

# Sachstandsbericht »Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton (KKSB)«

## 1 Einleitung

Für die Sanierung chloridbelasteter Betonflächen stellt der Kathodische Korrosionsschutz von Stahl in Beton (kurz: KKSB) ein bewährtes, wirtschaftliches und wissenschaftlich anerkanntes Instandsetzungsverfahren dar. Zahlreiche Gebäude im Bestand weisen einen unzureichenden Korrosionsschutz der Bewehrung auf, Parkhäuser und Tiefgaragen sind häufig aufgrund einer jahrelangen Streusalzbelastung mit Chloriden belastet, die Bewehrungskorrosion (chloridinduzierte Korrosion) verursachen.

Bereits 1974 veröffentlichte R. F. Stratful einen Forschungsbericht über eine KKS-Installation, die an der Sly-Park-Brücke in Kalifornien appliziert wurde (mit leitfähigem Asphalt als Fremdstromanode). Die erste KKSB-Installation in Deutschland erfolgte 1986 im Rahmen des BRITE-Forschungsprojektes an der Stützwand des Berliner Autobahnringes (leitfähige Polymeranoden als Fremdstromanoden). Diese Anlage war 15 Jahre in Betrieb [4]. In den letzten Jahren wurden KKS-Systeme besonders für die Sanierung von Tiefgaragen erfolgreich eingesetzt. Beispielsweise wurden beim Parkhaus »Am Gericht« in Frankfurt (ca. 9000 m<sup>2</sup>, 2006), beim Parkhaus des Familia Center Pforzheim (11000 m<sup>2</sup>, 2009) und bei den Parkhäusern Rathaus Galerie Essen (ca. 15000 m<sup>2</sup>, 2011) Kathodische Korrosionsschutzsysteme installiert.

## 2 Regelwerke

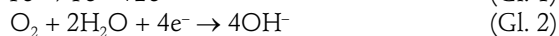
Der Kathodische Korrosionsschutz wird kurz in der DAfStb Richtlinie SCHUTZ UND INSTANDSETZUNG VON STAHLBETONBAUTEILEN (2001) als Instandsetzungsprinzip K beschrieben. Die europäische Norm DIN EN 1504-9 PRODUKTE UND SYSTEME FÜR DEN SCHUTZ UND DIE INSTANDSETZUNG VON BETONTRAGWERKEN (2008) verweist im Anhang (A.6.2.2.4.9 Prinzip 10 – Kathodischer Schutz) nach einer kurzen Beschreibung des

KKS-Verfahrens auf die DIN EN ISO 12696. In dieser Norm sind alle Anforderungen an den KKSB geregelt.

## 3 Chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton

Bei der chloridinduzierten Korrosion wird die schützende Passivschicht des Stahles, eine dünne Oxidschicht, örtlich zerstört (Depassivierung). Es entsteht eine Spannungsdifferenz zwischen dem depassivierten, unedleren Bereich (Anode) und den benachbarten passiven, edleren Bereichen (Kathode). Da beide Bereiche sowohl elektrisch über die verbundene Bewehrung als auch elektrolytisch über den umgebenden Beton verbunden sind, kommt es zur Ausbildung eines galvanischen Elementes [8].

An den depassivierten Bereichen findet die anodische Eisenauflösung statt (Gl. 1). Häufig sind die Anodenflächen deutlich kleiner als die kathodisch reagierenden Bereiche. Das führt bei gegebenem Elementstrom zwischen Anode und Kathode zu sehr hohen Stromdichten auf den Anoden. Als Folge bilden sich tiefe Rostlöcher, die den Querschnitt der Bewehrung stark verringern und zu deren Bruch führen können (Lochkorrosion). Die kathodische Reaktion findet an den passiven Bewehrungsoberflächen ohne einen Materialabtrag statt. Die Reaktion folgt direkt nach der Depassivierung dem Sauerstofftyp (Gl. 2) und wechselt schnell in den Wasserstofftyp (Gl. 3). Durch eine Reaktion der Eisenionen mit Chloridionen entsteht Salzsäure (Gl. 4), dies führt lokal zu einer Absenkung des pH-Wertes [7].



Aus den Eisenionen entstehen je nach Sauerstoffangebot und Umgebungsbedingungen unterschiedliche Korrosionsprodukte (Eisenoxide und -hydrate). Typisch für Chlo-

ridkorrosion sind keine oder nur geringe nach außen hin sichtbaren Anzeichen, wenn im Beton für die Korrosionsprodukte genügend Porenraum zur Verfügung steht [5]. Wenn die aufnehmbare Zugspannung des Betons überschritten wird, bilden sich zunächst Risse, zu einem späteren Zeitpunkt wird die Betondeckung abgesprengt [6].

#### 4 Instandsetzung von chloridbelastetem Beton

Im Rahmen einer konventionellen Betoninstandsetzung (Instandsetzungsprinzip R-Cl nach Instandsetzungsrichtlinie des DAfStb) muss der chloridbelastete Beton überall dort bis zur Bewehrung bzw. um einen Sicherheitszuschlag darüber hinaus abgetragen werden, wo der korrosionsauslösende Chloridgehalt überschritten wird. Dies ist ein großer Eingriff in die Bausubstanz, der immer mit einer hohen Lärm- und Schmutzbelastung verbunden ist. Bei den Stemmarbeiten ist eine tiefergehende Zerstörung des Betons möglich, insbesondere besteht das Risiko von Rissbildungen und einer Schädigung der Bewehrung (Querschnittsverlust, Durchtrennen). Falls Chloridionen im Beton verbleiben, besteht die Gefahr der erneuten Verunreinigung des neuen Mörtels oder Betons. Begrenzte Betonbereiche, die mit Chloridionen verunreinigt sind, können erfolgreich durch den Ersatz des gesamten verunreinigten Betons behandelt werden. Umfasst die Verunreinigung jedoch größere Bereiche, ist die Behandlung der beschädigten Bereiche allein keine dauerhafte Instandsetzungslösung [3].

Beim Kathodischen Korrosionsschutz (Verfahren K nach Instandsetzungsrichtlinie des DAfStb, Prinzip 10 nach EN 1504-9) handelt es sich um ein elektrochemisches Instandsetzungsverfahren. Mithilfe einer externen Anode und eines zwischen Anode und Bewehrung fließenden Schutzstroms wird die Bewehrung so weit in kathodische Richtung polarisiert, dass die Korrosionsstromdichte in aktiven Bereichen auf passiv-ähnliche Höhe beschränkt wird. Weiterhin werden durch den Schutzstrom die Potentialunterschiede innerhalb der Bewehrung aufgehoben. Damit wird die treibende Kraft aus dem Korrosionsprozess herausgenommen. Bei längerem Betrieb wandern im durch die geringe Treibspannung zwischen Anode und Bewehrung erzeugten elektrischen Feld die positiv geladenen Ionen ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) zur Bewehrung (Kathode) und die negativ geladenen Ionen ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) von der Bewehrung weg in Richtung Anode. Dies führt zu einer langsamen

Verringerung des Chloridgehaltes im Beton nahe der Bewehrung und zu einem Anstieg des pH-Wertes an der Bewehrungsoberfläche [8]. Mit einem Kathodischen Korrosionsschutzsystem nach EN 12696 kann die Korrosion unabhängig von der Verunreinigung des Betons mit Chloriden begrenzt und die Dauerhaftigkeit wiederhergestellt werden. Es ist besonders geeignet für Stahlbetonbauteile, die korrosionsauslösende Chloridgehalte enthalten [3]. Da der Betonabtrag nur lokal im Bereich des physikalisch geschädigten Betons erforderlich ist, handelt es sich um ein substanzschonendes und wirtschaftliches Instandsetzungsverfahren. Die Ausfallkosten der Immobilie werden aufgrund kürzerer Bauzeiten minimiert, die Lärm- und Schmutzbelastung wird gesenkt, Kosten für Abstützungsmaßnahmen werden eingespart. Die größten Vorteile bietet das KKS, wenn die Schädigung der Bewehrung noch nicht zu weit fortgeschritten ist. Die längerfristige Effektivität des Systems hängt von einer ausreichenden Überwachung und Instandhaltung ab.

Verschiedene Arten von externen Anodensystemen werden für den Kathodischen Schutz eingesetzt, es handelt sich dabei entweder um Fremdstromanoden oder um galvanische Aktivnanoden (Opferanoden).

**Galvanische Anoden** bestehen aus einem unedleren Metall mit einem negativeren Potential als die korrodierende Bewehrung (z.B. Zink). Der Schutzstrom wird durch die anodische Auflösung der Opferanode erzeugt (galvanisches Element), dabei wird die Anode oxidiert (siehe Gl. 5).

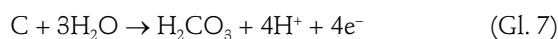


Bei diesen Anoden ist keine aufwendige Mess- und Regeltechnik erforderlich, allerdings steht nur eine relativ kleine Spannung (ca. 350 mV) zur Verfügung. Die Lebensdauer ist durch die verfügbare Zinkmasse begrenzt und liegt (nach Literaturangaben) zwischen fünf und zehn Jahren, kann aber auch deutlich länger sein. Beschichtungen aus thermisch gespritztem Zink werden durch Bogen- oder Flammgespritzten aufgebracht. Spezielle Zink-Haftfolien (die mit einem Hydrogel beschichtet sind) können auf die vorbereitete Oberfläche direkt aufgebracht werden oder röhrenförmige Anoden werden in Bohrlöcher eingebaut und miteinander verdrahtet. Eine Vielzahl von Projekten wurde bisher an Brücken, Stützen im Meerwasserbereich und an Hafengebäuden durchgeführt. Dabei zeigen die meis-

ten Installationen anfänglich gute bis sehr gute Leistungen, wobei die Problematik der Austrocknung des Betons und der damit verbundenen Abnahme der Schutzstromdichte festgestellt wird. Die Ergebnisse aus den Versuchen legen nahe, dass Zink nur unter besonderen Randbedingungen, wie hohem Chloridgehalt im Bestandsbeton und geringem elektrolytischem Widerstand eine für den Kathodischen Korrosionsschutz der Bewehrung ausreichende Leistung bringt [12]. Weiterhin wird in verschiedenen Quellen diskutiert, dass die Zinkbeschichtung auf der alkalischen Betonoberfläche passiviert und somit kein dauerhafter Schutz möglich ist. Zur Überwachung der Anlage sind in repräsentativen Bereichen nach DIN EN ISO 12696 Monitoringfelder vorzusehen. Werden die Schutzkriterien nicht erfüllt, muss für diesen Fall eine weitere Beurteilung des Korrosionsrisikos vorgenommen werden, ggf. ist das galvanische Anodensystem zu ergänzen [1].

Die Mehrheit der KKS-Installationen wird mit **Fremdstromanoden** durchgeführt, dabei wird die Treibspannung über eine externe Spannungsversorgung erzeugt und beträgt ca. 1 bis 10 V. Die Potentiale an Referenzelektroden und eine permanente Stromaufzeichnung dienen der Überwachung des Systems. Zur Überprüfung der Schutzkriterien sind Ausschalt- und Depolarisationsmessungen in regelmäßigen Abständen vorgeschrieben. Bei den Fremdstromsystemen ist zwischen Systemen mit dimensionsstabilen Anoden (DSA bzw. inerten Anoden) und solchen mit nichtinertem Material zu unterscheiden.

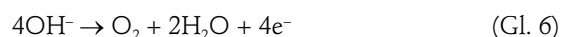
Bei den sog. leitfähigen Beschichtungen handelt es sich um **nichtinertes Material** (kohlenstoffbasiertes Anodenmaterial). Zusätzlich zu der Elektrodenreaktion nach Gl. 6 kann auch eine Oxidation des Karbons stattfinden (Gl. 7).



Um ein frühes Versagen zu verhindern, empfehlen die Hersteller eine Begrenzung der Treibspannung [11]. Es gibt organische und mineralische Systeme, der Auftrag kann mit der Rolle oder im Airlessverfahren (nach Herstellerangabe) erfolgen. Zu den Vorteilen der leitfähigen Beschichtung zählen geringere Herstellungskosten und die geringe Schichtdicke, daher sind Zusatzbelastungen zu vernachlässigen. Trotz dieser Vorteile ist der Marktanteil in Deutschland bisher gering. Dies ist hauptsächlich auf die ungeklärte Fragestellung zur Dauerhaftigkeit zurückzuführen. Während in einigen Fällen

ausreichende Stromdichten auch nach Betriebszeiten von über 15 Jahren bereitgestellt werden konnten, zeigen andere Systeme bereits nach kurzer Zeit deutliche Alterungserscheinungen [8]. Im Rahmen eines AiF Projektes wird derzeit an einem Modell zur Lebensdauerbemessung leitfähiger Beschichtungen gearbeitet.

Bei den **DSA bzw. inerten Anoden** läuft die Anodenreaktion ohne Verlust von Anodenmaterial ab (siehe Gl. 6).



Zu den DSA gehören Anoden aus aktiviertem Titanmischoxid (MMO). Die MMO Anoden werden in verschiedenen Bauformen angeboten, z.B. Bandanoden oder Gitteranoden zur Installation an der Betonoberfläche, Titanbänder oder Maschenbänder für die Installation in Schlitzen, röhrenförmige Anoden für die Einbettung in Bohrlöcher werden eingesetzt. Die elektrolytische Ankopplung erfolgt durch eine Mörtleinbettung. Das meistverwendete Anodensystem in Deutschland sind MMO-Anoden. Nach Herstellerangabe ist eine Lebensdauer zwischen 50 und 75 Jahren zu erreichen. Für MMO-Anoden liegen Untersuchungen zur Langzeitbeständigkeit, Prüfverfahren sowie Empfehlungen für die Prüfungen an Reparatur- und Einbettungsmörteln vor.

Das KKS-Verfahren ist nach DIN EN ISO 12696 geregelt. Der DAfStb hat Empfehlungen gegeben, die im Rahmen der Baugenehmigung angewendet werden sollen. Als Anoden können nach NACE TM 0294 geprüfte Titananoden ohne weiteren Nachweis empfohlen werden [11]. Die Lebensdauer der Anoden hängt von der Titanqualität, einer ausreichenden Beschichtungsstärke und von der erforderlichen Stromabgabe ab. Mindestanforderungen (z.B. an die Titanqualität, Beschichtungsstärke, Häufigkeit der werkseitigen Produktionskontrolle, Fremdüberwachung) werden nicht gestellt. Anoden mit schlechter Titanqualität und geringer Beschichtungsstärke besitzen eine geringe Lebensdauer, Plagiate sind optisch nicht von hochwertigem Material zu unterscheiden.

Einbettungsmörtel bzw. Betonersatzsystem sollten nach DAfStb die Anforderungen der Instandsetzungsrichtlinie erfüllen und zusätzlich einen ähnlichen elektrischen Widerstand wie der Betonuntergrund aufweisen. Weiterhin ist eine KKS-Funktionsprüfung am Gesamtsystem vor-

zusehen. Weitere Hinweise zur Durchführung und Auswertung der Prüfungen werden bisher nicht gegeben, daher differieren die Vorgehensweisen hier stark.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Kathodische Korrosionsschutz von Stahl in Beton hat sich als eine erfolgreiche Technik erwiesen, bei geeigneter Anwendung kosteneffektiven Korrosionsschutz von Stahl in Beton und die Standsicherheit von Stahlbetonbauteilen sicherzustellen. Die erfolgreiche Anwendung dieser Technik erfordert die sorgfältige Planung, Spezifikationen für die Materialien und Verfahrensweisen für Einbau, Prüfung, Inbetriebnahme und Betrieb. Die Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Anodensysteme ist unterschiedlich. Für die Anwendung des KKS in Beton ergeben sich hohe Anforderungen an die Materialien. Sie müssen miteinander kompatibel sein, da die Anode in engem Kontakt mit dem alkalischen Porenwasser des Betons steht und an der Berührungsfläche von Anode und Beton Säure entsteht. Zur Qualitätssicherung der Anoden und für Einbettmörtel sollten Spezifikationen festgelegt werden.

Für die dauerhafte Qualitätssicherung sind Standards insbesondere zur Dokumentation der Installation und der Anlagenüberwachung einschließlich der Messdatenerfassung von Bedeutung. Vor allem hier ergeben sich Felder für den fachlichen Erfahrungsaustausch und Ansätze für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

### Literatur

- [1] DIN EN ISO 12696:2012-05 Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton (ISO 12696:2012); Deutsche Fassung EN ISO 12696:2012
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. -DAfStb- (Hrsg.): DAfStb-Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. 2001
- [3] DIN EN 1504-9:2008-11 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 9: Allgemeine Grundsätze für die Anwendung von Produkten und Systemen; Deutsche Fassung EN 1504-9:2008
- [4] Eichler, T.; Isecke, B.: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton – Grundlagen Planung, Ausführung. In: Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen. Beton Marketing Nord, 2011
- [5] Deutscher Beton Verein e. V.: Sachstandsbericht Chloride im Beton. 1996
- [6] Stärk, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton. Basel: Birkhäuser Verlag, 2001
- [7] Beck, M.: Dissertation zur Entwicklung der Eigenkorrosion von Stahl in Beton. 2011
- [8] Hennecke, M.; Mietz, J.; Raupach, M.; Helm, C.: Untersuchungen zur Anwendbarkeit leitfähiger Beschichtungen auf Karbonbasis für den Einsatz als Fremdstromanoden im Kathodischen Korrosionsschutz von Stahlbetonbauteilen. 2011

[9] Helm, C.: Dauerhaftigkeit von leitfähigen Beschichtungen als Fremdstromanoden beim KKS von Stahlbeton. 2012

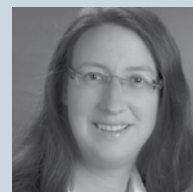
[10] Eichler, T. et al.: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton. Instandsetzung des Parkhauses »Am Gericht« in Frankfurt am Main. Beton- und Stahlbetonbau 102(2007), Nr. 5, S. 310–320

[11] Curbach, M.: Empfehlung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) zu den erforderlichen Nachweisen der Bauprodukte für den kathodischen Korrosionsschutz (KKS) im Betonbau. 2009-06-05

[12] Eichler, T.; Isecke, B.: Abschlussbericht zur Vorstudie Vh 6576 »Installation eines kathodischen Korrosionsschutzsystems mit Spritzverzinkung unter einer Gussasphaltbeschichtung«. 2009

[13] Eichler; Isecke; Klein: Application of Thermal Sprayed Zinc Anode for CP of a Multi-Storey-Car-Park. 2009

### INFO/KONTAKT



**Dipl.-Ing. Sabine Heinz**

Nach der Ausbildung zur Bauzeichnerin Studium an der Bauhaus-Universität Weimar Bauingenieurwesen mit der Vertiefungsrichtung Baustoffe und Sanierung; bis 2006 Mitarbeiterin in der Anwendungstechnik für Baustoffe/ Bindemittel, anschließend in Ingenieurbüros auf den Gebieten Fassadensanierung, Betonsanierung sowie Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton (KKS) tätig.

Mitglied der WTA, Mitarbeit in den Referaten »Oberflächentechnologie« und »Beton«.

Königsstraße 9  
61191 Rosbach  
E-Mail: as.heinz@gmx.de

### Redaktionelle Bearbeitung:

**Prof. Felix Wenk**  
Hochschule für Technik Rapperswil  
Studiengang Bauingenieurwesen  
Oberseestrasse 10  
8640 Rapperswil  
Schweiz

**Dr.-Ing. Ulrich Schneck**  
CI Tec Concrete Improvement Technologies GmbH  
Dresdner Straße 42  
01156 Cossebaude

**Dipl.-Ing. Rüdiger Burkhardt**  
Ingenieurbüro für Bauwerkserhaltung Weimar GmbH  
Zum Hospitalgraben 2  
99425 Weimar