

Hans-H. Klein
 Andreas Schade
 Thorsten Eichler
 Franz Pruckner

Parkhaus „Am Gericht“ in Frankfurt am Main – Eine Sanierung mit kathodischem Korrosionsschutz

Parkhäuser haben nach mehreren Jahrzehnten der Nutzung häufig Sanierungsbedarf in Bezug auf die tragende Stahlbetonkonstruktion, die durch eingedrungene Chloride aus eingeschlepptem Tausalz und die hierdurch hervorgerufene Korrosion der Bewehrung in der Tragfähigkeit erheblich beeinträchtigt sein kann. Das Verfahren des kathodischen Korrosionsschutzes kann hier als elektrochemisches Instandsetzungsverfahren eine wirtschaftliche und zuverlässige Alternative zu herkömmlichen Sanierungsverfahren bieten. Voraussetzungen sind intensive Voruntersuchungen, die Kenntnis der sinnvollen Anwendungsgrenzen des Systems, eine qualitativ hochwertige bauliche Umsetzung des Systems und die Nutzung der Möglichkeiten der Überwachung des Instandsetzungserfolges durch Monitoring, was am Beispiel des Parkhauses „Am Gericht“ in Frankfurt am Main erläutert wird.

Parking garage „Am Gericht“ in Frankfurt am Main – a refurbishment with cathodic corrosion protection. *After several decades in use a refurbishment is often necessary for the bearing structure of reinforced concrete parking garages due to chlorides, which have been brought into concrete by road salt, and the resulting corrosion of the reinforcement, which may lead to a serious decrease of the bearing capacity. With the system of the cathodic protection of the reinforcement exists a cost-effective and reliable technique as an alternative to common solutions. An intensive investigation of the structure, the knowledge of the reasonable limits of the system, excellent design and execution of the construction work and the monitoring of the working system are nevertheless required, which is illustrated by the example of the parking garage „Am Gericht“ in Frankfurt am Main.*

bundestrich mit einer Dicke zwischen 2 cm und 5 cm, eine Abdichtung war nicht vorhanden.

Die Bodenflächen wiesen neben dem altersentsprechend zum großen Teil hohlliegenden und gerissenen Estrich insbesondere in den Ebenen 1 bis 4 an der Deckenoberseite Bereiche mit Abplatzungen des Konstruktionsbetons und stark korrodierten Trageisen (obere Decken- und Unterzugsbewehrung) auf. Schäden waren auch an den Stützenfüßen vorhanden. 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 somit, aufgrund der Volumenvergrößerung der Bewehrung, Betonabplatzungen und Hohllagen.

1 Objektvorstellung

1.1 Gebäudebeschreibung und Schadensbild

Das im Jahr 1963 errichtete und im Eigentum der Frankfurter Aufbau AG befindliche Parkhaus „Am Gericht“ im Zentrum von Frankfurt am Main wurde als Stahlbetonskelettkonstruktion aus Ortbeton B 300 erstellt. Es besteht aus einem Kellergeschoss (Parkflächen), Erdgeschoss (Ein-, Ausfahrt sowie Lagerbereiche) und sieben Obergeschossen, die als Parkflächen dienen, wobei jede Ebene eine Grundfläche von ca. 2500 m² aufweist.

Die überwiegend zweiachsig gespannten Deckenplatten mit einer Dicke von 15 cm liegen auf Unterzügen in Quer- und Längsrichtung auf. Auf der Rohbetondecke befand sich weitgehend der ursprüngliche Ver-



Bild 1. Parkhaus „Am Gericht“, Einfahrt

Fig. 1. Parking garage „Am Gericht“, entrance



Bild 2. Rissbildung im Estrich
Fig. 2. Crack formation in the screed



Bild 3. Teilweise korrodierte Bewehrung
Fig. 3. Corrosion of reinforcement

1.2 Untersuchungen und Bauwerksprüfung

Die im Vorfeld erfolgten Untersuchungen zur Erfassung und Bewertung der Bauschäden erfolgten in mehreren Schritten und beinhalteten zunächst folgende Materialprüfungen:

- Bestimmung des Chloridgehalts in den Tiefenlagen 0 bis 3 und 3 bis 6 cm
- Bauteilöffnungen zur Feststellung des Korrosionsgrades der Bewehrung
- Messung der Betondruck- und Betonhaftzugfestigkeiten
- flächenhafte Messung der Betondeckung mittels Bewehrungs-Ortungsgesetz
- flächenhafte Potentialfeldmessung
- Kontinuitätsprüfung der Bewehrung durch Widerstandsmessungen
- Flächennivellement zur Feststellung von Deckendurchbiegungen, -unebenheiten
- Ermittlung der Karbonatisierungstiefe

Zusammenfassend war nach Vorliegen der Untersuchungsergebnisse Folgendes festzustellen:

- vielfach gerissener und hohl liegender Estrich
- in die Deckenkonstruktion eingedrungene Feuchtigkeit
- in Teilbereichen, aber nicht großflächig, korrodierte Bewehrung
- tragfähigkeitsrelevante Querschnittsverluste nur punktuell vorhanden
- Betondeckung der oberen Deckenbewehrung ausreichend
- sehr hoher Chlorideintrag mit bis zu 5,7 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt
- Betondruckfestigkeit und Haftzugwerte entsprechend der planmäßigen Betonqualität

1.3 Zur Auswahl des Instandsetzungsverfahrens

Das durch das Ingenieurbüro Engelbach + Partner durchgeführte Schadensgutachten mündete auf der Grundlage der vorgenannten Bauwerksuntersuchungen wegen der hohen Chloridbelastung der Bodenflächen im 1., 2. und im 3. Obergeschoss in zwei alternativen Vorschlägen zum Sanierungskonzept:

- **Alternative 1:** Konventionelle Sanierung mit einem flächenhaften Abtrag des Betons mittels Höchstdruckwasserstrahlen mit anschließender Reprofilierung der Konstruktion durch bewehrten Aufbeton und nachfolgende Beschichtung (Instandsetzungsprinzip R)

- **Alternative 2:** Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes (KKS – Instandsetzungsprinzip K)

Die **Vorteile und Nachteile der Verfahren** konnten wie folgt zusammengefasst werden:

• Alternative 1

Vorteile:

- vollständige Entfernung der Chloride
- weitgehend unabhängig von der Qualität des Bestandsbetons
- Ersatzbewehrung problemlos einbaubar
- bewährtes Verfahren

Nachteile:

- hoher Lärm- und Erschütterungseintrag
- hohe Wahrscheinlichkeit von partiellen Zerstörungen der vergleichsweise dünnen Decke (d = 15 cm)

- anfallendes Wasser ungünstig wegen genutzter Räume im Erdgeschoß
- teurer

- aus statischer Sicht: erhebliche Zwängungs- und Verbundspannungen in der Verbundkonstruktion (Altdecke + Aufbeton), bedingt durch ein (ungünstig) hohes Verhältnis der Dicke des Aufbetons im Verhältnis zum verbleibenden Restquerschnitt der Decke nach Höchstdruckwasserstrahlen

• Alternative 2

Vorteile:

- geringe Eingriffe in die 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 i. W. intakt

Nachteile:

- höhere Anforderungen an den vorhandenen Beton (Haftzugwerte, Betondeckung ...)
- bei großflächig erforderlichem Bewehrungsersatz wirtschaftlich nicht sinnvoll
- in der praktischen Umsetzung vergleichsweise geringere Erfahrung

Unter Abwägung aller Vor- und Nachteile hat sich die FAAG zu einer Instandsetzung mit dem KKS-System mit folgendem Bodenaufbau entschieden:

- Altbeton (Rohdecke), feucht sandgestrahlt
- Schadensstellenreparatur und -reprofilierung mit Betonersatzsystem

- mineralische Haftbrücke
- Ausgleichsschicht (max. 10 mm zum Ausgleich von Unebenheiten)
- Anodenbänder und Installation
- Einbettmörtel
- Thermofalt-Belag

1.4 Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Das KKS-System ist ein innovatives Verfahren zum Schutz der Bewehrung in Stahlbetonbauwerken. Dementsprechend gibt es noch keinen umfangreichen Fundus zu den anerkannten Regeln der Technik. Von besonderer Bedeutung ist daher die Einbindung externer Sonderfachleute zur unabhängigen Prüfung von Entwurf und Einbau des KKS-Systems.

Als Ergänzung zu der durch die FAAG Technik GmbH vorgenommenen Objektüberwachung sowie der Fachbauleitung durch die Engelbach + Partner GmbH wurde daher aufgrund der langjährigen Erfahrungen auf diesem Fachgebiet die Bundesanstalt für Materialprüfung in Berlin (BAM, Abt. VII – Korrosion und Korrosionsschutz – Prof. Dr.-Ing. Bernd Isecke) als externer Sonderfachmann und zur Qualitätssicherung eingesetzt.

2 Korrosion und kathodischer Korrosionsschutz

2.1 Was ist Korrosion

Unter Korrosion versteht man die Reaktion eines Werkstoffs mit seiner Umgebung (Luft, Wasser etc.), die eine messbare Veränderung der physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften bewirkt und zu einem Korrosionsschaden (einer Verminderung der Brauchbarkeit) führen kann. Die ablaufenden Korrosionsreaktionen sind bei metallischen Werkstoffen und wässrigen Medien im Allgemeinen elektrochemischer Art. Dabei sind beide Reaktionspartner (metallischer Werkstoff, Elektrolytlösung) elektrische Leiter. Bei den Korrosionsreaktionen liegen elektrochemische Teilschritte vor, die durch elektrische Variable beeinflusst werden können. Dazu zählt der elektrische Strom I , der durch die Phasengrenzfläche Metall/Elektrolytlösung fließt, und das gegen eine Bezugselektrode messbare Elektrodenpotential E .

Elektrochemische Korrosionsvorgänge können elektrisch beeinflusst werden; das bedeutet, dass die

die Korrosionsgeschwindigkeit beschreibenden Größen (Abtragungsrates, Lochbildungsrate etc.) mit dem elektrochemischen Potential im Zusammenhang stehen. Das an der Grenzfläche herrschende Potential kann durch chemische (Einwirken eines Redoxsystems) oder elektrische Wirkung (Fluss von elektrischen Strömen) verändert werden, wobei der Ablauf der Korrosion gehindert oder gefördert wird.

Die Kenntnis der Potentialabhängigkeit der ablaufenden Korrosionsvorgänge ist die Voraussetzung für die Konzeption elektrochemischer Korrosionsschutzverfahren.

Elektrochemischer Korrosionsschutz hat die Aufgabe, eine Korrosionsgefährdung eines Werkstücks zu vermindern oder möglichst aufzuheben. Beim kathodischen Korrosionsschutz wird durch gezieltes Einwirken eines Gleichstroms das zu schützende Objekt (z. B. die Bewehrung in Beton) in einen Potentialbereich gebracht, in dem kein Korrosionsschaden auftreten kann.

2.2 Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton

Der kathodische Schutz besitzt in vielen technischen Bereichen eine langjährige Tradition. In den meisten Fällen wird er als zusätzliches Korrosionsschutzverfahren in Verbindung mit Beschichtungen auf Werkstoffen eingesetzt, um beispielsweise bei erdverlegten Rohrleitungen die aus Fehl-

stellen in der Beschichtung resultierenden, mit dem Korrosionsmedium in Kontakt stehenden Oberflächenbereiche zu schützen.

Der Gedanke, kathodischen Schutz auch bei der Sanierung korrosionsgefährdeter Stahlbetonbauten einzusetzen, wurde in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts in den USA entwickelt. 1973 applizierte *Richard Stratfull* kathodischen Korrosionsschutz an der Sly-Park-Brücke in Kalifornien. Das System war erfolgreich, und seit dieser Zeit hat sich die Methode des kathodischen Korrosionsschutzes aufgrund des Erfolgs bei der Sanierung von Stahlbetonbrücken des Interstate Highway Systems, die durch häufige Verwendung von Streusalz stark geschädigt waren und bei denen die konventionellen Sanierungsansätze erfolglos blieben, ausgezeichnet bewährt.

Häufig wird durch sogenanntes „Patch-Repair“, d. i. lokales Ausbessern der geschädigten Bereiche mit Reparaturmörtel, das Korrosionsverhalten der Bewehrung verschlechtert, weil dadurch ein zusätzliches galvanisches Element geschaffen wird und somit die Korrosion weiterhin fortschreiten kann (siehe Bild 4).

Das Prinzip des kathodischen Korrosionsschutzes beruht darauf, dass die anodische Teilreaktion, nämlich die Eisenauflösung, durch einen entgegengesetzt gerichteten Gleichstrom unterbunden wird. Hierzu wird auf die Betonoberfläche eine dauerhafte Anode aufgebracht. Die an einer

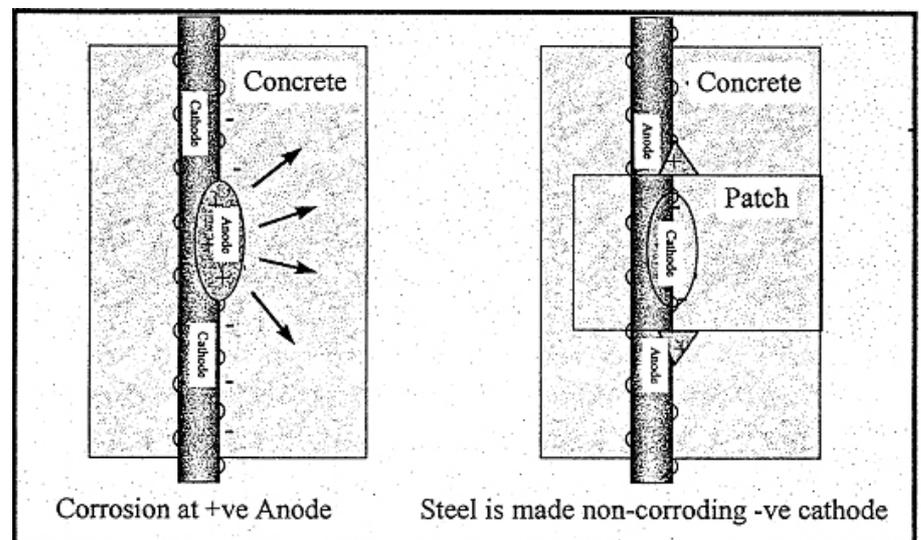


Bild 4. Bildung einer Lokalanode rund um die Ausbesserungsstelle
Fig. 4. Local anode generation by local concrete repair

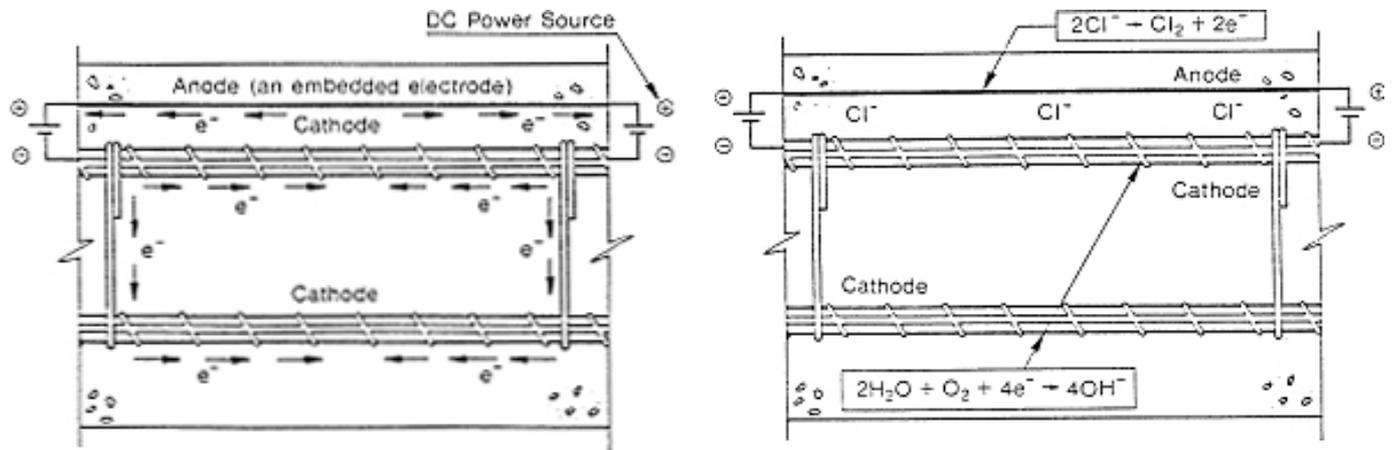


Bild 5. Unterbinden der Korrosion durch Installation eines kathodischen Korrosionsschutzsystems
 Fig. 5. Prevention of corrosion by cathodic protection system

Stelle freigelegte Bewehrung wird an den Minuspol und die Anode an den Pluspol eines als Stromquelle dienenden Gleichrichters angeschlossen (Bild 5). Nach Einschalten der Stromquelle wird durch den Elektronenfluss die Bewehrung kathodisch polarisiert – es entsteht ein „Elektronendruck“, so dass eine anodische Metallauflösung (unter Elektronenabgabe) weitgehend unterbunden wird. Das Verfahren bietet den Vorteil, dass chloridverseuchte Zonen im Gegensatz zu konventionellen Methoden nicht mehr abgetragen werden müssen.

Zusätzlich werden Sensoren eingebaut, mit denen die Funktion der Anlage und des Schutzes laufend überprüft werden kann.

Eine ausführlichere Darstellung der theoretischen Grundlagen des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahl in Beton ist z. B. [5] und [6] bis [9] zu entnehmen.

3 Instandsetzung mit KKS beim Parkhaus „Am Gericht“

3.1 Randbedingungen und Voraussetzungen für den Einsatz des KKS

Die Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes regelt die DIN EN 12696, Ausgabe 2000 [4]. Für den erfolgreichen Einsatz des KKS müssen die nachstehend beschriebenen Randbedingungen entsprechend der DIN 12696, der DIN 1045 und der DAfStb-Richtlinie eingehalten werden. Diese Voraussetzungen sind:

- Die vorhandene Bewehrung darf nicht standsicherheitsrelevant geschädigt sein oder muss in den betroffenen Teilbereichen ersetzt werden.

- Die gesamte im KKS-System zu schützende Bewehrung muss durchgängig leitfähig miteinander verbunden sein (Kontinuitätsprüfung, 1 Ohm-Kriterium, DIN 12696 §§ 5.7, 7.1 und 7.3).

- Die Anode darf keine leitfähige Verbindung mit der Bewehrung haben, der Kontakt würde einen Kurzschluss zur Folge haben (Unwirksamkeit der KKS-Maßnahme).

- Der Mindestabstand der Anode des KKS zur Bewehrung muss 15 mm betragen; da im vorliegenden Fall Deckenoberseiten und Stützenfüße geschützt werden müssen, ist der Mindestabstand an beiden Bauteilen einzuhalten.

- Der Einsatz eines definiert leitenden Mörtels oder Betons zwischen Anode und Bewehrung (DIN 12696 §§ 5.10 und 5.11) ist erforderlich.

- Die Verbundfestigkeit zwischen Beton und Überdeckung muss i. M. 1,5 N/mm² betragen, der einzuhaltende Minimalwert beträgt 1,0 N/mm² (DIN 12696 § 5.11).

- Im zu schützenden Bereich dürfen keine Hohllagen im Beton vorhanden sein.

3.2 Voruntersuchungen bei der Sanierung

Um ein einwandfrei funktionierendes KKS-System installieren zu können, sind zunächst einige Messungen erforderlich. Viele dieser Messungen kommen bei jeder Betonsanierung im Vorfeld zum Einsatz, einige jedoch werden beim Einsatz von KKS zusätzlich angewandt. Diese sind für das Design und die Installation essentiell.

3.2.1 Flächige Überdeckungsmessung der Bewehrung

Bei den meisten Anodensystemen wird eine Anode entweder in Form von Netzen oder Streifen auf die existierende Betonoberfläche aufgebracht. Bei allen Verlegemethoden ist eine hinreichende Überdeckung der Bewehrung zwingend erforderlich. Kurzschlüsse oder auch nur „Beinahe-Kurzschlüsse“ sind tunlichst zu vermeiden, da die Bewehrung an dieser Stelle sonst nicht kathodisch geschützt wird, sondern die Korrosion der Bewehrung dort sogar beschleunigt werden kann. Eine flächige Messung der Bewehrungsüberdeckung gibt Aufschluss über die Bereiche unzureichender Überdeckung, die an diesen Stellen durch eine Ausgleichsschicht auf ein ausreichendes Maß erhöht werden kann. Für die Bereiche innerhalb der gelben Begrenzungslinie in Bild 6 war zur Vermeidung von Kurzschlüssen eine Ausgleichsschicht nötig.

3.2.2 Messung der elektrischen Durchverbindung der Bewehrung

Beim kathodischen Schutz muss die gesamte zu schützende Bewehrung miteinander elektrisch verbunden sein, gleichsam gemeinsam einen Pol bilden. Nur die Bewehrungsstäbe, welche Teil dieses negativen elektrischen Pols sind, erfahren Schutz. Die von diesem Pol elektrisch isolierten Bewehrungsstäbe erfahren keinerlei Schutz, sie können unter Umständen durch Streuströme sogar erhöht korrosionsgefährdet sein.

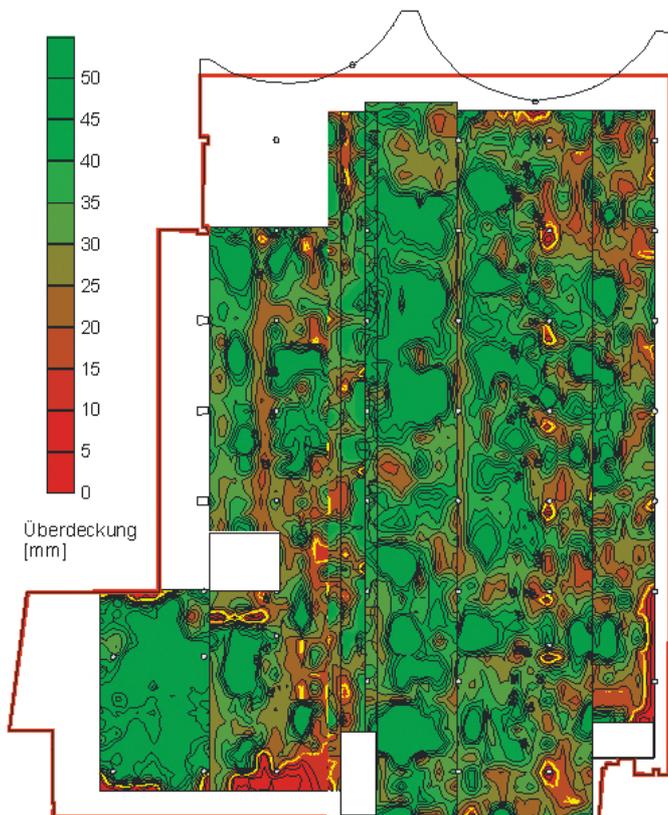


Bild 6. Flächige Messung der Überdeckung für Ebene 3; innerhalb der gelben Begrenzungslinie ist die Überdeckung kleiner 10 mm
 Fig. 6. Two-dimensional measurement of concrete cover

Die Kontrolle der durchleitenden elektrischen Verbindung ist daher zwingend nötig und muss nachträglich mit aller Sorgfalt durchgeführt werden. Gegebenenfalls ist die Durchverbindung nachträglich herzustellen. Im vorliegenden Fall war sämtliche Bewehrung durchverbunden.

3.2.3 Potentialfeldmessung, Betonwiderstandsmessung und Schutzstrombedarf

Für ein möglichst genaues Design des kathodischen Korrosionsschutzes ist die Kenntnis der durchschnittlichen Korrosionsrate hilfreich. Dadurch kann der Schutzstrombedarf hinreichend genau abgeschätzt werden, was sich in der Regel positiv auf die Lebensdauer der Materialien auswirkt. Zum Beispiel wird durch Unterschätzung des Schutzstrombedarfs im Designstadium das Anoden- samt Einbettungssystem über Gebühr belastet.

Zur Abschätzung der erforderlichen Schutzstromdichte kann man sich der folgenden Faustregeln bedienen. Die Korrosionsrate (Korrosionsstromdichte) lässt sich einerseits em-

pirisch aus der Potentialfeldmessung abschätzen, andererseits können auch die Werte aus den Betonwiderstandsmessungen verwendet werden.

Der Zusammenhang zwischen Korrosionspotential und Korrosionsstromdichte ist im Wesentlichen loga-

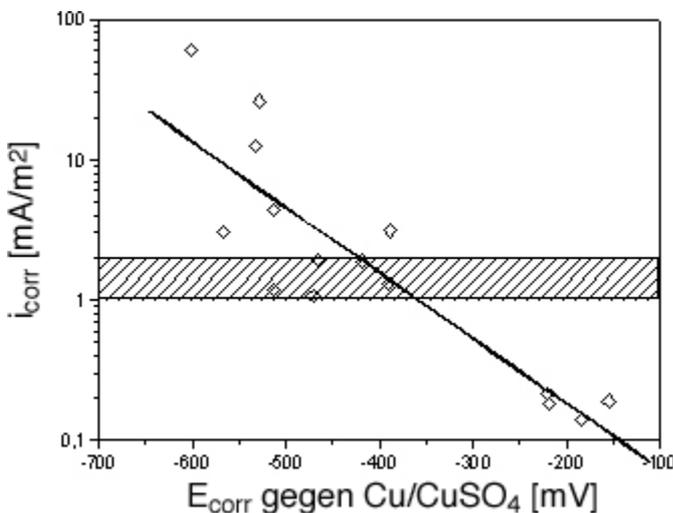


Bild 7. Zusammenhang zwischen Korrosionsstromdichte und Korrosionspotential nach Glass et al. [1]; der schraffierte Bereich kennzeichnet den Übergangsbereich vom aktiv korrodierenden zum passiven Eisen
 Fig. 7. Correlation of corrosion current density vs. corrosion potential

rithmisch. Aber genauere Aussagen, als dass bei niedrigen (sehr negativen) Werten hohe Korrosionswahrscheinlichkeit, dagegen bei hohen (sehr positiven) Werten geringe Wahrscheinlichkeit besteht, können nicht getroffen werden. Bild 7 zeigt den Zusammenhang zwischen Werten für Korrosionspotentiale und Korrosionsstromdichten unter Verwendung der Daten von Glass et al. [1].

Für das Parkhaus „Am Gericht“ wurde eine erforderliche Schutzstromdichte von ca. 13 mA/m² Stahloberfläche ermittelt, um eine Polarisierung von 150 mV zu erreichen. Dagegen beträgt die für 100 mV Polarisierung erforderliche Schutzstromdichte nur 6,5 mA/m² Bewehrungsfläche. In den Bildern 8 und 9 wird die Verteilung des Betonwiderstands sowie der Bewehrungspotentiale gezeigt.

Interessant ist die statistische Auswertung der Messparameter (Bilder 10 bis 12).

Die Auswertungen zeigen deutlich, dass in Ebene 3 ca. 50 % der Bewehrung in stark korrosionsgefährdeter Umgebung liegen – das ist in guter Übereinstimmung mit der Zustandserfassung durch das Ingenieurbüro.

3.3 Bauliche Umsetzung/Besonderheiten der Ausführung

Bei der Ausarbeitung des Sanierungsvorschlags und der Wahl des Schichtenaufbaus war zu beachten, dass die vorhandenen Stahlbetondecken eine

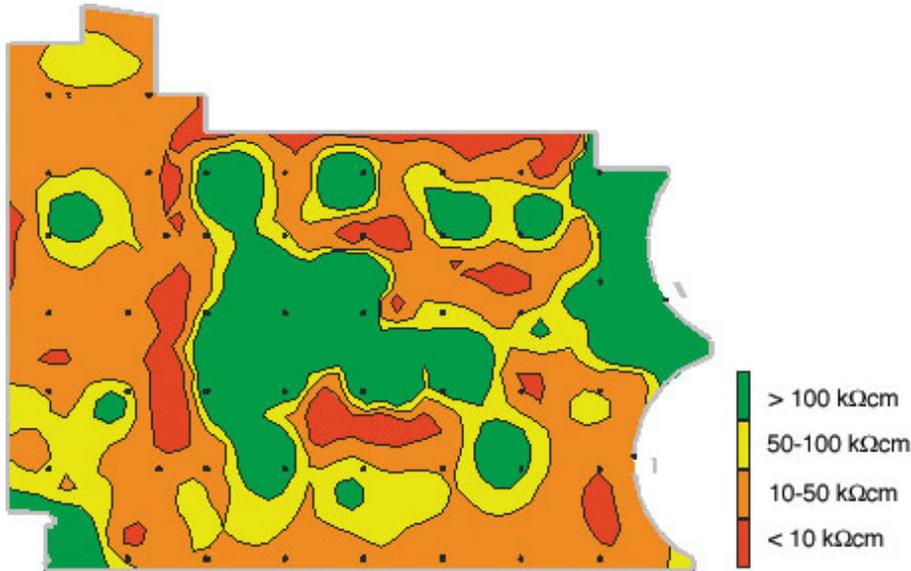


Bild 8. Verteilung des Betonwiderstandes in Ebene 3
Fig 8. Allocation of concrete resistance in floor 3

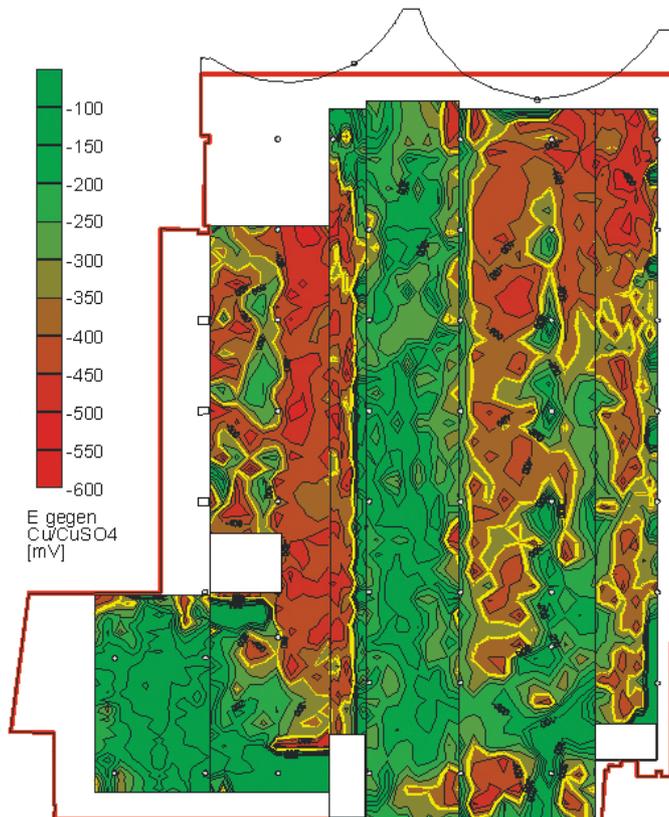


Bild 9. Laterale Verteilung der Bewehrungspotentiale in Ebene 3; die gelbe Linie wurde bei -350 mV gezogen, jenseits derer eine Korrosionswahrscheinlichkeit von > 95 % anzunehmen ist (nach [2])
Fig 9. Allocation of reinforcement potentials in floor 3; yellow line at 350 mV indicates that corrosion probability of reinforcement is more than 95 % (ref. [2])

Dicke von nur 15 cm besaßen. Des Weiteren musste anstelle des alten und abzubrechenden Estrichs eine Ausgleichsschicht für die Aufnahme des KKS-Systems, zur Herstellung des alten Höhenniveaus und zum Aus-

gleich der im Bestand vorhandenen Durchbiegungen der Decke Berücksichtigung finden.

Bei der Planung musste weiter berücksichtigt werden, dass ein zu dicker und im Verbund aufgebrachter

mineralischer Aufbau hohe Schubspannungen in der Verbundfuge hervorrufen würde. Unterschreitungen von Haftzugwerten, bedingt durch vorhandene Unregelmäßigkeiten der Betongüte im Bestand, können dann zur Ablösung des Aufbaus und damit zur Unwirksamkeit des KKS-Systems im betreffenden Teilbereich führen, da die erforderliche vollflächig leitfähige Verbindung zwischen Rohdecke und der Anodeneinbettschicht nicht mehr gegeben wäre.

Weiterhin würde ein zu dicker Aufbau in Verbindung mit hohen Einbaudicken des Ersatzbetons für die Betonsanierung die Gefahr von hohen Zwangsbeanspruchungen in der Bestandsdecke und ggf. damit einhergehende Deckenverformungen wesentlich vergrößern. Die Festigkeitsparameter des vorhandenen Betons der Decken waren deshalb wesentliche Entwurfskriterien für den Aufbau der Bodenflächen. Darüber hinaus waren selbstverständlich die Kriterien der statischen Tragfähigkeit der Konstruktion zu berücksichtigen.

Überdeckung:

ÜD [mm]	Kommentar
> 25	Hinreichend
10 ≤ ÜD ≤ 25	Mangelhaft
< 10	Gefahr von Kurzschlüssen

Erfahrungswerte ...

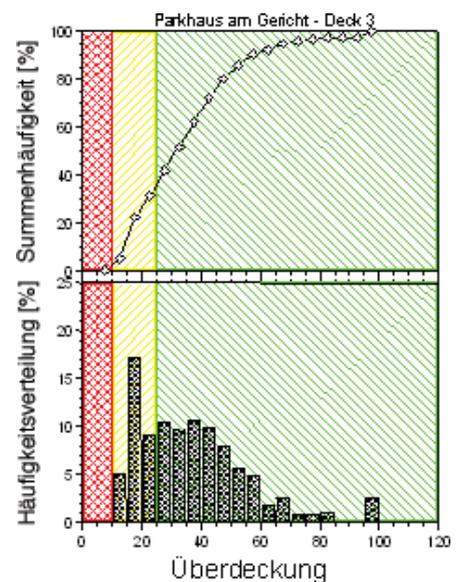


Bild 10. Messung und Bewertung der Betondeckungen
Fig. 10. Measurement and valuation of concrete cover

Potentiale:

E [mV]	Korrosionswahrscheinlichkeit
> -200	Korrosionswahrscheinlichkeit < 5 %
-350 ≤ E ≤ -200	Korrosionswahrscheinlichkeit unbestimmt
< -350	Korrosionswahrscheinlichkeit > 95 %

Korrosionswahrscheinlichkeit nach [2]

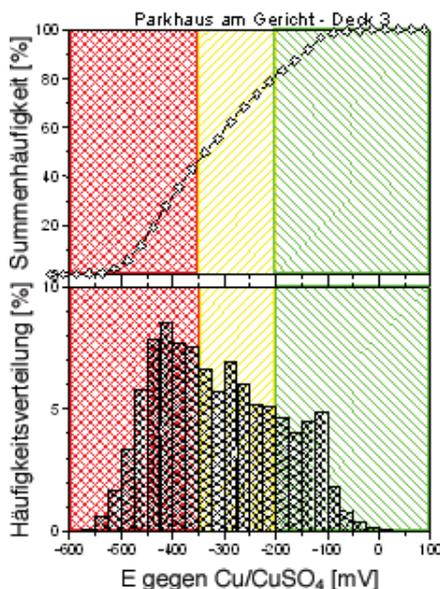


Bild 11. Gemessene Potentiale und Korrosionswahrscheinlichkeit nach [2]
 Fig. 11. Measurement and valuation of potentials and corrosion probability ref. to [2]

Um den vorab genannten Randbedingungen Rechnung zu tragen, fand ein Systemaufbau in Verbindung mit den erforderlichen Untergrundvorbehandlungen nach Bild 13 Anwendung:

Die einzelnen Arbeitsschritte gliederten sich folgendermaßen.

1. vollständiger Abbruch des vorhandenen Verbundstrichs im Bestand
2. Prüfung der gesamten Betonfläche auf Hohlstellen und Abplatzungen
3. Abstimmen von minderfestem Konstruktionsbeton (Bild 14)
4. Ersatz geschwächter Bewehrungsquerschnitte (Bild 15)

Statisch nicht mehr ausreichend tragfähige Bewehrung ist auch beim KKS zu ergänzen. Im Unterschied zur klassischen Betonsanierung hat der Einbau des KKS-Systems den entschei-

Betonwiderstand:

ρ [$k\Omega \cdot cm$]	Korrosionswahrscheinlichkeit
< 10	Widerstand ist nicht der kontrollierende Faktor
10–50	mäßig bis hohe Korrosionsrate bei depassiviertem Stahl
50–100	niedrige Korrosionsrate
> 100	kann nicht zwischen aktivem und passivem Stahl unterschieden werden

Korrosionswahrscheinlichkeit nach [3]

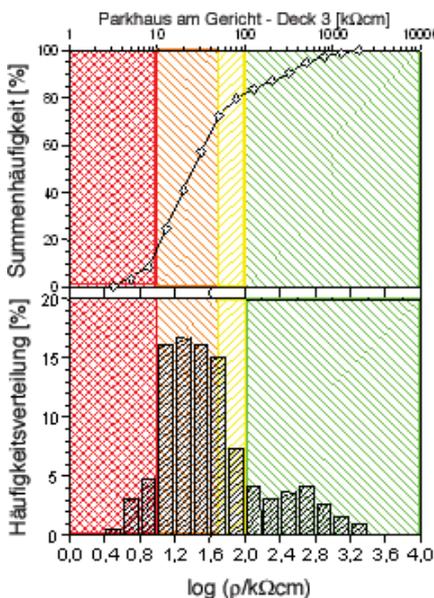


Bild 12. Gemessener Betonwiderstand und Korrosionswahrscheinlichkeit nach [3]
 Fig. 12. Measurement and valuation of concrete resistance and corrosion probability ref. to [3]

denden Vorteil, dass chloridbelasteter Beton nicht flächenhaft aufwendig und in großen Tiefen abgetragen werden muss und die freiliegenden Bewehrungseisen nicht im Sandstrahlverfahren metallisch blank (SA 2 1/2)

hergestellt werden müssen, sondern lediglich ein Normreinheitsgrad SA 1 nach DIN 12944 erforderlich ist.

5. Durchführung von Schadstellen-sanierungen

Kleinere Schadstellen wurden mit einem für KKS-Systeme geprüften und zugelassenen PCC-Betonersatz (Sika-Top ES 104/108, SikaTop ES K&H-101) und größere Schadstellen mit einem auf den Bestand abgestimmten Ortbeton verschlossen. Um der erforderlichen Leitfähigkeit des Reprofilierungsmaterials Rechnung zu tragen, sind entsprechend der Forderung der DIN EN 12696 nur Reprofilierungsmaterialien mit definierten und auf den Bestand abgestimmten Leitfähigkeiten einzusetzen.

6. Vorbereitung des Untergrundes

Zur Herstellung einer hochwertigen Basis für den Systemaufbau und zur Erreichung der erforderlichen Haftzugswerte wurde die vorhandene Betonoberfläche in Teilbereichen gefräst und vollflächig feuchtsandgestrahlt. Im Rahmen der Untergrundvorbereitung musste der gesamte Boden auf eingebundene Kleinteile abgesehen werden, um sicherzustellen, dass Kurzschlüsse im aufzubringenden KKS-System infolge elektrisch leitender Verbindung zwischen Anode und Bewehrung ausgeschlossen werden. Um Verbundstörungen zu vermeiden, wurde die gesamte Oberfläche abschließend abgesaugt und von jeglichen Restverschmutzungen befreit.

7. Kontrolle der Haftzugswerte der vorbereiteten Oberfläche (Bild 16)

Entsprechend den Forderungen der RiLi-SIB (DAfStb.-Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Stand Oktober 2001) ist eine Haftzugfestigkeit von mindestens

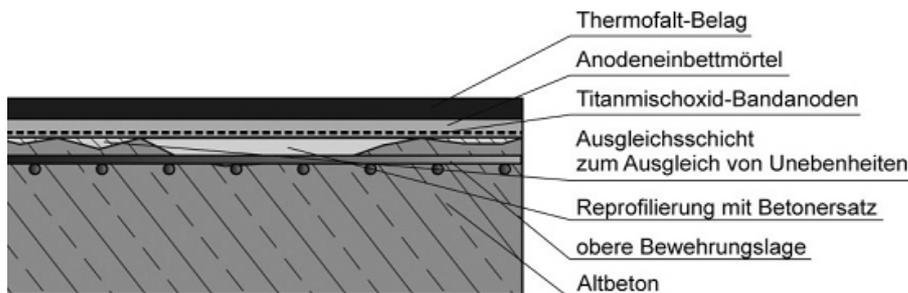


Bild 13. Aufbau des Anodensystems (schematisch), aus [5]
 Fig. 13. Schematic illustration of the cathodic protection system (from [5])

1,5 N/mm² sicherzustellen. Die Haftzugswerte wurden an Musterflächen für die verschiedenen Aufbaustadien vorab geprüft.

8. Aufbringen einer mineralischen Ausgleichsschicht (Bild 16)

Das Aufbringen einer Ausgleichsschicht war erforderlich, um die im Bestand sehr unebene und teilweise geharkte Deckenoberfläche zur Aufnahme der Anode zu egalisieren und um die erforderliche Mindestbetondeckung von



Bild 14. Abstemmen des minderfesten Konstruktionsbetons
Fig. 14. Removing concrete with minor strength



Bild 15. Verstärkungsarbeiten an der Bewehrung
Fig. 15. Strengthening of reinforcement



Bild 16. Kontrolle der Haftzugswerte und Aufbringen der mineralischen Ausgleichsschicht
Fig. 16. Control of adhesion strength and application of levelling course

15 mm zwischen Bewehrung und Anode zu gewährleisten. Durch den dünn-schichtigen Einbau der Ausgleichsschicht als PCC-Mörtel (Sika-Top ES 104/108, SikaTop ES K&H-101) in einer Höhe von ca. 10 mm können die Schubspannungen in der Verbundfuge begrenzt werden. Beim Einbau des steif-plastischen Mörtels musste besonders darauf geachtet werden, dass die vorbereitete Betonoberfläche mit der systemzugehörigen Haftbrücke satt eingestrichen und der Mörtel frisch in frisch einen lückenlosen und flächigen Verbund mit der Rohdecke eingeht. Nur so kann die elektrische Leitfähigkeit zwischen den beiden Schichten und somit die Funktionsfähigkeit des KKS-Systems gewährleistet werden.

9. Applikation des Anodensystems (Bilder 17, 18)

Eine Reihe von elektrischen Anschlüssen muss vor Anbringen des Anodensystems in den Beton eingebaut werden. Das sind vor allem Anschlüsse an die Bewehrung, an das Anodensystem sowie für den Einbau der Überwachungssensoren. Die Farbkodie-

rung für das vorliegende Objekt war wie folgt:

- schwarz: Bewehrung (Minuspol, Kathode)
- rot: Anode (Pluspol)
- blau: Messsensoren (Referenzelektroden)

Die Kabel wurden teilweise in Schlitzen in Beton geführt. An bestimmten Stellen wurden die Decke durchbohrt und die Leitungen an die Deckenunterseite geführt, wo sie in Verteilerdosen gesammelt und weiter zum Gleichrichter geführt wurden. Bild 17 zeigt den Einbau der unterschiedlichen Anschlüsse und Sensoren.

Nach der erfolgten Verstärkung, der Reprofillierung, dem Einbau der Anschlüsse und Referenzelektroden wurde auf die Flächen mit geringer Überdeckung eine Ausgleichsschicht aus ebenfalls KKS-verträglichem Material aufgebracht und darauf das Anodensystem in Form von Bändern aus Titan-MMO-Streckmetall als Sekundäranode und Titanblechbändern als Primäranode montiert. An die Primäranode wurde der Strom über Kabel eingespeist. Die Primäranoden leiten diesen weiter zu den Sekundäranoden, und die Sekundäranoden leiten den Schutzstrom in den Beton ein. Verbindungen werden durch Punktschweißung hergestellt. Metallische Einbauteile müssen bei der Anodenverlegung umgangen werden. Ist die Anode flächig und kurzschlussfrei verlegt, wird sie in den Einbettmörtel eingebettet. Dabei ist die vollständige Umhüllung der Bänder unbedingt erforderlich. Bild 18 zeigt die Installation des Anodensystems und deren Einbettung in den KKS-Mörtel.

Die Titan-MMO-Streckmetallbänder wurden im Abstand von ca. 25 cm auf der zuvor hergestellten Ausgleichsschicht ausgerollt und mit Kunststoffdübeln befestigt. Die Verwendung von Kunststoffdübeln gewährleistet, dass keine elektrische Verbindung zwischen Anode und Bewehrung zustande kommen kann. Es ist darauf zu achten, dass der anfallende Bohrstaub sofort und restlos abgesaugt wird, da er sonst Verbundstörungen verursachen kann. Die Verwendung von Bandanoden hat im Vergleich zu Netzanoden den Vorteil, dass diese leicht montiert und befestigt werden können, eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen Beschädigungen im Bauverlauf besitzen, wesentlich un-



empfindlicher gegen Aufschwimmen im Anodeneinbettmörtel sind und sich die Reinigung der Zwischenräume der Anodenbänder infolge bauzeitlicher Verschmutzung erheblich einfacher gestaltet.

10. Einbettung der Anoden (Bild 19)
Die Anoden müssen in eine leitfähige Schutzschicht eingebettet werden. Diese besteht ebenso wie die beschriebene Ausgleichschicht aus einem für KKS-Systeme geprüften und zugelassenem PCC-Mörtel (SikaTop ES 104/108, SikaTop ES K&H-101), welcher im steif-plastischen Zustand frisch in frisch in die entsprechende Haftbrücke eingearbeitet wird. Die Haftbrücke ist satt und vollflächig aufzubringen. Hierbei ist besonders wichtig, dass die Haftbrücke zur Sicherstellung der elektrischen Leitfähigkeit vollständig in alle Zwischenräume und auch unter dem Anodenband eingebracht wird.

11. Aufbringen der Verschleißschicht (Bild 20)
Die Verschleißschicht bzw. Deckschicht hat neben der Schutzfunktion des darunterliegenden Aufbaus die Aufgabe, den Niveauequal zu den vorhandenen Spindeln sowie das Gefälle entsprechend den örtlichen Erfordernissen herzustellen. Als Material für die Deckschicht wurde ein Thermofalt-Belag gewählt. Dieser Industrieboden ist ein kalt aufbereiteter Belag aus einem abgestuften Mineralgemisch, Spezialbitumen und Zement. Er wird in Aufbaudicken von ca. 15 mm eingebracht und ist bzgl. kleinerer Fehlstellen selbsteheilend. Der Belag wurde abschließend mit den erforderlichen Parkflächenmarkierungen versehen. Unabhängig vom Systemaufbau konnte auf eine Beschichtung (OS 11/OS 13) verzichtet werden, da durch den Einsatz des KKS-Systems keine absolute Dichtigkeit der Nutzschrift gegen eindringendes Wasser erforderlich ist.



Bild 17. Einbau der Bewehrungs- und Anodenanschlüsse sowie der Referenzelektroden; die Platzierung der Referenzelektroden wurde vor dem Einbau ausgemessen
Fig. 17. Mounting of the connections to reinforcement and anodes, and reference anodes

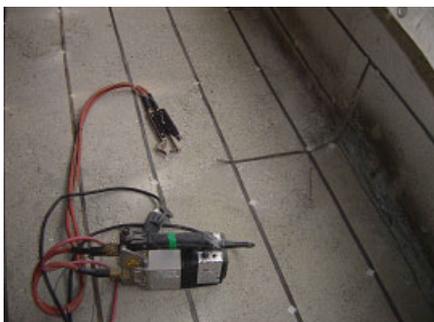


Bild 18. Anbringen des Anodensystems auf die Betonoberfläche
Fig. 18. Application of the anodes on concrete surface



Bild 19. Einbettung des Anodensystems in den KKS-Mörtel
Fig. 19. Embedding the anodes in anode mortar



Bild 20. Oberflächenschutz mit Thermofalt-Belag
Fig. 20. Surface protection with Thermofalt covering

Deckenoberseite nach unten geführten Leitungen werden in ein Verrohrungssystem eingeführt, in Verteilerdosen zusammengefasst und zur zentralen Stromversorgungseinheit, dem Gleichrichter, geführt.

Aufgrund der Ausdehnung wurde das Objekt in mehrere Schutzzonen unterteilt, welche separat mit Schutzstrom versorgt werden. Jede Schutzzone stellt somit einen eigenen elektrischen Kreis mit den dazugehörigen Sensoren dar.

Die Verrohrung wurde im vorliegenden Fall ästhetisch angeglichen (Bild 21).

3.5 Abnahmekriterien, Funktionsprüfung und laufende Kontrolle

Als Kriterium der Abnahme dienen unter anderem die Übergabe der vollständigen Projektdokumentation, der Ausführungszeichnungen und eines Handbuchs für den Betrieb und die Instandhaltung auf Grundlage der Europäischen Norm EN 12696 [4].

Ebenfalls basierend auf dieser Norm werden der Betrieb und die Instandhaltung der Anlage durchgeführt. Im Wesentlichen wird in der Norm verlangt, dass der Schutz während des Betriebs (während Schutzstrom anliegt) hinreichend ist und die Anlage während der Gewährleistungsperiode in Intervallen einer visuellen Kontrolle unterzogen wird.

Die Funktionskontrolle beinhaltet die Überwachung des Schutzstroms, der Schutzspannung und der Bewehrungspotentiale. Die Funktionsprüfung erfolgt durch periodische Ausschaltmessungen, wobei die erhaltenen Daten der Bewehrungsdepolarisierung über einen Zeitraum von ≤ 24 h gemäß EN 12696 ausgewertet werden. Die dadurch erhaltenen Daten dienen einer eventuellen Justierung der Schutzparameter (Schutzstrom, Schutzspannung).

Bild 22 zeigt den Verlauf der Treibspannungen, der Ströme sowie die kathodische Verschiebung des Bewehrungspotentials von Ende November 2006 bis Anfang April 2007 exemplarisch für Deck 3, Schutzzone 3A. Deutlich erkennbar ist in diesem Diagramm, dass das KKS-System mit konstanter Spannung betrieben wird. Die Schutzstromdichte variiert dann mit der Änderung der Widerstände im Stromkreislauf, z. B. durch Tempera-

turänderungen. Man sieht ebenfalls, wie sich die Schutzpotentiale ändern, wenn die Schutzspannung variiert wird: Bei Ausschaltungen (Zeitpunkte der Depolarisationsmessung) nähern sich die Potentiale wieder dem ursprünglichen (stromfreien) Korrosionspotential an. Andererseits erfolgt auf die stufenweise Erhöhung (Einregelungsphase) der Schutzspannung eine stufenweise Verringerung des Bewehrungspotentials.

Aus den Ausschaltmessungen (entspricht den Zinken in Bild 22) werden die Depolarisierungswerte ermittelt. Im Idealfall entsprechen diese der Norm. Sind sie zu niedrig, wird die Schutzspannung erhöht, sind sie sehr viel höher als 100 mV, kann und soll die Schutzspannung verringert werden. Bild 23 zeigt den Verlauf der Depolarisierung zusammen mit den Werten für die Schutzspannung und der Schutzstromdichte zu den Zeit-



Bild 21. Elektroinstallation und Gleichrichtermontage
Fig. 21. Electrical installation with rectifier

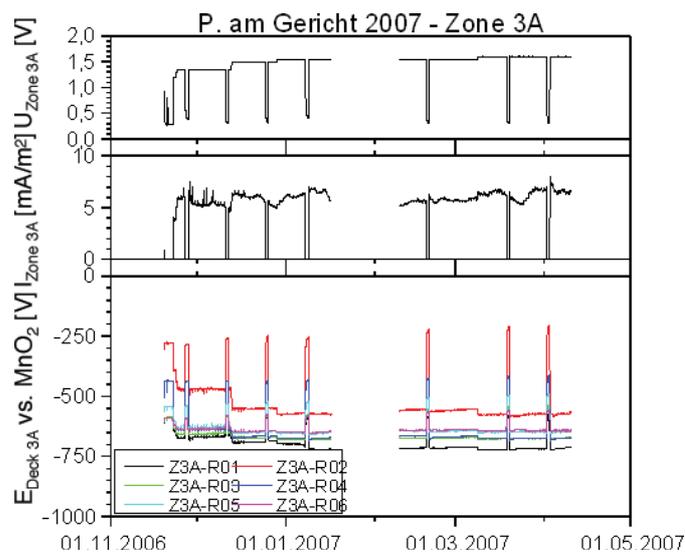


Bild 22. Verlauf der Treibspannungen, der Schutzstromdichte sowie Bewehrungspotential an den einzelnen Messpunkten für die ersten drei Betriebsmonate
Fig. 22. Driving voltage, impressed current and reinforcement potential measurements at 6 points during first three months of operation

punkten der Ausschaltmessungen. Die Depolarisierung soll oberhalb des schraffierten Bereichs liegen. Man kann sehen, wie durch die stufenweise Erhöhung der Schutzspannung die Depolarisationswerte den Erfordernissen der EN 12696 mehr und mehr entsprechen. Die Einregelungsphase dauert in der Regel einige Monate.

Die Ergebnisse zeigen, dass das 100-mV-Kriterium, nach knapp dreimonatigem Betrieb, bereits an vier von insgesamt sechs Messstellen in der Schutzzone 3A erreicht wird. 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 des Monitorings instandgesetzter Bauteile ist und wie vorteilhaft es sein kann, nach Abschluss der Instandsetzung regelnd eingreifen zu können.

Bild 24 zeigt die Entwicklung des statischen Bewehrungspotentials (Korrosionspotential) über die Dauer des kathodischen Schutzes. Die Änderung des statischen Bewehrungspotentials in positive Richtung lässt sich mit Passivierungseffekten erklären.

ren. Die ständige elektrochemische Produktion von Hydroxylionen an der Bewehrungsoberfläche bei gleichzeitigem Abstoßen der negativen Chloridionen von der negativ aufgeladenen Bewehrungsoberfläche ändert langsam den elektrochemischen Zustand der Bewehrung in Richtung Passivität, was sich in einer positiven Änderung des statischen Bewehrungspotentials ausdrückt.

Die positive Langzeitwirkung der kathodischen Polarisation der Bewehrung kann anhand der steigenden statischen Bewehrungspotentiale qualitativ nachvollzogen werden. Der Erfolg der KKS-Maßnahme wird demnach, zumindest teilweise, bereits nach den ersten Betriebsmonaten anhand der vorliegenden Daten ersichtlich.

4 Zusammenfassung

Bei einer geplanten Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes zur Instandsetzung einer korrosionsgefährdeten/korrosionsgeschädigten Parkgarage ist zunächst eine gründliche Zustandserfassung nötig, um den tatsächlichen quantitativen Bedarf (die Areale) für diese Methode zu begrenzen und ein kostenoptimiertes Design des Schutzsystems zu ermöglichen. Eine Messmethode allein ist oft ausreichend, um einen wirklichen Eindruck über die Korrosionsproblematik zu erhalten.

Die Ausführungsqualität bei der Installation von kathodischen Korrosionsschutzsystemen ist von ausschlaggebender Bedeutung für eine optimal funktionierende Anlage. Dazu gehören die oftmals nötigen konventionellen Betoninstandsetzungsarbeiten, die Herstellung der durchleitenden elektrischen Verbindung der Bewehrung, eine den baulichen Randbedingungen entsprechend angepasste Anode und deren sorgfältig durchgeführter Einbau einschließlich Einbettung und Überdeckung. Schließlich ist die einwandfreie Installation von dauerhaften Referenzelektroden sowie der Überwachungsanlage mit verlässlich funktionierenden elektronischen Komponenten Voraussetzung für eine funktionierende Steuerung und Prüfung der Anlage.

Zur Überwachung der einwandfreien Funktion des Schutzsystems wird empfohlen, sämtliche Überwachungsparameter über einen bestimmten Zeitraum (z. B. über 1 Jahr) gleichzeitig in einem Diagramm abzubilden. Dadurch ist es leichter möglich, zwischen veränderlichen Parametern (angelegter Strom/Spannung, Temperatur etc.) und den Effekten an der Bewehrung (im Wesentlichen Änderungen des Bewehrungspotentials) Zusammenhänge zu erkennen.

Die Depolarisationsmessungen gehören zu den wichtigsten Kontrollmessungen überhaupt. Zu Beginn der

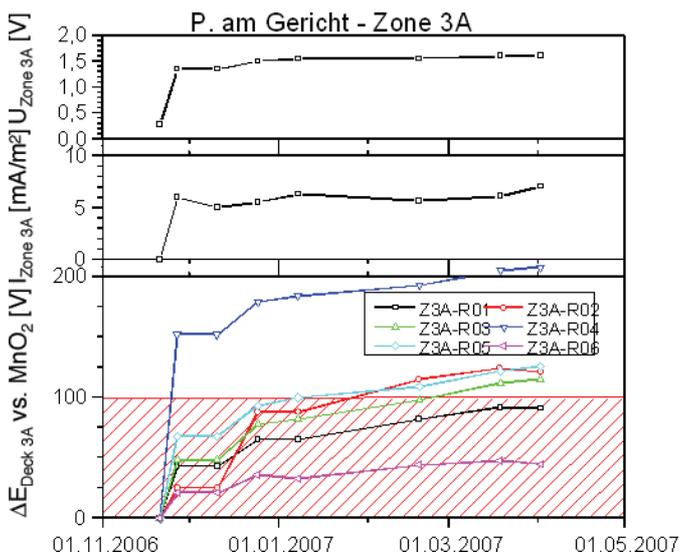


Bild 23. Verlauf der Treibspannungen, der Schutzstromdichte sowie Ergebnisse der Depolarisationsmessungen in den ersten drei Betriebsmonaten
 Fig. 23. Driving voltage, impressed current and results of depolarization measurements at 6 points during first three months of operation (from [5])

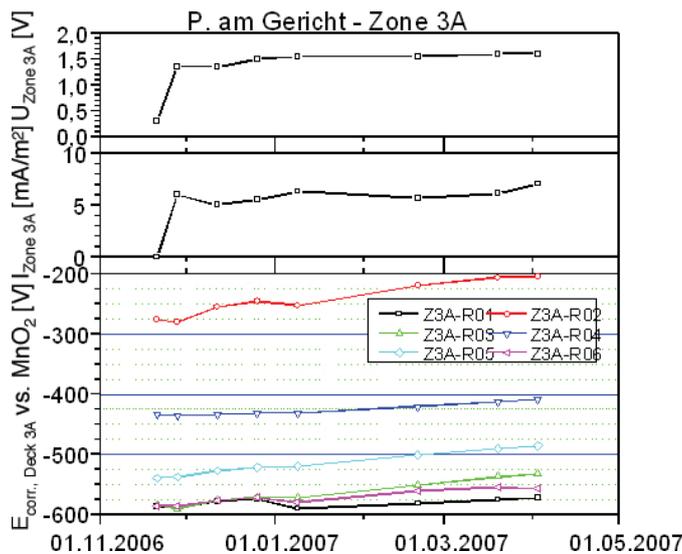


Bild 24. Verlauf der Treibspannungen, der Schutzstromdichte sowie des statischen Bewehrungspotentials (gemessen am Ende der Depolarisation)
 Fig. 24. Driving voltage, impressed current and static reinforcement potential measurements at the end of the depolarization

Schutzperiode sind die Depolarisationswerte für die ursprünglich korrodierende Bewehrung niedriger als zu einem späteren Zeitpunkt der Schutzperiode bei vergleichbarer angelegter Schutzspannung (Schutzstrom). Dies lässt sich mit über die Dauer des kathodischen Schutzes teilweisen Passivierung der korrodierenden Bewehrung erklären. Die Kombination der Depolarisationsmessungen mit der angelegten Schutzstromdichte ermöglicht eine Aussage über die relative Änderung des elektrochemischen Bewehrungszustands („Gesundheitszustand der Bewehrung“). Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass die Messwerte, erhalten von den Referenzelektroden, zuverlässig sein müssen.

Bei Beachtung der vorgenannten Vorgaben und Randbedingungen stellt die Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes bei Stahlbetonkonstruktionen, speziell bei chloridinduzierten Schäden wie in Parkhäusern, eine wirtschaftliche und problemlose Alternative zu herkömmlichen Instandsetzungsverfahren dar.

Literatur

- [1] Glass, G. K., Page, C. L., Short, N. R., Zhang J.-Z.: The analysis of potentiostatic transients applied to the corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, 39 (1997), 1657–1663.
- [2] ASTM C 876-87, „Half-Cell Potentials of Uncoated Steel in Concrete“, ASTM, West Conshohocken, Pa., 1987.
- [3] Broomfield, J. P.: Corrosion of Steel in Concrete – Understanding, Investigation and Repair, E & FN Spon, London 1997.
- [4] EN 12696: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton (Deutsche Fassung). CEN – Europäisches Komitee für Normierung, B – 1050 Brüssel, März 2000.
- [5] Eichler, Th., Isecke, B., Klein, H.-H., Schade, A., Pruckne, F., Michel, S.: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton. *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007), H. 5, S. 310–320.
- [6] Bertolini, L., Bolzoni, F., Pedeferrì, P. et al.: Cathodic protection and cathodic prevention in concrete: principles and applications; *Journal of Applied Electrochemistry*, 28 (1998), No. 12, pp. 1321–1331.

- [7] Bennett, J. E.: J. E. 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.
- [8] Mietz, J., Fischer, J., Isecke, B.: Langzeiterfahrungen mit einem Kathodischen Korrosionsschutzsystem für Stahl in Beton. *Materials and Corrosion*, Volume 52 (2001), No. 12, pp. 920–930.
- [9] Baeckmann, W. v., Schwenk, W.: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes; 2. Auflage. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1980.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Hans-H. Klein, Dipl.-Ing. Andreas Schade, Ingenieurbüro Engelbach + Partner, Sophienstraße 48, 60487 Frankfurt/Main
Dipl.-Ing. Thorsten Eichler, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
Mag. Dr. Dipl.-Ing. Franz Pruckner, V&C GmbH, Josef-Perger-Straße 2, A – 3031 Pressbaum (Österreich)