 6: Spritzverzinkte Betonprobe mit organischer Beschichtung im Außenprüffeld der Grillo-Werke AG

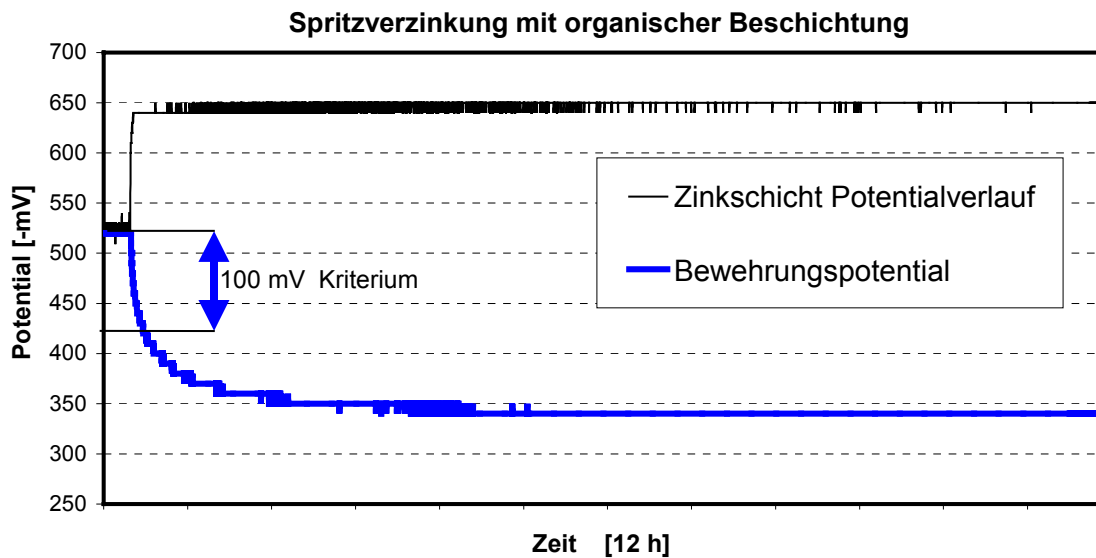


Bild 7: Potentialverlauf einer spritzverzinkten Betonprobe mit organischer Beschichtung (Ausschaltmessung 1,5 Jahre nach der Installation)

### Anwendung der thermischen Spritzverzinkung von Beton im Arabischen Golf

An Stahlbetonstrukturen im Arabischen Golf wurde die Spritzverzinkung als kathodisches Korrosionsschutzsystem von den Grillo-Werken AG installiert. Die Betonstrukturen unterliegen einer extremen Chloridbelastung, da sie direkt im Meer errichtet worden sind. Aufgrund der Korrosionsschäden wurden diese Bauten 1997 repariert und zum kathodischen Korrosionsschutz wurde eine Spritzverzinkung aufgebracht. Als Spritzverfahren wurde hier das Drahtlichtbogenspritzen eingesetzt. Zusätzlich wurde die Zinkschicht mit einer organischen Beschichtung versehen. Folgende Arbeitsschritte waren an jeder Betonstruktur notwendig:

- Entfernen des losen Betons
- Installation von Referenzelektroden und der elektrischen Kontakte
- Reprofilierung der Betonstruktur durch Spritzbeton
- Sandstrahlen der Betonoberfläche
- Aufbringen der Zinkschicht durch Drahtlichtbogenspritzen
- Aufbringen der organischen Beschichtung

Zur Kontrolle der Funktionstüchtigkeit des Korrosionsschutzsystems wurde zusätzlich ein Monitoring System installiert. Auf diese Weise können die statischen Potentiale gemessen werden. Bild 8 zeigt eine der galvanisch geschützten Betonstrukturen 1,5 Jahre nach Installation des CP-Systems.



Bild 8: Betonstruktur im Arabischen Golf 1,5 Jahre nach Installation des CP-Systems (1999)

Bislang zeigten alle galvanisch geschützten Betonstrukturen keine Anzeichen von Korrosion. Die gesammelten Monitoring Daten zeigen, dass die Stahlbewehrung gut kathodisch geschützt ist. Die erzielten statischen Potentialmessungen im April 1999 waren alle positiver als  $-520$  mV (Bild 9). Ein möglicher Korrosionsangriff ist erst bei statischen Potentialen negativer als  $-800$  mV zu erwarten. Unwesentliche zeitlich bedingte Abweichungen der einzelnen statischen Potentialwerte werden durch die klimatischen Verhältnisse beeinflusst und sollten nicht als kritisch betrachtet werden. Statische Potentiale, die an sechs verschiedenen Stellen einer Betonstruktur aufgenommen wurden, ergaben eine Stabilisierung der Werte mit zunehmender Zeit nach der Installation.

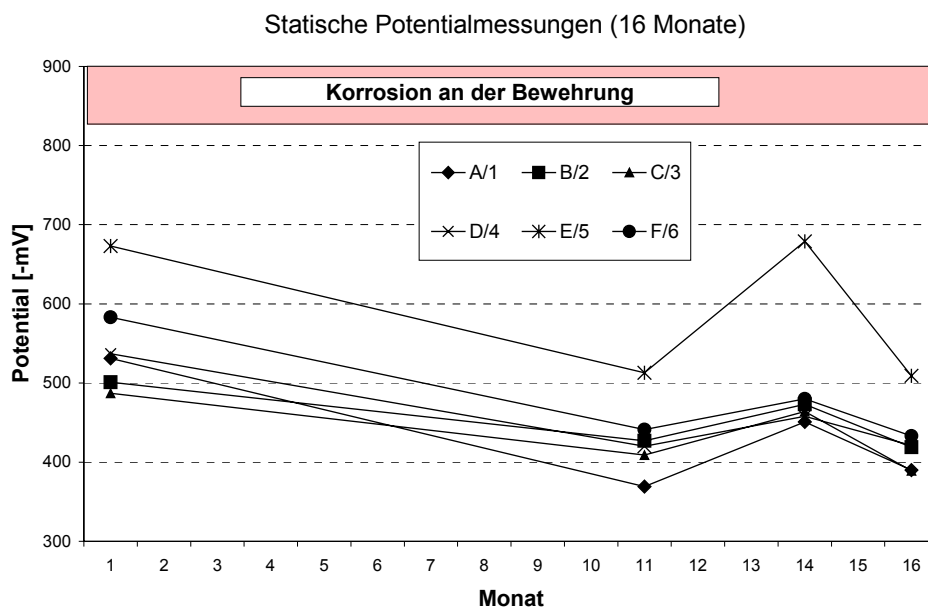


Bild 9: Statische Potentiale an sechs verschiedenen Stellen einer Betonstruktur (Mangandioxid Referenzelektroden)

### **Zusammenfassung**

Die Spritzverzinkung zum kathodischen Korrosionsschutz der Stahlbewehrung von Stahlbetonstrukturen unterliegen in ihrer Anwendung keinen Einschränkungen im Vergleich zu anderen kathodischen Korrosionsschutzsystemen. Der galvanische Korrosionsschutz mittels einer Spritzverzinkung hat deutliche Vorteile gegenüber anderen Verfahren, da keine zusätzlichen elektrischen Installationen notwendig sind. Die thermisch gespritzten Zinkanoden können leicht wieder erneuert werden, sofern die Zinkschicht sich verbraucht bzw. für die Stahlbewehrung geopfert hat. Das Drahtlichtbogenspritzverfahren hat sich für diese Anwendung als ein sehr praktikables und wirtschaftliches Verfahren bewährt.

Auf einem Außenprüffeld wurden Untersuchungen mit verschiedenen Betonproben durchgeführt. Diese Untersuchungen zeigen, dass durch eine zusätzliche organische Beschichtung auf der Zinkschicht, die erzielten Schutzströme deutlich konstanter und weniger abhängig von der Feuchtigkeit sind. Gleichzeitig liegen die Schutzströme insgesamt auf einem höheren Niveau. Die Untersuchungen auf dem Prüffeld werden fortgesetzt.

Die Lebensdauer einer Spritzverzinkung auf Beton kann schon ohne zusätzliche organische Beschichtung bis zu 20 Jahren betragen. Entscheidend für die Lebensdauer eines galvanischen Korrosionsschutzsystems ist, dass eine korrekte Analyse der Betonstruktur und der klimatischen Umgebungsbedingungen durchgeführt wird. Durch die zusätzliche organische Beschichtung der Zinkschicht kann die Lebensdauer des Korrosionsschutzsystems nochmals deutlich verlängert werden.

### **Literatur**

- [1] Schießl, P., RILEM; Technical Committee 60-CSC: Corrosion of Steel in Concrete. New York: Chapman and Hall, 1988 (RILEM Report)
- [2] Nürnberger, U., Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag (1995), Wiesbaden; Berlin, ISBN: 3-7625-3199-4
- [3] Raupach, M., Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton, in: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1992), Nr. 433, Beuth-Verlag, Berlin
- [4] Bennett, J, Galvanic Cathodic Protection of Reinforced Concrete Using Surface-Applied Zinc Anodes, in: Proceedings of ICCRRCs, Orlando, Florida, 1998, Publication No. FHWA-SA-99-014
- [5] Tinnea, J.S., Field Performance of Sprayed Zinc Cathodic Protection Anodes, in: (ed: C. Coddet) Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Thermal Spray Conference 1998

- [6] Spriestersbach, J., Knepper, M., Gamroth, M., Zinkschichten zum Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken, in: Erzmetall 51 (1998) Nr. 4, 291-298
- [7] Knepper, M. Spriestersbach J., How to successfully battle corrosion: Thermally sprayed coatings of zinc and zinc alloys, in: Proceedings of the ITSC Shanghai 1997 (Nov 18-21, 1997): Surface Engineering Towards The 21<sup>st</sup>; Century Editor:X. Binishi et. Al, China Machine Press, Beijing 1997, pp. 384-391
- [8] Porter F., Corrosion Resistance of Zinc and Zinc Alloys, Marcel Dekker inc., New York 1994
- [9] Sagüés, A., Powers R.: SHRP-S-337: Sprayed Zinc Galvanic Anodes for Concrete Marine Bridge Substructures, 1993 (Strategic Highway Research Program, Washington)