

# Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton

## Instandsetzung des Parkhauses „Am Gericht“ in Frankfurt am Main

Die Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen bzw. -werken, welche durch chloridinduzierte Korrosion der Bewehrung gefährdet oder bereits geschädigt sind, hat in den letzten Jahrzehnten weltweit an Bedeutung gewonnen. Der kathodische Korrosionsschutz, als elektrochemisches Instandsetzungsverfahren, bildet in diesem Fall eine zuverlässige und oftmals kostengünstige Methode zur Instandsetzung. Am Beispiel des Parkhauses „Am Gericht“ in Frankfurt am Main werden die Durchführung solch einer Maßnahme sowie die Besonderheiten des Verfahrens beschrieben. Es werden die theoretischen Hintergründe erläutert und die praktische Umsetzung sowie zu klärende Detailfragen beschrieben. Die Daten der ersten Depolarisationsmessungen zeigen den aktuellen Zustand der Anlage sowie des Schutzobjektes.

### Cathodic Protection of Steel in Concrete Rehabilitation of the Multi Storey Car Park “Am Gericht” in “Frankfurt am Main”

*Within the last decades, the rehabilitation reinforced concrete structures that are affected by chloride-induced corrosion have become more and more important. In such cases, cathodic protection as an electrochemical rehabilitation method often is a reliable and cost effective procedure. The rehabilitation of the multi-storey car park “Am Gericht” in Frankfurt am Main shows exemplarily the realization of this technique. The theory of cathodic protection will be explained as well as special details that have to be considered in practice. The data of early de-polarization measurements show the actual conditions of the cp-system and the protected object, respectively.*

### 1 Grundlagen des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahl in Beton

Im Stahlbetonbau wird der Korrosionsschutz der Bewehrung i. A. durch die hohe Alkalität der Betonporenlösung (pH-Wert: 12–14) gewährleistet. In dieser Umgebung kann sich auf dem Stahl eine dichte Oxidschicht bilden, die die weitere Eisenauflösung auf technisch vernachlässigbare Werte absenkt. Man spricht in diesem Fall von der Passivität des Stahls. Die Passivität kann im Wesentlichen durch zwei verschiedene Mechanismen gestört bzw. aufgehoben werden: infolge von Karbonatisierung, falls der pH-Wert des Betons an der Phasengrenze Stahl/Beton auf Werte zwischen 10–9 bzw. darunter sinkt [1], oder durch den Eintrag von Chloriden, falls der Chloridgehalt an der Phasengrenze Stahl/Beton soweit ansteigt, dass dieser oberhalb eines kritischen Korrosion auslösenden Wertes liegt [2], [3]. Ist der natürliche Schutz der Bewehrung

nicht mehr gegeben bzw. liegt schon ein mehr oder weniger ausgeprägtes Schadensbild vor, muss das betroffene Bauteil/Bauwerk instandgesetzt werden. Insbesondere im Fall von chloridinduzierter Korrosion (Bild 1) sollte schnell gehandelt werden, da aufgrund des stark lokalisierten Korrosionsangriffs zum Teil sehr hohe Abtragsraten erreicht werden, die in vergleichsweise kurzen Zeiträumen zu einem vollständigen Querschnittsverlust führen können.

Neben den bekannten, herkömmlichen Instandsetzungsverfahren ist der kathodische Korrosionsschutz (KKS), welcher hauptsächlich dann eingesetzt wird, wenn eine Depassivierung des Bewehrungsstahls durch Chlorideinwirkung vorliegt, häufig ein sinnvolles Mittel zur Instandsetzung geschädigter Bauwerke. Grundsätzliches Ziel des kathodischen Korrosionsschutzes ist es, die Korrosionsrate aktiver Systeme soweit zu verringern, dass sie technisch vernachlässigbar wird bzw. die Lebensdauer des Objektes in gewünschtem Maße verlängert wird. Zu diesem Zweck wird das zu schützende Objekt in kathodische Richtung polarisiert, so dass die vom Elektrodenpotential

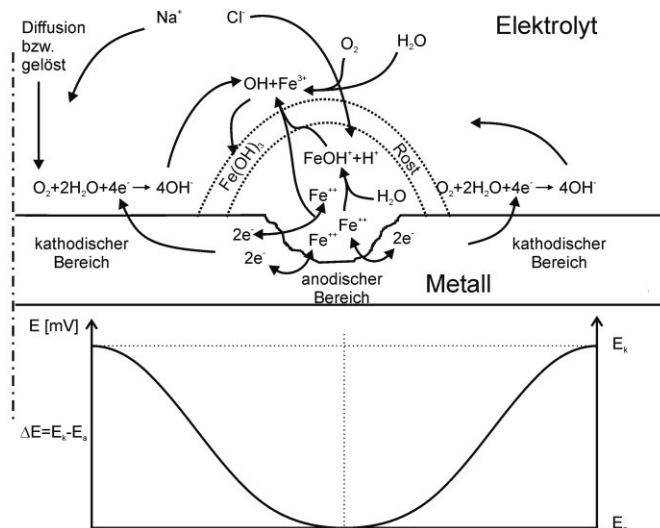


Bild 1. Schematische Darstellung des Mechanismus der Lochkorrosion des Eisens in alkalischer Lösung sowie schematischer Verlauf der Stahl/Beton Potentiale im Einflussbereich der Korrosionsstelle [4]

Fig. 1. Schematic illustration of pitting corrosion of iron in alkaline solution and schematic diagram of steel/concrete potentials in the influential reach of the pit cp. [4]

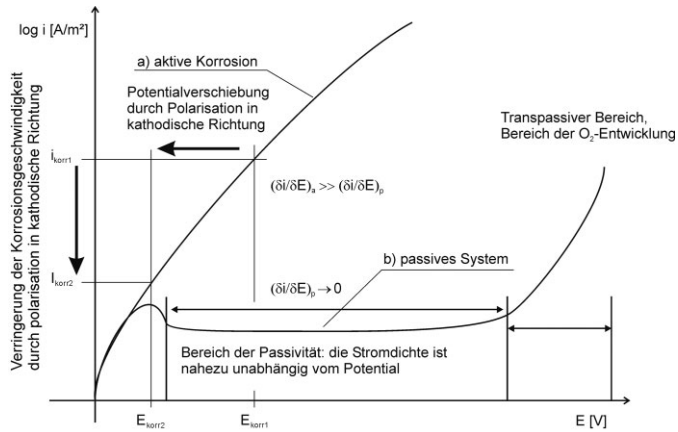


Bild 2. Schematische Darstellung der anodischen Polarisationskurven von aktivem bzw. passivem Eisen  
 Fig. 2. Schematic diagram of anodic polarization curves of active and passive iron

abhängige Korrosionsgeschwindigkeit (Bild 2, Kurve a) verringert wird. Das heißt nicht, dass es zwangsläufig auch zur Passivierung bzw. Repassivierung des Systems kommt. Passive Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Korrosionsgeschwindigkeit in einem weiten Bereich unabhängig vom Potential ist. Beim kathodischen Korrosionsschutz erfolgt die Verringerung der Korrosionsrate primär durch die kathodische Polarisation und nicht wie im Falle der Passivierung durch die Bildung von Deckschichten (Bild 2, Kurve b). Anhand von Gl. (1) und (2) kann dieser Zusammenhang mathematisch beschrieben werden [5]:

$$i_a = i_{korr} \cdot \exp\left(\frac{E - E_{korr}}{\beta_a}\right) \quad (1)$$

- mit  $i_a$  anodische Teilstromdichte
- $i_{korr}$  Korrosionsstromdichte beim Ruhepotential
- $E_{korr}$  Elektrodenpotential
- $E$  Ruhepotential
- $\beta_a$  anodische Tafelneigung
- $\beta_a = \frac{RT}{\alpha z F}$
- $a$  Durchtrittsfaktor  $\approx 0,5$
- $R$  allg. Gaskonstante
- $T$  absolute Temperatur
- $z$  Valenzänderung des in der elektrolytischen Teilreaktion reagierenden Stoffes
- $F$  Faradaysche Konstante

Gl. (1) ist strenggenommen nur für Systeme gültig, bei denen die Durchtrittsreaktion geschwindigkeitsbestimmend ist, d. h. dass keine durchtrittshemmenden Einflüsse, z. B. aus Diffusion oder Deckschichtbildung, maßgebend werden. Im Fall der Passivität ist die Durchtrittsreaktion jedoch so stark gehemmt, dass die Stromdichte-Potential-Kurve parallel zur Potentialachse verläuft, was einem  $\beta_a \rightarrow \infty$  entspricht. Anstelle von Gl. (1) tritt demnach Gl. (2):

$$i_a = i_{korr} \quad (2)$$

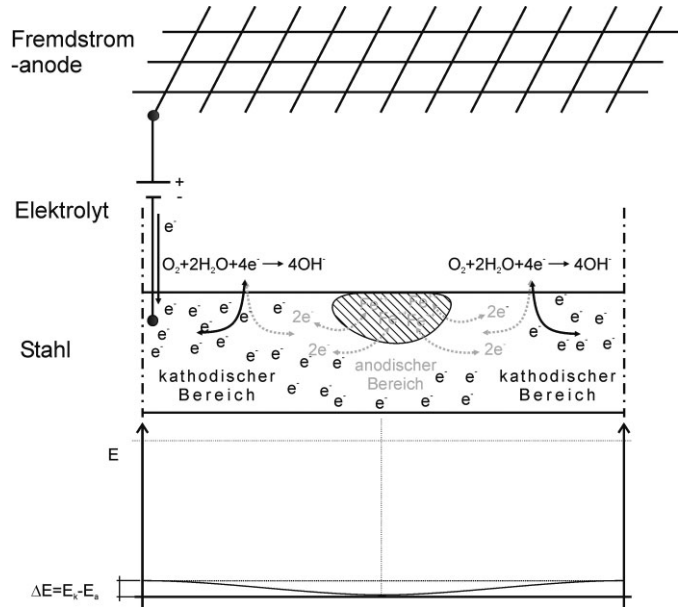


Bild 3. Schematische Darstellung der Polarisation einer Betonstahlbewehrung mittels Fremdstromeinspeisung sowie des Verlaufs der Stahl/Beton Potentiale im polarisierten Zustand (vgl. Bild 1)  
 Fig. 3. Schematic illustration of polarization of a reinforcement by impressed current and schematic diagram of steel/concrete potentials (DC on) (cp. Fig. 1)

Es ist ersichtlich, dass im Falle einer passiven Elektrode deren Potential im Hinblick auf die Auflösungscharakteristik keine Rolle spielt und folglich auch die Polarisation im passiven Bereich keine Veränderung der Korrosionsgeschwindigkeit hervorrufen kann. Beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau kann die Polarisation der Bewehrung durch galvanische Anoden oder mittels eines Fremdstromsystems, wie in Bild 3 schematisch dargestellt, erfolgen.

Im Fall von chloridinduzierter Lochkorrosion wird durch die Polarisation der Bewehrung zunächst die Potentialdifferenz zwischen anodischen und kathodischen Bereichen, welche die treibende Kraft für die Elementkorrosion bildet, gemindert und so die Korrosionsrate wesentlich verringert. Der Zusammenhang zwischen Elementstrom und Treibspannung (hier: Potentialdifferenz zwischen anodischen und kathodischen Bereichen auf der Stahloberfläche) kann analog zum Ohmschen Gesetz wie folgt dargestellt werden [1]:

$$I_e = \frac{\Delta E}{\Sigma R} = \frac{E_k - E_a}{\Sigma R} \quad (3)$$

- mit  $I_e$  Elementstrom [A]
- $E_k$  Potential der Kathode [V]
- $E_a$  Potential der Anode [V]
- $\Sigma R$  Summe aller im System vorhandenen Widerstände [W]

Der Masseverlust, welcher aus dem Elementstrom  $I_e$  resultiert, kann mit Hilfe der Faradayschen Gesetze aus:

$$\Delta m(t) = \frac{M}{z \cdot F} \cdot \int_{t=t_0}^t I_e(t) \cdot dt \quad (4)$$

mit $\Delta m$	elektrochemisch umgesetzte Masse [g]
M	molare Masse des umzusetzenden Stoffes [g/mol]
z	Valenzänderung des in der elektrolytischen Teilreaktion reagierenden Stoffes [-]
F	Faradaysche Konstante ( $F = 96487$ ) [As/mol]
$I_e(t)$	Elementstrom über die Zeit t [A]
t	Zeit [s]

berechnet werden. Gln. (3) und (4) verdeutlichen, dass die Verringerung der Potentialdifferenz im Korrosionselement bei ausreichender Polarisation dazu führt, dass die Elementkorrosion vernachlässigbar wird.

Bei längerer Polarisation treten neben der Unterdrückung der Elementkorrosion noch weitere, das Korrosionsverhalten der Bewehrung positiv beeinflussende Mechanismen in Erscheinung. Die für die Initiierung und das Fortschreiten der Lochkorrosion verantwortlichen Chloridionen wandern im elektrischen Feld durch Migration zur Anode, während durch die kathodische Teilreaktion:



der pH-Wert im Bereich der Bewehrung steigt und somit das für die Lage des kritischen Lochkorrosionspotentials  $E_p$  entscheidende Verhältnis von Chlorid- zu  $\text{OH}^-$ -Ionenkonzentration:  $c(\text{Cl}^-)/c(\text{OH}^-)$  [2], [3] zusätzlich verringert wird. Nach ausreichend langer Polarisationsdauer und -intensität stellt sich bei ordnungsgemäß funktionierenden Anlagen ein Zustand ein, in dem die Korrosionsrate so weit abgesenkt wurde, dass sie technisch gesehen keine Rolle mehr spielt.

Durch den kathodischen Schutz können die Umgebungsbedingungen für den Betonstahl demnach derart verändert werden, dass dieser unter freien Korrosionsbedingungen, wie sie sich nach erfolgter Depolarisation einstellen, repassiviert. Dieses Phänomen wurde unter anderem von *Pedeferrri* und *Glass* [6], [7] beobachtet, welche die Veredelung der freien Korrosionspotentiale als Indiz dafür deuten, dass sich nach der kathodischen Polarisation das Verhältnis zwischen aktiven und passiven Stahloberflächen zugunsten passiver Bereiche verändert.

## 2 Besonderheiten beim kathodischen Korrosionsschutz von Stahl in Beton

Beim kathodischen Korrosionsschutz von atmosphärisch exponierten Stahlbetonbauwerken wird i. A. zur Überprü-

fung der Wirksamkeit des Schutzes das sog. 100 mV Kriterium [8] angewendet. Beim 100 mV Kriterium handelt es sich um einen empirisch ermittelten Wert zur Bewertung der Wirksamkeit des kathodischen Schutzes. Es besagt: Sofern das IR-freie Stahl/Beton Potential im geschützten Zustand mindestens 100 mV negativer ist als das innerhalb von 24 Stunden nach der Unterbrechung des Schutzstromes gemessene Freie Korrosionspotential, ist nachgewiesen, dass die verbleibende Korrosionsgeschwindigkeit des Stahls innerhalb der Restlebensdauer des Bauwerks keine schädliche Wirkung hat. Neben dem 100 mV Kriterium existieren in der DIN EN 12696 noch zwei weitere Kriterien, welche beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau angewendet werden können. Tabelle 1 fasst die Schutzkriterien nach DIN EN 12696 sowie mögliche Anwendungsfälle zusammen.

Für die Anwendung des KKS im Stahlbetonbau bildet die DIN EN 12696 das wichtigste technische Regelwerk. Auch unter Anwendung dieser Norm ist für die Planung einer KKS Anlage immer ein sachkundiger Planer auf dem Gebiet des kathodischen Korrosionsschutzes erforderlich, da unter Umständen komplexe Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern existieren und die DIN EN 12696 als so genannter „performance Standard“ nur begrenzt Informationen zu Detailfragen in der Anwendung liefert. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, im Rahmen von Instandsetzungsmaßnahmen wie dem kathodischen Korrosionsschutz auf der Bauherrenseite Fachleute einzusetzen, welche den sachkundigen Planer für Instandsetzungsmaßnahmen, sofern dieser nicht auch sachkundig auf dem Gebiet elektrochemischer Schutzverfahren ist, in seiner Aufgabe unterstützen und über die notwendigen Kenntnisse auf dem Gebiet elektrochemischer Schutzverfahren verfügen.

## 3 Planung und Ausführung kathodischer Korrosionsschutzmaßnahmen im Stahlbetonbau

Ob der kathodische Korrosionsschutz der Bewehrung bei einer notwendigen Instandsetzungsmaßnahme zum Einsatz kommen kann oder nicht, hängt von einer Reihe von Faktoren ab, welche im Rahmen der Planung berücksichtigt werden müssen. Die für die meisten Bauherren entscheidende Frage nach der Wirtschaftlichkeit der Maßnahme kann nur im Anschluss an eine sorgfältige Analyse des Ist-Zustandes sowie der Berücksichtigung aller Ziele, die mit der Instandsetzung erreicht werden sollen, erfol-

Tabelle 1. Schutzkriterien nach DIN EN 12696 [8]

Table 1. Protection criteria according to DIN EN 12696 [8]

Kriterium	Erklärung	Anwendungsbeispiel
1. 100 mV	Der Potentialanstieg ausgehend vom IR-freien Stahl/Beton Potential <b>innerhalb von 24 h</b> nach dem Ausschalten des Schutzstromes muss mindestens 100 mV betragen	Atmosphärisch exponierte Stahlbetonbauteile
2. 150 mV	Der Potentialanstieg ausgehend vom IR-freien Stahl/Beton Potential <b>nach mehr als 24 h</b> nach dem Ausschalten des Schutzstromes muss mindestens 150 mV betragen	Atmosphärisch exponierte Stahlbetonbauteile
3. -720 mV	Das IR-freie Potential der geschützten, schlaffen Stahlbewehrung liegt zwischen (-720) mV und (-1100) mV gegen eine Ag/AgCl/0,5 M KCl-Elektrode, oder bei Spannstahl zwischen (-720) mV und (-900) mV	Bauteile die im Erdboden bzw. in dauerfeuchter Umgebung oder unter Wasser liegen



gen. Dabei ist die Frage nach der gewünschten Restlebensdauer des instandzusetzenden Objektes ebenso entscheidend für die weitere Planung, wie Fragen hinsichtlich anfallender Nebenkosten für Ausfallzeiten, Lärmschutz etc. während der Instandsetzung. Neben solchen Faktoren, die direkt monetär bewertet werden können, muss auch erörtert werden, wie wichtig dem Bauherrn die Möglichkeit ist, den Erfolg sowie die Dauerhaftigkeit der Instandsetzungsmaßnahme anhand integrierter Monitoringssysteme, wie sie beispielsweise für KKS-Maßnahmen nach DIN EN 12696 vorgeschrieben sind, überprüfen zu können. Die Untersuchung möglicher Instandsetzungsvarianten hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit stellt ein komplexes Problem dar, welches nur durch gewissenhafte Planung sowie der Einbeziehung aller maßgebenden Faktoren zufriedenstellend gelingen kann.

Bevor über die weitere Planung von kathodischem Korrosionsschutz als mögliche Instandsetzungsmaßnahme entschieden werden kann, sind zunächst einige technische Fragen bezüglich des Ist-Zustands des Bauwerks zu klären.

Beim KKS müssen alle Bewehrungsteile in elektrischem und elektrolytischem Kontakt zueinander stehen, d. h. ggf. muss die Bewehrung nachträglich flächendeckend durchverbunden werden. Die Anforderungen der DIN EN 12696 besagen, dass der elektrische Widerstand zwischen zwei weit auseinander liegenden Punkten der Bewehrung, z. B. die Diagonale zweier Eckpunkte einer Bodenplatte, nicht mehr als  $1,0 \Omega$  betragen darf. Im Normalfall kann zwar mit einer guten Durchverbindung der Bewehrung gerechnet werden, trotzdem muss die elektrische Kontinuität der Bewehrung im Vorfeld mittels geeigneter Methoden geprüft werden. Die elektrolytische Verbindung ist immer dann gegeben, wenn keine Hohllagen, klaffende Risse oder sonstige Fehlstellen den Kontakt zwischen Beton und Stahl verhindern. Daraus resultiert, dass lockerer Beton abgetragen und Hohlstellen entfernt werden müssen. Fehlerhafte Stellen sind zu reprofiliert. Die Norm schreibt für den Fall der Reprofilierung bereits geschädigter Bereiche vor, dass Korrosionsprodukte von der Stahloberfläche zu entfernen sind, um den Verbund zwischen Stahl und Instandsetzungsmörtel zu sichern. Ebenso ist die Wiederherstellung der Betonoberflächen in Übereinstimmung mit der ENV 1504 vorgeschrieben. Für die Instandsetzungsmörtel existieren in der aktuellen Fassung der DIN EN 12696 Grenzen hinsichtlich ihres elektrischen Widerstandes. Diese Grenzen sind in der praktischen Anwendung oftmals nicht einhaltbar, weshalb derzeit die Frage nach geeigneten Reprofilierungs- und Einbettungsmaterialien häufig gestellt wird. Für kathodische Korrosionsschutzsysteme sowie deren Funktionsfähigkeit ist zunächst entscheidend, dass das System im laufenden Betrieb Teil des Bauwerks bzw. Bauteils bleibt, d. h. dass die mechanischen Kennwerte aller Instandsetzungsmaterialien auf die Verhältnisse im Bauwerk derart abgestimmt sind, dass keine schädliche Rissbildung oder Abplatzungen etc. auftreten und die Maßnahme in sich konsistent bleibt. Die elektrischen Kennwerte der Instandsetzungsmörtel spielen demgegenüber eine untergeordnete Rolle und können im Einvernehmen zwischen Bauherrn, Planer und Ausführendem entsprechend den Verhältnissen im Bauwerk von den in der Norm geforderten Werten abwei-

chen. Isolierend wirkende Einbettungsmaterialien mit extrem hohen Widerständen dürfen jedoch nicht verwendet werden. Des Gleichen müssen in einem Schutzbereich nur Bereiche ungefähr gleich hoher Widerstände zusammengefasst werden, um sog. „hotspots“ d. h. lokale Bereiche hoher Stromdichte zu vermeiden. Dies lässt sich im Normalfall durch entsprechende planerische Maßnahmen erreichen.

Im Rahmen der Planung einer KKS-Maßnahme gibt es neben der Wahl geeigneter Instandsetzungsmörtel noch eine Reihe weiterer Details, wie z. B. die Wahl des Anodentyps, die Anzahl der Schutzbereiche und den sinnvollen Einbau von Messsensoren zum Monitoring der Anlage etc. zu berücksichtigen. Zu diesen Fragestellungen sowie zu anderen Ausführungsdetails existiert ein umfangreiches Angebot an Fachliteratur, welches von Forschungsberichten [9], über Veröffentlichungen in Zeitschriften und Tagungsbänden [6], [10] bis [12] bis hin zu Buchpublikationen [13], [14] reicht. Bauherren und sachkundigen Planern ohne Erfahrung auf dem Gebiet des kathodischen Korrosionsschutzes fällt es häufig schwer, sich aus der Fülle der vorhandenen Fachliteratur diejenige herauszusuchen, die im speziellen Anwendungsfall die nötige Hilfestellung im Rahmen der Planung geben könnte. Einen guten Überblick über die Thematik sowie ein hilfreiches Werkzeug bei der Erstellung von Leistungsverzeichnissen stellen die Österreichische Richtlinie „Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauteilen“ [15] sowie der zugehörige Fortbildungsband „Einführung in die neue Richtlinie Kathodischer Korrosionsschutz“ [16] der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik dar.

Wie bei jeder Instandsetzungsmaßnahme im Stahlbetonbau ist auch beim kathodischen Korrosionsschutz der Erfolg der Maßnahme an die gute Kooperation zwischen Bauherrn, Planer, Sonderfachmann und Ausführenden gebunden. Alle auftretenden Fragestellungen bezüglich des KKS sollten gemeinsam erörtert und möglichst schon in der Planungsphase geklärt werden.

Ein Praxisbeispiel für die Umsetzung einer KKS-Maßnahme stellt die Instandsetzung des Parkhauses „Am Gericht“ in Frankfurt am Main dar. Im Rahmen dieser Instandsetzung waren folgende Parteien beteiligt:

- Frankfurter Aufbau AG (FAAG), Bauherr
- Ingenieurbüro Engelbach + Partner, sachkundiger Planer
- Fa. Karrié mit V&C Kathodischer Korrosionsschutz, Ausführende
- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM Berlin, Fachmann KKS der Bauherrenseite

#### 4 Objektbeschreibung und Voruntersuchungen

Die Parkhaus-Betriebs GmbH (PBG) in Frankfurt am Main bietet als Tochtergesellschaft der Frankfurter Aufbau AG (FAAG) in 22 Parkhäusern, 41 Tiefgaragen und vier Garagenhäusern über 17000 Stellplätze an. Da einige der Parkhäuser aus den 1960er Jahren stammen, erfolgten bereits seit dem Jahr 1987 Grundsanierungen des Bestandes, die wegen des hohen Schädigungsgrades auch der tragenden Konstruktion i. d. R. mit flächenhaftem Abbruch der oberen Deckenschale einhergingen. Dem hohen Chlорideintrag und der Schädigung der tragenden Bewehrung

durch Korrosion wurde im Hinblick auf Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit mit einer Entfernung des kontaminierten Betons durch Hochdruckwasserstrahlen und Wiederaufbau mit zusätzlich bewehrtem Aufbeton Rechnung getragen, wobei diese Technik im Jahre 1987 beim Parkhaus Konstablerwache erstmals großmaßstäblich und in Verbindung mit verzinkter Bewehrung angewendet wurde.

Das Ingenieurbüro Engelbach + Partner als Partner der FAAG und PBG bei den in den letzten 20 Jahren durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen hat das Parkhaus „Am Gericht“ mehrfach in Bezug auf Schäden der Konstruktion untersucht. Die Grundinstandsetzung konnte jedoch erst nach Sicherstellung der langfristigen Weiternutzung durch die PBG im Jahre 2006 in Angriff genommen werden.

#### 4.1 Vorhandene Konstruktion

Das Parkhaus „Am Gericht“ an der Heiligkreuzgasse im Zentrum Frankfurts wurde 1963 errichtet und besteht aus einem Kellergeschoss (Parkflächen), Erdgeschoss (Ein-, Ausfahrt sowie Lager- und Werkstattbereiche) und sieben Obergeschossen, die als Parkflächen dienen. Die einzelnen Ebenen mit einer Grundfläche von jeweils ca. 2500 m<sup>2</sup> werden durch zwei nebeneinander liegende Spindeln (Auffahrt und Abfahrt) miteinander verbunden. Das Gebäude wurde als Stahlbetonskelettkonstruktion aus Ortbeton B 300 erstellt. Die Deckenplatten sind überwiegend zweiachsig gespannt und liegen auf Unterzügen in Quer- und Längsrichtung auf. Die Decken sind im Feldbereich mit einer unteren und im Auflagerbereich auch mit einer oberen kreuzweisen Armierung versehen. In den Randbereichen sind die Decken und Unterzüge als Kragarm ausgebildet. Die Deckenstärke beträgt im überwiegenden Teil 15 cm, die Stützendurchmesser vergrößern sich von oben nach unten zunehmend (Ø30 cm im 7. OG bis Ø60 cm im KG). Auf der Rohbetondecke befindet sich ein Verbundestrich mit einer Stärke zwischen 2 cm und 5 cm. Eine Abdichtung ist nicht vorhanden.

#### 4.2 Optische Schadensfeststellungen

Die Bodenflächen wiesen – im Schädigungsgrad mit den Geschossen nach oben abnehmend – einen altersentsprechenden Estrich mit zahlreichen Hohlstellen sowie Rissen besonders in Bereichen über den Unterzügen auf. Die Estrichoberfläche wurde wiederholt partiell saniert. Insbesondere in den Ebenen 1 bis 4 waren an der Deckenoberseite Bereiche mit Abplatzungen des Konstruktionsbetons und stark korrodierten Trageisen (obere Decken- und Unterzugsbewehrung) feststellbar. Einzelne Stützen

wiesen überwiegend am Stützenfuß Betonabplatzungen auf, die wiederum auf korrodierende Bewehrung zurückzuführen waren. Insgesamt war festzustellen, dass aufgrund von Rissbildungen im Verbundestrich und der fehlenden Abdichtung ständig Feuchtigkeit in die Deckenkonstruktion eingedrungen war. Dies bewirkte ein Korrodieren der Bewehrung und daraus resultierend Betonabplatzungen sowie Hohllagen.

#### 4.3 Untersuchungen an der Konstruktion

Im Vorfeld zur Auswahl eines geeigneten Instandsetzungsverfahrens wurde zwecks Erfassung und Bewertung der Bauschäden bereits im Jahre 2003 eine Gebäudeuntersuchung durchgeführt. Teil dieser Untersuchung waren die Bestandsaufnahme der Schäden einschließlich Baustoffentnahmen und Prüfung von Materialproben, die Erstellung einer Schadensdokumentation sowie eines Sanierungskonzepts mit Grobkostenschätzung. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 2 bis Tabelle 6 zusammengefasst wiedergegeben.

Gemäß DAfStb-Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen besteht bei einem Chloridgehalt > 0,5%, bezogen auf den Zementgehalt, erhöhte Korrosionsgefahr für die Bewehrung. Dieser Grenzwert wurde in dem 1., 2. und 3. Obergeschoss sowohl in einer Tiefenlage von 0 bis 3 cm als auch in einer Tiefenlage von 3 bis 6 cm in der Mehrzahl der untersuchten Proben meist erheblich mit Spitzenwerten von 4,2 M.-% übertroffen (vgl. Tabelle 6). Die Gefahr von chloridinduzierter Korrosion war damit an den entsprechenden Bauteilen sehr hoch. Demgegenüber zeigten sich in den weiter aufgehenden Geschossen sowohl in der absoluten Höhe wesentlich geringere Chloridgehalte als auch in der örtlichen Verteilung ein nur punktuell überschreiten an bekannt kritischen Stellen, wie z. B. dem Einfahrtsbereich der Spindel. Die Ursache für den signifikant geringeren Schädigungsgrad der Obergeschosse 4 bis 7 liegt in der nur teilweisen Auslastung des Parkhauses.

Die wegen der teilweise geschwächten Bewehrung vorgenommene Überprüfung der Bestandsstatik ergab, dass aus der seinerzeitigen Bemessung Traglastreserven von rund 10% bestanden, die entweder zur Aufnahme erhöhter Lasten im Rahmen der Instandsetzungsmaßnahme oder als tolerierbarer Tragfähigkeitsverlust der Bewehrung aus Korrosion dienen konnten.

Zusammenfassend war zur Konstruktion festzustellen:

- vielfach gerissener und hohlliegender Estrich
- in die Deckenkonstruktion eingedrungene Feuchtigkeit
- in Teilbereichen korrodierte Bewehrung

Tabelle 2. Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung [17], [18]  
Table 2. Examination of compressive strength [17], [18]

Prüfkörper	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit $\beta_{c50}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Festigkeitsklasse nach DIN 1045 (1978)
1.1	2199	43	B 35
1.2	2237	38	
2.1	2185	44	
3.1	2291	47	
3.3	2206	36	

Tabelle 3. Ergebnisse der Betondeckungsmessungen in OG 1–3, nur Minimalwerte [17], [18]

Table 3. Concrete overlay in OG 1–3, minimum values [17], [18]

	1. OG	2. OG	3. OG
$c_{\min}$ [mm]	0	29	21

Tabelle 4. Ergebnisse der Haftzugprüfungen am Altbeton [17], [18]

Table 4. Adhesive tensile strength at the concrete surface [17], [18]

untersuchtes Bauteil [-]	Messstelle [-]	abgelesener Wert [kN]	abgelesener Wert [N/mm <sup>2</sup> ]	Bemerkung [-]
Decken	D2.1	3,70	1,90	Es sind nur Proben aufgeführt, bei denen die Bruchflächen nicht in der Klebefläche lagen
	D2.3	6,20	3,10	
	D2.4	3,90	2,00	
	D2.5	2,80	1,45	
	D2.6	4,40	2,20	
	D2.8	4,30	2,20	
	D2.10	6,30	3,20	
	D2.11	2,60	1,40	
Mittelwert	–	4,28	2,18	s. o.
Maximum	–	6,30	3,20	
Minimum	–	2,60	1,40	

Tabelle 5. Ergebnisse der Bestimmung der Karbonisierungstiefen für OG 1–3 [17], [18]

Table 5. Carbonation depth OG 1–3 [17], [18]

Entnahmestelle	Karbonisierungstiefe		
	Mittelwert <sup>1)</sup> [mm]	Max [mm]	Min [mm]
1. OG	2,5	2,5	2,5
2. OG	17,5	20	10–15
3. OG	11	10–15	< 5

1) Zur Berechnung der Mittelwerte wurde für den Fall, dass bei einer Messstelle ein Wertebereich ermittelt wurde, dessen Mittelwert als Eingangsgröße verwendet

Tabelle 6. Zusammenfassung der Ergebnisse der Chloridgehaltsbestimmungen in OG 1 bis OG 3 [17], [18]

Table 6. Estimation of chloride contents, summarized results: OG 1–OG 3 [17], [18]

Entnahmestelle	Tiefe [cm]	Chloridgehalt		
		Mittelwert [M % Cl <sup>-</sup> /z]	Max [M % Cl <sup>-</sup> /z]	Min [M % Cl <sup>-</sup> /z]
1. OG	0–3	0,9	1,5	0,1
	3–6	0,9	2,2	0,1
2. OG	0–3	2,6	3,3	2,1
	3–6	2,5	3,0	1,8
3. OG	0–3	1,7	2,8	0,1
	3–6	1,9	4,2	0,0

- Betondeckung der oberen Deckenbewehrung ausreichend
- sehr hoher Chlorideintrag
- Betondruckfestigkeit und Haftzugwerte gut

## 5 Wahl des Instandsetzungsverfahrens

### 5.1 Gegenüberstellung der Sanierungskonzepte: Instandsetzungsprinzip R bzw. K

Die Empfehlung im aufgestellten Sanierungskonzept vom 15.08.2003 ergab aufgrund der hohen Chloridbelastung der Bodenflächen im 1., 2. und 3. Obergeschoss zwei mögliche Ausführungsvarianten.

**Alternative A** war die Durchführung einer konventionellen Sanierung mit einem flächenhaften Abtrag des Betons mittels Höchstdruckwasserstrahlen in einer Stärke von ca. 6 cm mit anschließender Reprofilierung der Konstruktion und nachfolgender Beschichtung (Instandsetzungsprinzip R), wie sie bereits mit der FAAG bei anderen Parkhäusern ausgeführt wurde.

Die Nachteile dieses Verfahrens, auch wegen der filigranen Deckenstärke von 15 cm, waren naheliegend:

- Gefahr einer Schädigung der verbleibenden Decke durch die eingebrachten Erschütterungen und Durchschüsse
- aus statischer Sicht: erhebliche Zwängungs- und Verbundspannungen in der Verbundkonstruktion Altdecke + Aufbeton, bedingt durch ein (ungünstig) hohes Verhältnis der Stärke des Aufbetons im Verhältnis zur Reststärke der Decke
- hohe Schall- und Schmutzemissionen in einem sensiblen nachbarschaftlichen Umfeld und einer während der Instandsetzungsmaßnahme fortbestehenden gewerblichen Nutzung im Erdgeschoß des Parkhauses

Als **Alternative B** stand in den Gesprächen mit dem Bauherrn unter Einbeziehung der Möglichkeiten zur Reduzierung der veranschlagten Baukosten und einer schnellen Wiedernutzbarkeit der einzelnen Parkebenen der Einsatz des kathodischen Korrosionsschutzes in den Parkebenen



Bild 4. Überprüfung der Karbonisierungstiefe an einer frischen Stemmstelle

Fig. 4. Determination of carbonation depth at a recently calked spot



1 bis 3 zur Diskussion. Mit dem Einsatz des KKS könnte den vorab genannten Forderungen nach Kosteneinsparung, Verringerung statischer Eingriffe in die Konstruktion, nach Emissionsdämpfung und einer beschleunigten Wiedernutzbarkeit Rechnung getragen werden.

Ziel eines ergänzenden Gutachtens war deshalb die Aussage, ob der Einsatz des kathodischen Korrosionsschutzes in den ersten drei Parkebenen des Parkhauses anstelle des großflächigen Abtrags von stark chloridbelastetem Beton an Boden und Stützenfüßen mittels Höchstdruckwasserstrahlen möglich ist.

## 5.2 Randbedingungen und Voraussetzungen für den Einsatz des KKS

Für die Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes müssen zusätzliche Randbedingungen erfüllt sein bzw. nachträglich für deren Erfüllung Sorge getragen werden. Im Parkhaus „Am Gericht“ wurden folgende Bauwerkprüfungen zur Sicherstellung der technischen Voraussetzungen für den Einsatz des KKS vorgenommen:

- flächenhafte Überprüfung der Haftzugfestigkeit des Betons
- flächenhafte Messung der Betondeckung
- zusätzliche Bestimmungen des Chloridgehaltes
- Potentialfeldmessung
- Kontinuitätsprüfung der Bewehrung durch Widerstandsmessungen
- Flächennivellement zur Feststellung von Deckendurchbiegungen, -unebenheiten

Sowohl die Haftzugwerte des Altbetons als auch die Überprüfung der elektrischen Kontinuität der Bewehrung lagen innerhalb der in der DIN EN 12696 geforderten Grenzen.

## 5.3 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Die Auswertung der übrigen betontechnologischen Untersuchungen bestätigten die Eignung des Objektes für die Anwendung des KKS. Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass das KKS-System unter Einhaltung der in den Regelwerken zum kathodischen Korrosionsschutz geforderten Randbedingungen im 1. und 3. Obergeschoss einsetzbar war. Die flächenhaft erheblich zu hohen Chloridwerte, welche mit den Potentialmessungen korrespondierten, ließen als Alternative zum KKS-System lediglich die vollständige Entfernung des chloridverseuchten Betons zu. Die Korrosion der Bewehrung war an einigen Stellen bereits so weit fortgeschritten, dass ein Austausch notwendig wurde. Dies betraf entsprechend den vorge-

nommenen Untersuchungen den Ersatz der flächigen (Matten-)Bewehrung im 1. OG auf ca. 5%, im 2. OG auf ca. 25% und im 3. OG auf ca. 8% der Geschossfläche. Diese Eingriffe in die Konstruktion gingen zu Lasten der Wirtschaftlichkeit der KKS-Lösung.

## 5.4 Gewähltes Sanierungskonzept

Die zusammenfassende Bewertung der Alternativen ergab folgendes Bild:

**Alternative A:** Flächenhafte Entfernung des chloridverseuchten Betons durch Höchstdruckwasserstrahlen, Neuaufbau der Konstruktion durch Aufbeton, Beschichtung

Pro:

- vollständige Entfernung der Chloride
- Ersatzbewehrung problemlos einbaubar
- bewährtes Verfahren

Contra:

- hoher Lärm- und Erschütterungseintrag
- hohe Wahrscheinlichkeit von partiellen Zerstörungen der vergleichsweise dünnen Decke
- anfallendes Wasser ungünstig wegen genutzter Räume im Erdgeschoß
- hohe Kosten

**Alternative B:** Partielle Ausbesserung statisch und mechanisch geschädigter Bereiche, Aufbringen eines KKS-Systems mit Einbettmörtel und Fahrbelag

Pro:

- geringe Eingriffe in die vorhandene Bausubstanz, keine weitere Schädigung
- Verbleiben der Chloride und eventueller künftiger Feuchteintrag sind unschädlich
- geringe Beeinträchtigung von Umgebung und genutzten Bereichen
- kurze Bauzeit
- wirtschaftlich, sofern Konstruktion im Wesentlichen intakt

Contra:

- Bei großflächig erforderlichem Bewehrungsersatz wirtschaftlich nicht sinnvoll
- In der praktischen Umsetzung in Deutschland vergleichsweise geringere Erfahrung

Unter Abwägung aller Vor- und Nachteile hat sich die FAAG zu einer Instandsetzung mit dem KKS-System mit folgendem Bodenaufbau entschieden (Bild 5): Nach der Festlegung des Instandsetzungsverfahrens mussten zu-

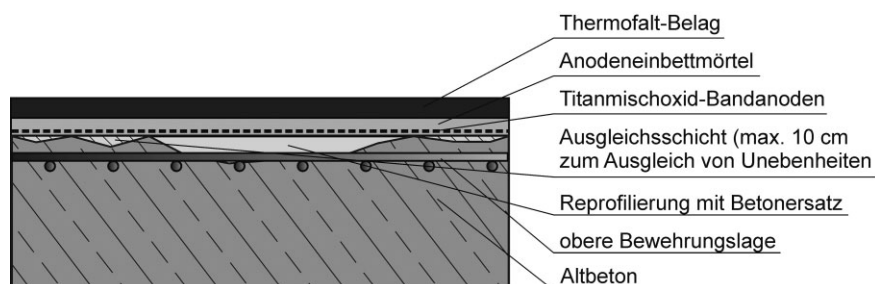


Bild 5. Schematischer Aufbau des KKS-Systems

Fig. 5. Schematic illustration of the CP-System

Tabelle 7. Widerstände des Altbetons OG 1 bis 3, bestimmt an Bohrkernen  $\varnothing = 100 \text{ mm}$  [19]

Table 7. Concrete resistances OG 1 to 3, estimated at core samples  $\varnothing = 100 \text{ mm}$  [19]

Proben	$\rho$ [ $\Omega \text{ m}$ ]	Prüftemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	r. F. [%]
Bohrkern 1.1	1100	20	85
Bohrkern 1.2	1600	20	85
Bohrkern 1.3	2600	20	85
Bohrkern 2.1	5700	20	85
Bohrkern 2.2	11600	20	85
Bohrkern 3.2	4000	20	85
Bohrkern 3.3	2000	20	85

nächst geeignete Instandsetzungsmaterialien gefunden werden. Wie bereits erwähnt, ergeben sich aufgrund der in der DIN EN 12696 geforderten Widerstandsgrenzen für Reprofilierungs- und Anodeneinbettmaterialien häufig Schwierigkeiten hinsichtlich der verwendbaren Produkte. Im Rahmen der Instandsetzungsmaßnahme des Parkhauses „Am Gericht“ in Frankfurt am Main wurden daher, als Grundlage zur Entscheidungsfindung, zunächst die Widerstände des Altbetons an Bohrkernen nach Gl. (6) bestimmt (Tabelle 7).

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} \quad (6)$$

mit R Widerstand des Altbetons [W]  
 A Querschnittsfläche des Prüfkörpers [ $\text{m}^2$ ]  
 l Länge des Prüfkörpers [m]

Die Norm besagt, dass der elektrische Widerstand des Reparaturmaterials innerhalb von 50%–200% des nominalen elektrischen Widerstandes des Altbetons liegen muss. Dem konnte im vorliegenden Fall nicht in allen Bereichen entsprochen werden. Daher wurde zur Lösung des Problems im Einvernehmen zwischen Bauherrn, Planer, Ausführendem und externem Berater in diesem Punkt von den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ abgewichen. Zum Einsatz kam sowohl für die Reprofilierung als auch für die Anodeneinbettung ein Material, dessen elektrische und mechanische Eigenschaften bekannt waren und welches aufgrund seiner Kennwerte und anderer bautechnischer Erfahrungen den Einsatz ermöglichte. Die wesentlichen Beurteilungskriterien waren gleichermaßen die mechanischen Eigenschaften, welche gewährleisten müssen, dass das Anodensystem Teil des Bauteils bleibt, sowie die elektrischen Kennwerte, welche die elektrische Abkopplung der Anoden dauerhaft verhindern müssen. Im Fall von großflächigen Reprofilierungsstellen sollten bei Unterschreitung der 50%-Grenze des Reprofilierungsmaterials eigene Schutzkreise für diese Zonen vorgesehen werden, um eine gleichmäßige Stromverteilung im gesamten Schutzobjekt sicherzustellen.

## 6 Durchführung und zeitlicher Rahmen der KKS-Maßnahme

Die gesamte Baumaßnahme, d. h. die Instandsetzung und Installation sowie Inbetriebnahme der KKS-Anlage, wurde innerhalb von vier Monaten durchgeführt. Den Beginn bildete Mitte Juli 2006 der Abtrag des Verbundestrichs im



Bild 6. Entfernen des Verbundestrichs  
 Fig. 6. Removal of the screed



Bild 7. Schadhafte Stellen mit Betonausbruch, welche mittels geeigneter Instandsetzungsmaterialien reprofiliert werden mussten

Fig. 7. Partly removed concrete cover, spots that had to be re-shaped by adequate repair materials

3. OG (Bild 6), und den Abschluss bildete die Abnahme und Übergabe der Anlage Mitte November 2006. Im Anschluss an den Abbruch des Verbundestrichs mussten zunächst alle Schadhstellen im Altbeton (Bild 7) reprofiliert und, falls notwendig, mit Zulagebewehrung versehen werden. Aufgrund der stark strukturierten Oberfläche des Altbetons war es neben der Reprofilierung ebenfalls notwendig, den Betonuntergrund für das Verlegen der Anodenbänder so vorzubereiten, dass ein vollflächiger Kontakt zwischen Anode und Altbeton gewährleistet werden konnte. Daher wurde eine Ausgleichschicht, welche ebenfalls für die Einhaltung des minimalen Anodenabstandes von 15 mm von der oberen Bewehrungslage sorgte, großflächig eingebaut (Bild 8).

Der Einbau der Anodenbänder erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurden die Bandanoden mit Kunststoffdübeln auf dem Betonuntergrund fixiert (Bild 9). Die Verwendung von Kunststoffdübeln verhindert, dass ein





Bild 8. Für die Applikation der Anoden vorbereiteter Betonuntergrund

Fig. 8. Concrete surface prepared for application of anodes



Bild 10. Applikation des Anodeneinbettmörtels

Fig. 10. Application of anode mortar



Bild 9. Fixierung der Anodenbänder auf dem Betonuntergrund mit Hilfe von Kunststoffdübeln

Fig. 9. Fixation of anodes at the concrete surface by using plastic anchors

elektrisch leitender Kontakt versehentlich zwischen Anode und Bewehrung, durch das notwendige Fixieren der Anoden, hergestellt wird. Der Anodeneinbettmörtel (Bild 10) muss gewährleisten, dass der elektrolytische Kontakt zwischen Anode und Kathode (Bewehrung) dauerhaft hergestellt ist. Daher ist bei der Einbettung der Anode besondere Sorgfalt vonnöten. Im Anschluss an das Herstellen der Betonüberdeckung, die Applikation der Bandanoden sowie deren Einbetten wurde ein Thermofaltbelag eingebaut, der als Verschleißschicht sowie zur Herstellung eines ausreichenden Gefälles für die Oberflächenentwässerung diente.

## 7 Inbetriebnahme der Anlage

Die KKS-Anlage im Parkhaus „Am Gericht“ wurde am 22. 11. 2006 erstmals in Betrieb genommen. Die DIN

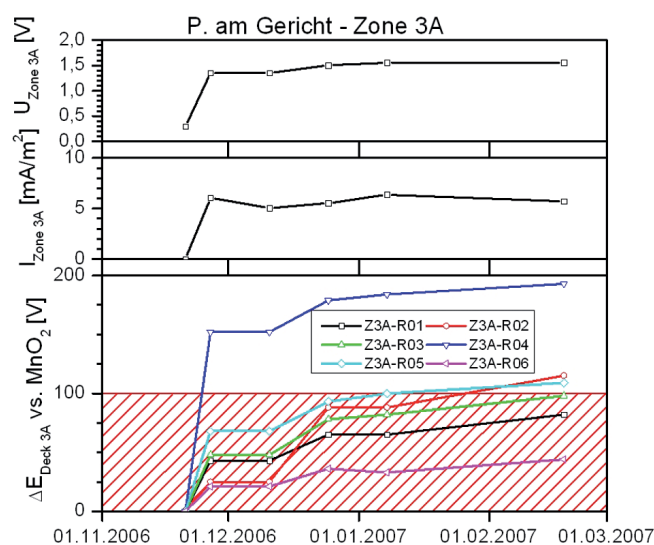


Bild 11. Verlauf der Treibspannungen, der Schutzströme sowie der Ergebnisse der Depolarisationsmessungen in den ersten drei Betriebsmonaten

Fig. 11. Driving voltage, impressed current and results of depolarization measurements during three months of operation

EN 12696 schreibt für die anfängliche Stromeinspeisung den Betrieb mit sehr niedrigen Strömen vor. Im Stahlbetonbau werden KKS-Anlagen mittlerweile in den meisten Fällen spannungsgeregelt betrieben, d. h. über eine Gleichrichtereinheit wird eine konstante Spannung zwischen Anode und Kathode angelegt. Bei Anwendung des Ohmschen Gesetzes (Gl. (3)) wird offensichtlich, dass die Anlagen dementsprechend mit zunächst sehr geringen Treibspannungen betrieben werden müssen. Dies hat naturgemäß zur Folge, dass das 100 mV Kriterium erst nach Abschluss des Einregelungszeitraums erreicht werden kann.

Bild 11 zeigt den Verlauf der Treibspannungen, der Ströme sowie die Ergebnisse der Depolarisationsmessungen von Ende November 2006 bis Ende Februar 2007 exemplarisch für Deck 3, Schutzzone 3A. Daraus ist ersichtlich, dass das 100 mV Kriterium nach knapp dreimo-

natigem Betrieb bereits an vier von insgesamt sechs Messstellen in der Schutzzone 3 A erreicht wird. Die positive Langzeitwirkung der kathodischen Polarisierung der Bewehrung kann anhand der steigenden Depolarisationswerte bei gleichbleibender Treibspannung und geringfügig sinkender Schutzstromdichte qualitativ nachvollzogen werden. Der Erfolg der KKS-Maßnahme wird demnach, zumindest teilweise, bereits nach den ersten Betriebsmonaten anhand der vorliegenden Daten ersichtlich. An der Messstelle R06 wird das 100 mV Kriterium zwar noch weit unterschritten, jedoch ist dies kein Hinweis darauf, dass die Anlage nicht ordnungsgemäß funktioniert. Die unzureichende Depolarisation bei Messpunkt R06 verdeutlicht lediglich, dass die Treibspannungen hier noch nicht ausreichend hoch sind. Neben der Notwendigkeit zum weiteren Einregeln wird anhand der Messstelle R06 ebenso deutlich, wie wichtig die Möglichkeit zum Monitoring instandgesetzter Bauteile ist, und wie vorteilhaft es sein kann, nach Abschluss der Instandsetzung regelnd eingreifen zu können.

## 8 Zusammenfassende Beurteilung

Die Instandsetzung des Parkhauses „Am Gericht“ in der Heiligkreuzgasse im Zentrum Frankfurts stellt ein gelungenes Beispiel für den vorteilhaften Einsatz des kathodischen Korrosionsschutzes im Bauwesen dar. Die Durchführung der Maßnahme gestaltete sich aufgrund der guten Zusammenarbeit zwischen Planern und Ausführenden im gegenseitigen Einvernehmen mit dem Bauherrn im Großen und Ganzen unproblematisch. Alle Schwierigkeiten, die sich im Rahmen jeder Instandsetzungsmaßnahme, unabhängig vom Verfahren, während der Ausführung ergeben, konnten durch ein hohes Maß an Flexibilität aller Beteiligten sowie durch schnelles und unbürokratisches Handeln mit dem geringstmöglichen Aufwand behoben werden. Der kathodische Korrosionsschutz hat sich im Rahmen der beschriebenen Baumaßnahme als wirtschaftlicher, sowohl im Hinblick auf die Bauzeit, als auch unter Berücksichtigung aller anfallenden Kosten, bewährt. Der nach *Motzke* [20], „massiven Beratungspflicht des Planers“ konnte durch den Einsatz eines externen Fachmanns auf dem Gebiet des kathodischen Korrosionsschutzes nachgekommen werden. So konnten auch die „rechtlichen Klippen“ des KKS umschiffen und die Instandsetzung des Parkhauses zu einer alle Seiten zufrieden stellenden Maßnahme geführt werden.

## 9 Ausblick

Der kathodische Korrosionsschutz von Stahl in Beton erweist sich immer häufiger nicht nur als wirtschaftliche, sondern im Vergleich mit anderen Möglichkeiten auch als problemlosere Maßnahme bei der Instandsetzung chloridgeschädigter Bauwerke. Die Vorteile des KKS liegen dabei nicht nur bei dem deutlich geringeren Umfang an Eingriffen in die bestehende Konstruktion, sondern auch und wesentlich in der Möglichkeit des Monitorings, anhand dessen der Erfolg der Instandsetzung permanent nachvollzogen werden kann und welches es ermöglicht, steuernd, auch nach Abschluss der Instandsetzung, einzugreifen. Dieser häufig noch unterschätzte Aspekt des Instandset-

zens mittels kathodischen Korrosionsschutzes muss in Zukunft deutlich stärker in die Bewertung der Wirtschaftlichkeit einfließen.

## Literatur

- [1] *Raupach, M.*: Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. Berlin: Beuth. In: Schriftenreihe des deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1992), Nr. 433.
- [2] *Breit, W.*: Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt – Untersuchungen an Mörtelektroden in chloridhaltigen alkalischen Lösungen. *Materials and Corrosion*, Volume 54, Issue 6, Date: June 2003, Pages: 430–439.
- [3] *Breit, W.*: Kritischer Chloridgehalt – Untersuchungen an Stahl in chloridhaltigen alkalischen Lösungen. *Materials and Corrosion*, Volume 49, Issue 8, Date: August 1998, Pages: 539–550.
- [4] *H. Kaesche*: Die Korrosion der Metalle, zweite Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1979.
- [5] *E. Heitz und W. Schwenk*: Theoretische Grundlagen der Ermittlung von Korrosionsstromdichten aus Polarisationswiderständen. *Materials and Corrosion/Werkstoffe und Korrosion*, Volume 27, Issue 4, Date: April 1976, Pages: 241–245.
- [6] *Bertolini, L., Bolzoni, F. and Pedeferra, P.*, et al.: Cathodic protection and cathodic prevention in concrete: principles and applications; *JOURNAL OF APPLIED ELECTROCHEMISTRY*, 28 (12): 1321–1331 DEC 1998.
- [7] *Glass, G. K., Hassanein, A. M. and Buenfeld, N.R.*: Monitoring the passivation of steel in concrete induced by cathodic protection. *CORROSION SCIENCE*, 39 (8): 1451–1458 AUG 1997.
- [8] DIN EN 12696, 2000-06, „Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton“, Deutsche Fassung EN 12696:2000, CEN.
- [9] SHRP-S-670: Control Criteria and Materials Performance Studies for Cathodic Protection of Reinforced Concrete. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC 1993.
- [10] *John E. Bennett*: JE Bennett Consultants Inc.; William McCord, The Euclid Chemical Co. „Performance of Zinc Anodes used to Extend the Life of Concrete Patch Repair“ Paper 06331, CORROSION'06, San Diego.
- [11] *J. Mietz, J. Fischer und B. Isecke*: Langzeiterfahrungen mit einem kathodischen Korrosionsschutzsystem für Stahl in Beton. *Materials and Corrosion*, Volume 52, Issue 12, Date: December 2001, Pages: 920–930.
- [12] *J. P. Broomfield, J. Rodriguez, L. M. Ortega and A. M. Garcia*: in *Concrete Bridges in Aggressive Environments*, Philip D. Cady, International Symposium, Minneapolis, November 9–10, 1993, Weyers, R.E.(Ed.), Detroit, American Concrete Institute, ACI SP-151, 1994. P. 163–181.
- [13] *Baeckmann, W. v. und Schwenk, W.*: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes; 2. Auflage. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1980.
- [14] *John P. Broomfield*: Corrosion of Steel in Concrete, understanding, investigation and repair. E&FN Spon London, Weinheim; New York; Tokyo, Melbourne, Madras 1997.
- [15] Richtlinie „Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauteilen“, Ausgabe: Dezember 2003, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik.
- [16] Heft 57 / Juni 2004 Schriftenreihe der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik, „Einführung in die neue Richtlinie KATHODISCHER KORROSIONSSCHUTZ“.

- [17] Engelbach + Partner: Schadensgutachten zur Betonkonstruktion, Parkhaus „Am Gericht“, Frankfurt am Main.
- [18] Engelbach + Partner: 1. Fortschreibung zum Schadensgutachten vom 15. 08. 2003, Parkhaus „Am Gericht“, Frankfurt am Main.
- [19] A. Burkert und T. Eichler: Bestimmung des spezifischen Betonwiderstandes an Bohrkernen, BAM-Prüfbericht VII.3/14240, Berlin, Dez. 2005.
- [20] Gerd Motzke: Diskussionsforum: Vertrags- und haftungsrechtliche Gesichtspunkte bei Planung und Ausführung von kathodischem Korrosionsschutz und Chloridextraktion. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 1, Seite 53–58.



Dr.-Ing. Hans-H. Klein  
eup-ffm@t-online.de



Dipl.-Ing. Andreas Schade  
eup-ffm@t-online.de

ENGELBACH + PARTNER INGENIEURGESELLSCHAFT MBH  
Sophienstraße 48  
60487 Frankfurt am Main



Dipl.-Ing. Thorsten Eichler  
thorsten.eichler@bam.de

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin



Dir. Prof. Dr.-Ing. Bernd Isecke  
bernd.isecke@bam.de



Mag. Dr. Dr.-Ing. Franz Pruckner  
Technische Planung Stahlbetonschutz  
V&C Kathodischer Korrosionsschutz GmbH  
Josef Perger-Straße 2/A-05  
3031 Pressbaum, Österreich  
franz.pruckner@vc-austria.com



Dipl.-Ing. Stefan Michel  
Frankfurter Aufbau AG  
Gutleutstraße 40  
60329 Frankfurt am Main  
s.michel@faag.abg-fh.de