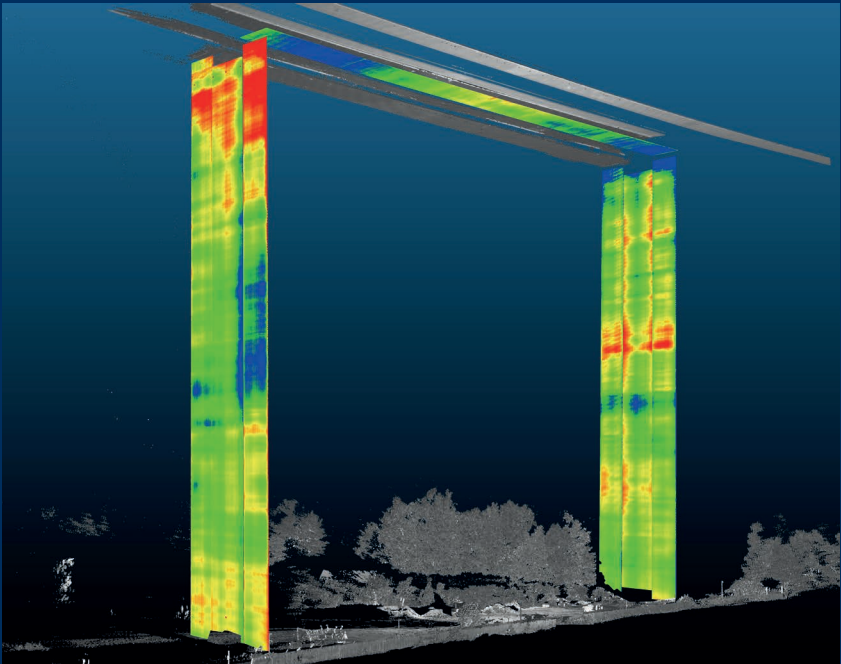




**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55



Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

11. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN

08. März 2021



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**11. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

08. März 2021

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden
D - 01062 Dresden

Tel. +49 351 463-3 65 68
Fax +49 351 463-3 72 89

© 2021 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung der Herausgeber. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind. Für die Inhalte sind die Autor*innen verantwortlich.

Herausgeber: Manfred Curbach, Steffen Marx, Silke Scheerer, Torsten Hampel
Redaktion: Silke Scheerer
Layout: Stefan Gröschel und Silke Scheerer
Korrekturen: Silke Scheerer, Sabine Wellner und Theresa Fritsche
Anzeigen: Sabine Wellner
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel

Titelbild: 3D-Punktwolke des fünften Feldes der Siegtalbrücke; zur Veranschaulichung wurden bereichsweise unterschiedliche Einfärbungen verwendet: Intensitätswerte (Graustufendarstellung) und Ebenheitsabweichungen (Regenbogendarstellung) | © Dr.-Ing. Florian Schill, Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt Institut für Geodäsie

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden verfügbar: <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb>.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz

Veröffentlicht: Dresden, März 2021

ISSN 1613-6934
ISBN 978-3-86780-665-7

Inhalt

Grußwort.....	5
Torsten Hampel, Sabine Wellner und Silke Scheerer	
Experimentelle Untersuchung von Balkenreihentragwerken	8
Oliver Steinbock, Olaf Mertzsch und Sabine Wellner	
Experimentell gestützte Nachweise von Eisenbahn-Stampfbetonbrücken.....	20
Marc Gutermann und Werner Malgut	
Berührungslose Überwachung von Brücken mit großer Stützweite	32
Florian Schill und Gregor Schacht	
Ultraschalluntersuchung von Baukonstruktionen.....	46
Sebastian Schulze	
Monitoring von Kräften und signifikanten Bauwerksparametern in einer Stahlbeton- brücke zur Analyse von Schädigungsprozessen	54
Jens Kühnapfel, Gunter Hahn, Markus Fischer und Stefan Mortag	
Structural Health Monitoring der Maintalbrücke Gemünden zur Unterstützung einer prädiktiven Instandhaltung.....	66
Ralf Herrmann, Ronald Schneider, Patrick Simon, Falk Hille, Samir Said und Matthias Baeßler	
Rissweitenmessung mittels nachträglich angebrachten, verteilten faseroptischen Messsystemen	78
Alois Vorwagner, Maciej Kwapisz, Werner Lienhart, Madeleine Winkler und Urs H. Grunicke	
Verbesserte Bestimmung des Chloridgehaltes in Beton durch neues Messverfahren	88
Fritz Binder und Stefan L. Burtscher	
Spanndrahtbruchdetektion mit Schallemissionsmonitoring.....	96
Max Käding, Gregor Schacht und Steffen Marx	
Ansätze zur objektspezifischen Ermittlung und Bewertung von KKS-Schutzkriterien	106
Ulrich Schneck	
Probebelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke.....	118
Oliver Steinbock, Nina Josiane Giese und Manfred Curbach	
Experimentelle Tragfähigkeitstests des OML in den Jahren 2019 und 2020.....	130
Sabine Wellner, Torsten Hampel und Silke Scheerer	

Ansätze zur objektspezifischen Ermittlung und Bewertung von KKS-Schutzkriterien

Dr.-Ing. Ulrich Schneck

CITec Concrete Improvement Technologies GmbH, Dresden

KURZFASSUNG

Beim katodischen Korrosionsschutz von Stahl in Beton sind Schutzkriterien, d. h. nachzuweisende Potentialverschiebungen, etabliert und normativ vorgegeben, die von galvanischen Systemen mitunter nicht erreicht werden. Das liegt hauptsächlich an der relativ geringen, nicht regelbaren Spannungs- bzw. Potentialdifferenz zwischen Stahl und Zink. Wenn die Korrosionsraten am ungeschützten Bauwerk jedoch gering oder nur moderat erhöht sind, können auch geringere Potentialverschiebungen einen sicheren Korrosionsschutz bieten. Im Beitrag werden messtechnische Möglichkeiten erläutert, Korrosionsraten an Stahlbetonbauwerken objektspezifisch zu ermitteln, woraus sich individuell erforderliche Potentialverschiebungen ableiten lassen, um mit KKS passivähnliche Korrosionsraten zu erreichen. Häufig kann daraus abgeleitet werden, dass eine (IR-freie) Potentialverschiebung um weniger als 100 mV an der Bewehrung ausreichend ist. Im umgekehrten Fall können sehr hohe Korrosionsraten ein Ausschlusskriterium für galvanischen KKS sein. Mit galvanostatischen Polarisationsmessungen kann die zu erwartende Schutzwirkung von galvanischen KKS-Systemen simuliert werden, so dass bereits in der Planungsphase eine Eignungsprüfung mit guter Genauigkeit durchführbar ist.

1 Einleitung

Der katodische Korrosionsschutz (KKS) von Stahlbetonbauwerken ist ein zerstörungsfreies Instandsetzungsverfahren, das seit 20 Jahren als europäische bzw. internationale Norm (DIN EN ISO 12696 [1]) geregelt ist. Als absolutes Kriterium für den Funktionsnachweis gilt, wenn vormals korrosionsaktive Bewehrungsbereiche in einen Potentialbereich zwischen -720 und -1.100 mV gegen Ag/AgCl/0,5M KCl ^(*) polarisiert werden (bzw. minimal -900 mV für Spannbeton). In diesem Potentialbereich ist die Korrosionsrate nahe Null; praktisch ist das aus verschiedenen Gründen jedoch schwer zu erreichen. Weiterhin kann als allgemein akzeptiertes relatives Kriterium eine Potentialverschiebung um mindestens 100 mV nachgewiesen werden – in negative Richtung beim Einschalten des KKS und in positive Richtung beim Ausschalten. Das leitet sich als empirisches Erfordernis aus der

Butler-Volmer-Gleichung bzw. der Tafel-Geraden [2] ab, wonach eine Potentialverschiebung in katodische Richtung eine Reduzierung der Korrosionsstromdichte auf ca. 10 % des Ausgangswerts bedeutet und in den meisten Fällen sicher und ausreichend ist.

Bei galvanischen KKS-Systemen (meist mit Zink als Opferanode), die wegen ihrer Einfachheit und Robustheit technisch und wirtschaftlich interessant sind, ist die erreichbare Potentialverschiebung an der Bewehrung v. a. durch die geringe Potentialdifferenz zwischen Stahl und Zink begrenzt (ca. 250 bis 500 mV), aber auch durch den Grad der Vorkorrosion am Stahl und die damit zusammenhängenden katodischen Teilprozesse (Verhältnis von Oxidreduktion und Sauerstoffreduktion). Wenn hierbei die Einhaltung des 100-mV-Kriteriums – siehe Bild 1 – nicht nachweisbar ist, ergeben sich neben dem normativen Konflikt Schwierigkeiten bei der technischen Beurteilung der Schutzwirkung solcher KKS-Anlagen. Diese muss jedoch sicher-

^(*) Silber-Silberchlorid-Elektrode in 0,5 molarer KCl-Lösung

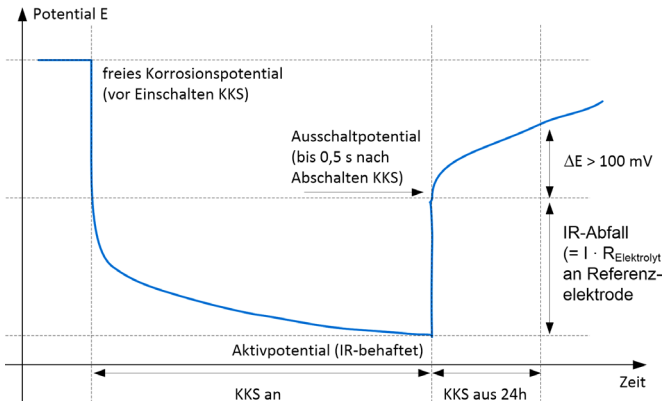


Bild 1: Darstellung des Potentialverlaufs sowie des IR-Abfalls als Messeffekt an der Referenzelektrode unter KKS und während der Depolarisationsmessung

gestellt sein. Eine praktikable Herangehensweise zu deren objektbezogener Ermittlung wird im Weiteren mit theoretischen Grundlagen und einem Projektbeispiel an Hand eines Parkhauses besprochen.

2 Bewertung der durch KKS erreichten Reduzierung der Korrosionsrate

2.1 Wirkungsprinzip des galvanischen KKS

Die Schutzwirkung von Zink gegen die Korrosion von Stahl besteht gemäß Bild 1 darin, dass bei einer metallenen Kopplung beider Metalle ein Mischpotential (= Schutzpotential) entsteht, und sich die anodische Teilstromdichte am Stahl entlang der Tafel-Geraden mit einem Anstieg von ca. -100 bis -120 mV/Dekade i verringert [2]. Gleichzeitig kommt es zum Eintrag eines Schutzstroms aus Zink in Stahl, dessen Betrag sich entlang der anodischen Tafel-Geraden von Zink zwischen dem freien Korrosionspotential von Zink und dem Schutzpotential ergibt. Weitere, allgemeine Informationen über KKS sind z. B. in [1] zu finden.

Bei der Stromdichte-Spannungs-Darstellung in Bild 2 handelt es sich um den Tafel-Plot, benannt nach Julius Tafel, der es 1905 mit dieser halblogarithmischen Auftragung der Stromdichte i über das Potential E ermöglichte, den Korrosionsstrom am Korrosionspotential zu ermitteln, was in direkter Messung nicht möglich ist.

Im zugrundeliegenden Versuch wird eine in Elektrolytlösung befindliche Materialprobe mit einem Potentiostaten und einer Hilfelektrode (Gegenelektrode) aus ihrem Zustand der freien Korrosion bis ca. ± 200 mV um das freie Korrosionspotential polarisiert. Der dafür erforderliche Strom wird aufgezeichnet, und es ergibt sich eine Messkurve ähnlich der roten oder blauen Kurve in der Grafik. Sachverhalte zur Messtechnik, zur IR-Korrektur und zum Flächenbezug werden

in [4], [5] sowie unter Punkt 3 besprochen. An die geraden Abschnitte der Messkurve können die sogenannten Tafel-Geraden angefitet werden, und an deren Schnittpunkt mit dem freien Korrosionspotential (senkrechte gestrichelte Linie) lassen sich der Korrosionsstrom bzw. die Korrosionsstromdichte am Korrosionspotential ablesen.

Am Schnittpunkt des anodischen, rechten Asts der (roten) Zinkkurve mit dem katodischen, linken Ast der (blauen) Stahlkurve ergeben sich das Schutzpotential und der Schutzstrom bzw. die Schutzstromdichte. Je größer dabei die Differenz zwischen E_{Schutz} und $E_{\text{corr,Fe}}$ ist, umso stärker fällt die Verringerung der anodischen Teilstromdichte am Stahl aus. Der in den Stahl eingetragene Schutzstrom ist der Differenzbetrag zur Eigenkorrosion des Zinks ($I_{\text{Schutz}} - I_{\text{corr,Zn}}$).

Bei dem bereits erwähnten, konservativ anzunehmenden Anstieg der Tafel-Geraden von 120 mV/Dekade i kann man errechnen, dass eine Verschiebung des Potentials in negative Richtung zu den in Tabelle 1 gelisteten Reduzierungen der Korrosionsrate führen wird. Das bezieht sich auf IR-freie Potentialwerte, die an der KKS-Anlage in der Regel als Ausschaltpotentiale bis ca. $0,5$ s nach Ausschalten des KKS gemessen werden und in Beziehung zu den freien Korrosionspotentialen bzw. zu den 24 h nach Abschalten bestimmten Potentialen gesetzt werden.

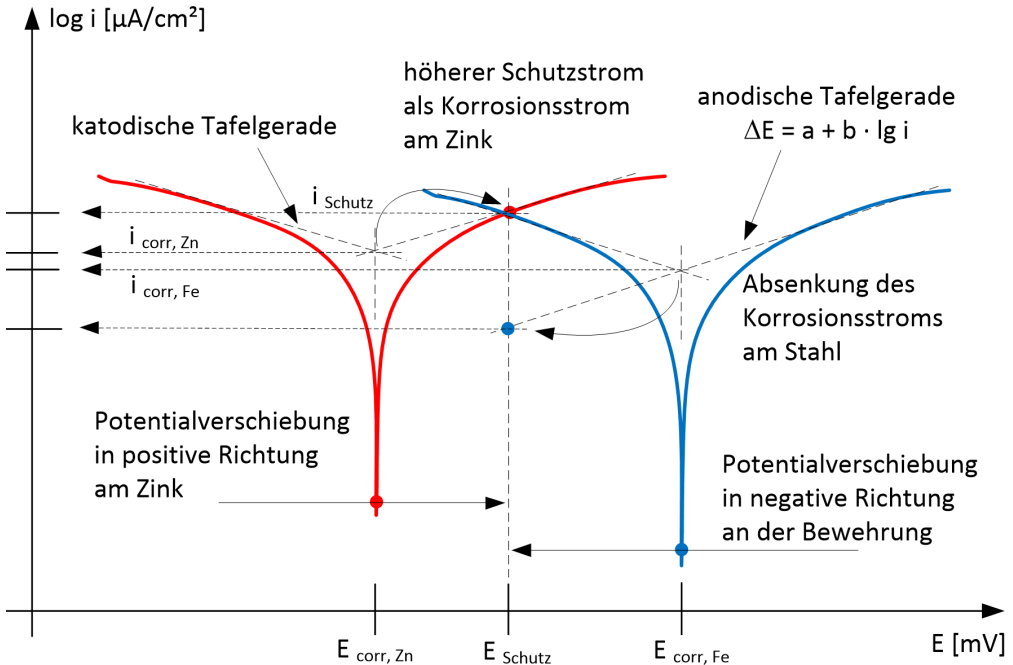


Bild 2: Wirkungsprinzip des galvanischen KKS mit Zink für Stahl in der Stromdichte-Spannungs-Darstellung, nach [3]

Mit dieser Orientierung kann man bei gemessener Potentialverschiebung (in der Regel bei Depolarisationsmessungen an KKS-Anlagen) mindestens abschätzen, um wie viel Prozent die in der Praxis meist unbekannte ursprüngliche Korrosionsrate reduziert wird. Das in der EN ISO 12696 [1] als Leistungsnachweis verankerte 100-mV-Kriterium bezieht sich auf den gleichen gedanklichen Ansatz.

Potentialverschiebung (IR-frei unter KKS) [mV]	Reduzierung der Korrosionsrate auf % des ursprünglichen Werts [%]	Reduzierung der Korrosionsrate um % des ursprünglichen Werts [%]
0	0	0
-10	83	-17
-20	68	-32
-40	46	-54
-80	22	-78
-100	15	-85

Tabelle 1: Katodische Potentialverschiebungen und resultierende Verringerung der Korrosionsraten, berechnet bei einem Anstieg der Tafel-Geraden von 120 mV/Dekade i

2.2 Ausführungsvarianten des galvanischen KKS

Für einen galvanischen KKS an Stahlbetonbauwerken gibt es im Prinzip drei Varianten der Ausführung: die thermische Spritzverzinkung der Betonoberfläche mit anschließender organischer Deckbeschichtung (Bild 3), den Einbau diskreter Stab- oder Zylinderanoden in Bohrlöcher senkrecht zu Betonoberfläche oder das Aufkleben einer Zink-Hydrogelfolie (Bild 4). Die Spritzverzinkung und die Zink-Hydrogelfolie sind planare Anodenanordnungen, die eine parallele Fläche zur Bewehrung bilden, und Stabanordnungen werden gewählt, wenn komplexe Bauteile oder auch andere Bewehrungslagen als die an der Montagefläche liegende zu schützen sind.

Meist wird der katodische Schutz mit einer permanenten elektrischen, metallenen Verbindung zwischen Stahl und Zink (Kontaktplatten oder Kabelanschlüsse, in der Regel 1 Stück pro

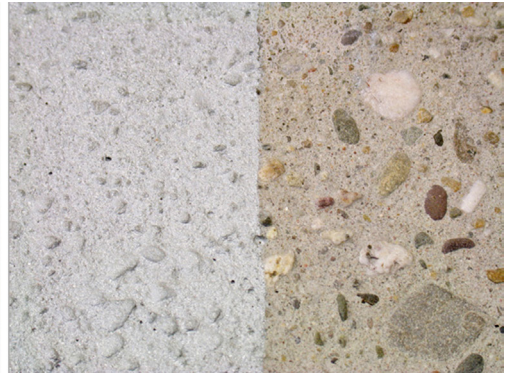


Bild 3: Thermisches Spritzverzinken von Beton – händisches Spritzen und Ansicht der verzinkten/unverzinkten Betonoberfläche (Abbildungen: Grillo Werke AG)



Bild 4: Beispiele für eine Zink-Stabanode (noch mit Spezialmörtel einzubauen) und für Zink-Hydrogelfolie

10 m²) hergestellt; der Beton stellt den elektrolitischen Teil der Schaltung dar.

Um die Leistungsfähigkeit des KKS zu messen, muss die elektrische Verbindung zwischen Zinkanode und Bewehrung für mindestens 24 h getrennt werden. Häufig werden batteriebetriebene Datenlogger eingesetzt, um Signale an Referenzelektroden, Schutzströme und Temperaturen aufzuzeichnen; Depolarisationsmessungen werden im Abstand von höchstens einem Jahr meist händisch durchgeführt. Bei größeren Bauteilen, z. B. Parkhausflächen, werden im Rahmen der Zustandserfassung mehrere repräsentative Teilflächen von ca. 10 m² Einzelgröße ausgewählt, in denen die Anode für Messzwecke schaltbar ist.

3 Bestimmung der lokalen Korrosionsrate im ungeschützten Zustand

Die Messung der Korrosionsrate bzw. der Korrosionsstromdichte ist an Stahlbetonbauteilen schwierig, da es kaum möglich ist, die reale, bei der Messung angeregte Bewehrungsfläche zu bestimmen. Weiterhin können auch innerhalb kleiner Bewehrungsabschnitte heterogene Korrosionsbedingungen herrschen, d. h. es können passive und verschiedenen aktive Teilflächen vorhanden sein, und die bei chloridinduzierter Korrosion meist vorhandene Makroelementbildung erschwert die rechnerische Auswertung zusätzlich [6].

Trotz dieser Sachverhalte und der sich daraus ergebenden Unwägbarkeiten kann man mit

hinreichender Genauigkeit wenigstens einen Bereich der Korrosionsrate ermitteln, der einen guten Anhaltspunkt über Bedarf und Ausmaß eines Korrosionsschutzes ergibt. Hierzu konnten in den vergangenen Jahren bei vielen Praxisprojekten wichtige Erfahrungen gesammelt werden, und die dabei berechneten Korrosionsraten zeigten plausible Zusammenhänge mit anderen Messdaten (Polarisationswiderstand, Elektrolytwiderstand, Chlorid- und Wassergehalt in Bewehrungsnähe) und weiteren Beobachtungen (visueller Zustand von Bewehrung und Beton, allgemeine Bauwerkssituation), siehe auch [4].

Geeignete Messmethoden zur Erfassung von Korrosionsraten sind die lineare Polarisation (LPR) und die Tafel-Polarisation, welche potentiodynamisch funktionieren, das bedeutet, dass das Potential langsam – mit ca. 0,5 mV/s – in katodische, negative und in anodische, positive Richtung verschoben wird. Bei der LPR wird im linearen Bereich der Stromdichte-Spannungskurve gearbeitet (max. ± 20 mV), während bei der Tafel-Polarisation – wie bereits erwähnt – um bis zu ± 200 mV polarisiert wird. Die Arbeitsbereiche beider Methoden sind in Bild 5 verdeutlicht.

Gemäß Bild 6 wird eine Aufsatzmesszelle, in der die Referenz- und die Gegenelektrode angeordnet sind, auf der Betonoberfläche und über einer Bewehrungskreuzung platziert. Die mit der Gegenelektrode angeregte Bewehrungsfläche kann man sich als einen Bereich zwischen einem Zylinder unter der – in diesem Fall mit 6 cm Durchmesser ausgebildeten – Gegenelektrode und einem sich nach unten öffnenden Kegelstumpf im Winkel von 45° bis zur Bewehrung vorstellen. Bei Bezug auf den Zylinder ergibt sich die mögliche minimale Bewehrungsstablänge; bei Bezug auf den Kegelstumpf die maximale. Bei der Berechnung des Stabumfangs sollten Korrekturfaktoren für Rippenstahl und für Korrosionsnarben bei bereits vorhandener Korrosion berücksichtigt werden. Mit diesem Ansatz erhält man wahrscheinliche Eckpunkte für die Berechnung der Korrosionsstromdichte bzw. der Korrosionsrate $i = I/A$ [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$] aus dem gemessenen Korrosionsstrom.

Zunächst sollen jedoch noch Beispiele für Messergebnisse aus den LPR- und Tafel-Polarisationsmessungen angeführt werden; Bild 7 zeigt eine LPR-Messung. Ein erstes Ergebnis daraus ist der Gesamt-Polarisationswiderstand R_p ; die-

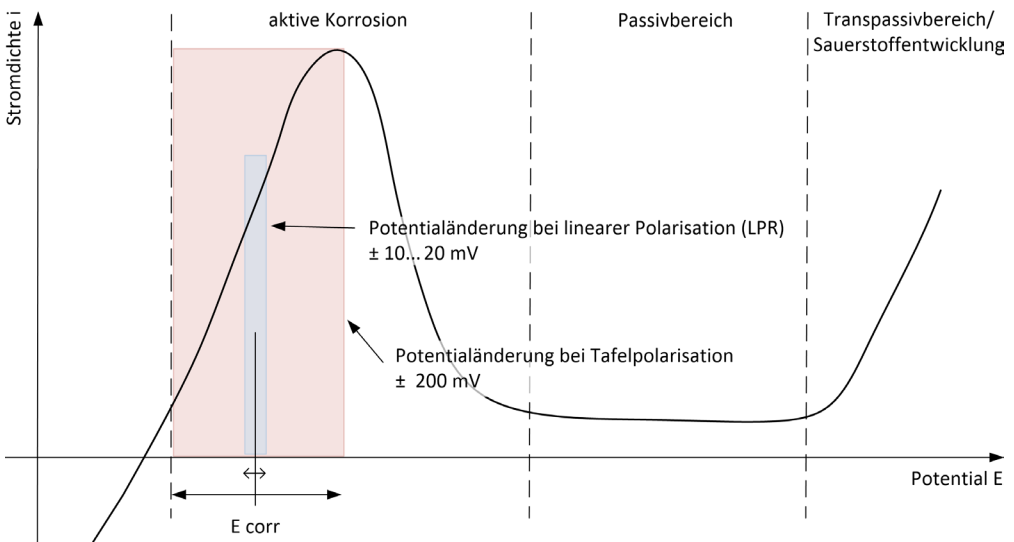


Bild 5: Stromdichte-Spannungskurve von Stahl mit Darstellung des Aktiv- und Passivbereichs sowie der Arbeitsbereiche für lineare Polarisation und Tafelpolarisation

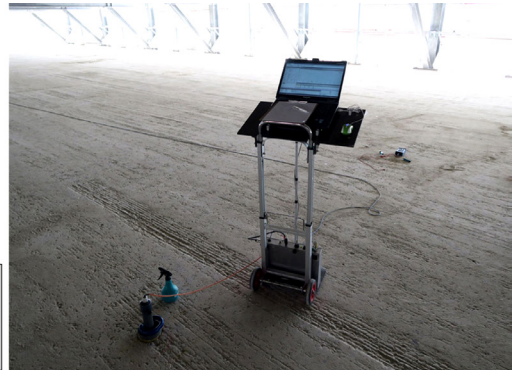
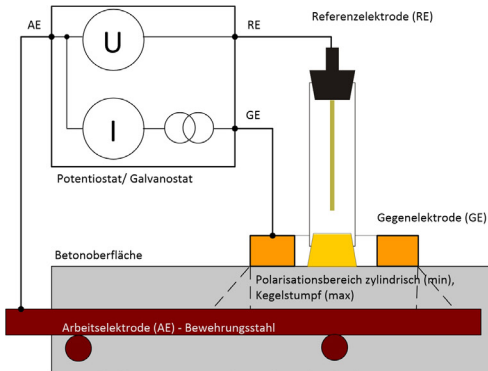


Bild 6: Prinzipskizze für Potentiostat und Messanordnung sowie Beispiel für praktische Anwendung in einem Parkhaus (Aufsatzmesszelle links unten)

ser ergibt sich aus $\Delta E/\Delta I$ und enthält den Polarisationswiderstand der Grenzfläche Stahl-Elektrolyt und den Elektrolytwiderstand des Betons zwischen Stahl und Referenzelektrode. Mit der abgeschätzten, polarisierten Bewehrungsfläche kann ein spezifischer R_p -Wert in $[\Omega/\text{cm}^2]$ und die Korrosionsrate nach Stern-Geary mit $i = 0,026 V/R_p$ berechnet werden. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass dieser zugeschnittenen Gleichung die Annahme einer homogenen Korrosion zugrunde liegt, was bei Korrosionsvorgängen in Stahlbeton, und besonders bei Chloridangriff, nicht der Fall ist [6].

Bei der Tafel-Polarisation entsteht mit den bereits erwähnten Randbedingungen eine wie in Bild 8 ersichtliche Messkurve, aus der der Korrosionsstrom am Korrosionspotential ablesbar ist. Ohne IR-Korrektur führt jeder Potentialschritt zu einer mit steigendem Strom größeren Abweichung gegenüber einer korrigierten Kurve, besonders bei hohen Elektrolytwiderständen, und sowohl Kurve als auch die Neigung der Tafel-Geraden werden flacher. Daraus resultiert ein höherer Korrosionsstrom im nicht korrigierten Zustand; funktionell entspricht das Ergebnis dann aber der LPR, wo gleichfalls der Elektrolytwiderstand wirkt, hier aber zu

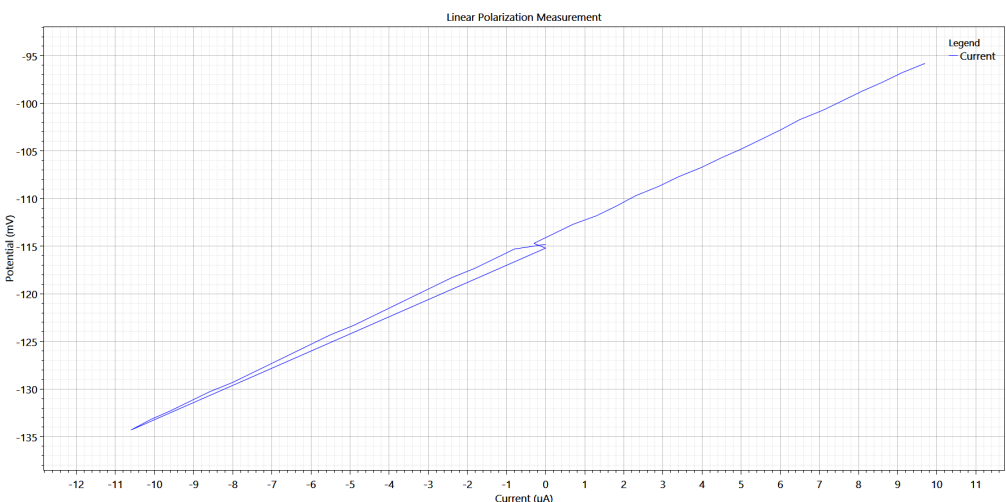


Bild 7: Beispiel für lineare Polarisationsmessung mit exakt linearem Bezug zwischen Potential und Strom innerhalb der Versuchsgrenzen

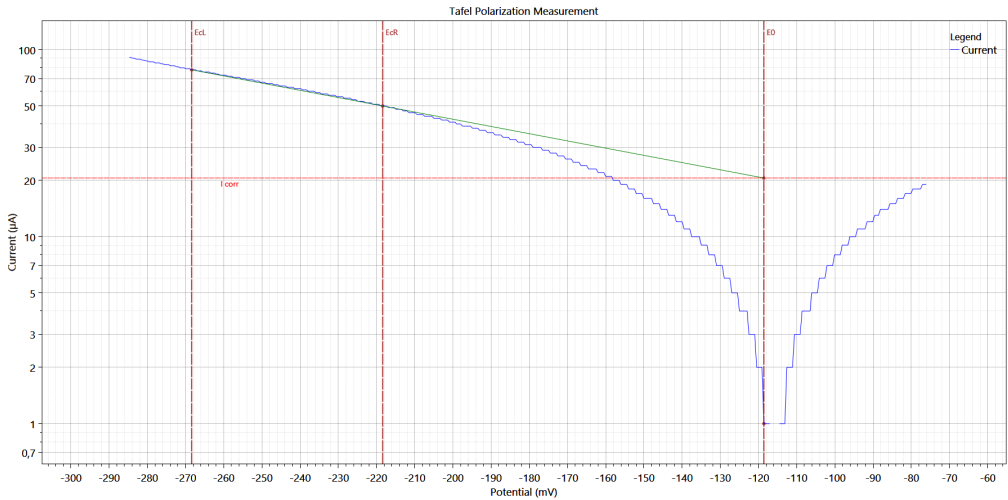


Bild 8: Beispiel für Tafel-Polarisationsmessung mit vertikalen Linien E_{cl} und E_{cr} zum Anfinden der Tafel-Geraden und deren Schnittpunkt mit E_0 , an dem der Korrosionsstrom am Korrosionspotential abgelesen werden kann

einem insgesamt größeren Berechnungsergebnis führt als mit reinem Polarisationswiderstand R_p .

Wie in [5] ausführlicher beschrieben, haben zahlreiche praktische Anwendungen beider Messmethoden zur Erkenntnis geführt, dass sie in einem funktionellen Zusammenhang stehen, so dass der absolute Korrosionsstrom I_{corr} auch aus dem Gesamt-Polarisationswiderstand R_p' berechnet werden kann – mit sehr guter Zuverlässigkeit ($R^2 = 0,96$) –, bevor flächenbezogene Korrosionsraten berechnet werden. Das hat sich als zweckmäßiger erwiesen als die Anwendung der Stern-Geary-Formel.

Die empirisch ermittelte Umrechnungsformel lautet

$$I_{corr} [\mu A] = 34,141 / R_p' [\Omega]$$

und soll mit der Grafik nach Bild 9 verdeutlicht werden, in der Datenpaare $[I_{corr,Tafel}; R_p',LPR]$ aus verschiedenen Praxisprojekten aufgetragen sind.

Die grundsätzlichen Unsicherheiten beim Flächenbezug des Korrosionsstroms können praktisch eingegrenzt werden durch die Anwendung

eines Flächenbereichs wie im Abschnitt oben erwähnt. Dabei erhält man mit der minimalen Fläche eine bezogene maximale Korrosionsrate und umgekehrt, und zwischen beiden Extremen darf der wahre Wert erwartet werden.

Ohne IR-Korrektur ist der ermittelte Korrosionsstrom höher als real; die Abweichung steigt mit höheren Elektrolytwiderständen und kann bis ca. 50 % betragen. Da hohe Elektrolytwiderstände ($> 2 \text{ k}\Omega$) in der Regel bei passiven oder sehr gering aktiven Prüfstellen beobachtet werden, ist der nicht korrigierte Korrosionsstrom bereits gering, und bei hoch aktiven Prüfstellen ist der Elektrolytwiderstand meist gering ($< 500 \Omega$), so dass die Abweichung auch geringer ist. Da der Fehler auf der sicheren Seite liegt, wird das als Sicherheitszuschlag für die Ermittlung der Korrosionsrate betrachtet.

4 Abschätzung der zum Erreichen von Passivität nötigen Potentialverschiebung

Mit der Kombination der Ansätze aus Punkt 2 und 3 ist es möglich, für Prüfstellen mit erhöhter Korrosionsrate einen individuellen Potentialverschiebung zu berechnen, den das KKS für die Gewährleistung eines passiven Verhaltens der

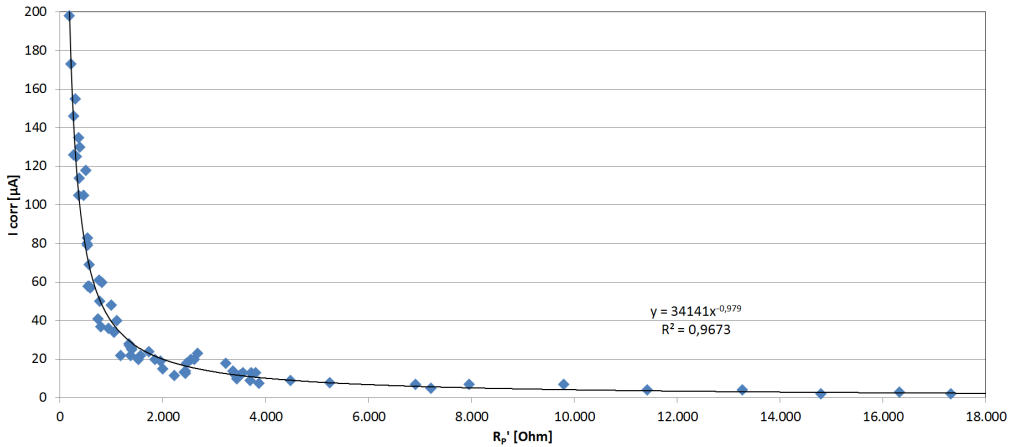


Bild 9: Grafischer Zusammenhang zwischen Datenpaaren I_{corr} aus Tafel-Polarisation und R_p aus LPR aus Messungen von sechs verschiedenen Praxisprojekten, aus [4]

Korrosionsrate ungeschützt [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	Korrosionsrate bei Passivität [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	erforderliche Potentialverschiebung (IR-frei) [mV]
0,2	0,1	-36
0,4	0,1	-72
0,6	0,1	-93

Tabelle 2: Erforderliche Potentialverschiebungen für eine Reduzierung verschiedener Korrosionsraten auf Passivniveau

Bewehrung bewirken muss. Hierbei gilt als allgemein anerkannter Grenzwert $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, was auch in [1] erwähnt ist. Für die Bemessung soll wiederum eine Tafel-Neigung von $120 \text{ mV/Dekade } i$ genutzt werden. Tabelle 2 gibt Orientierung über die daraus resultierenden Werte.

Die gemäß Punkt 3 ermittelten Korrosionsraten bei freiem Korrosionspotential, also im ungeschützten Zustand, können auch herangezogen werden, um die resultierende Korrosionsrate (bzw. Bandbreite der Korrosionsrate) unter KKS bei bekannter Polarisation bzw. Depolarisation abzuschätzen. Mit diesem Ansatz ist es auch möglich, die Schutzwirkung eines KKS – auch bei Fremdstromsystemen – sinnvoll abzuschätzen. Allerdings ist zu beachten, dass die Zeitpunkte für die Messungen nicht zu weit auseinander liegen, denn die Korrosionsaktivität ändert sich an den Prüfstellen, sowohl bei freier Korrosion als auch unter Einfluss des KKS.

5 Simulation von KKS im Rahmen der Korrosionsdiagnose

Während eines Untersuchungsprojekts an einem Küstenbauwerk wurde vom Autor eine vergleichende Betrachtung von Polarisations-effekten aus der testweisen Montage von Zink-Stabanoden am Objekt und der Anwendung von galvanostatischen, katodischen Simulationsversuchen durchgeführt. Diese Simulationsversuche wurden mit gleicher Gerätetechnik wie in Bild 6 durchgeführt. Die Messmethodik bestand in folgender Sequenz:

- Messung freies Korrosionspotential für 10 s,
- katodischer Puls mit $5 \mu\text{A}$ für 180 s, dabei fortgesetzte Potentialmessung,
- katodischer Puls mit $20 \mu\text{A}$ für 180 s, dabei fortgesetzte Potentialmessung,
- katodischer Puls mit $100 \mu\text{A}$ für 240 s, dabei fortgesetzte Potentialmessung,
- katodischer Puls mit $400 \mu\text{A}$ für 180 s, dabei fortgesetzte Potentialmessung,
- Messung freies Korrosionspotential für 120 s.

Bild 10 zeigt eine dabei aufgezeichnete Messkurve; diese muss zur Auswertung IR-korrigiert werden, d. h. die Potentiale bei eingetragenem Strom sind mit dem zuvor gemessenen Elektrolytzwiderstand zu korrigieren. Da es sich um eine galvanostatische Messung handelt, ist diese Korrektur einfach.

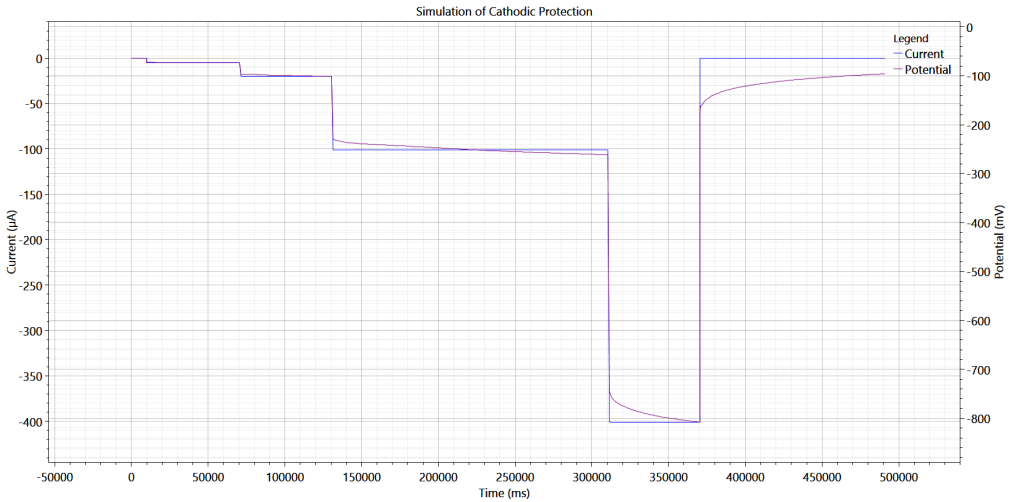


Bild 10: Beispiel für eine galvanostatische Simulationsmessung für KKS (hier mit anderen Pulszeiten für die Polarisationsstufen)

Dabei hatte sich gezeigt, dass die Potentialverschiebung bei $-100 \mu\text{A}$ ungefähr dem Wert entspricht, der jeweils an den gleichen Bewehrungsabschnitten bei Beschaltung mit einer Zink-Stabanode zu messen ist. Daraus wurde abgeleitet, dass das voraussichtliche Polarisationsverhalten von Zink bereits in der Planungsphase an geeigneten Prüfstellen untersucht werden kann, und dass dieser Versuch als Eignungstest für galvanische KKS-Systeme nutzbar ist: Sind mit der gegebenen Aufsatzmesszelle bei $-100 \mu\text{A}$ mindestens 100 mV Potentialänderung nachweisbar (Leistungsnachweis nach EN ISO 12696 [1]), und kann an der Prüfstelle mit der ermittelten Potentialänderung eine Verschiebung in passiv-ähnliche Korrosionsraten ($0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) angenommen werden?

6 Vergleich von Potentialverschiebungen zwischen Simulation und Messung am installierten KKS mit technischen und normativen Erfordernissen

Die praktische Umsetzung der besprochenen Herangehensweise soll am Beispiel eines Parkhauses gezeigt werden. Dessen Tragsystem ist als Stahlskelettkonstruktion mit Stahlbeton-Geschossdecken ausgeführt; die Geschossdecken sind Halbfertigteile mit Ortbetonergänzung

und Gussasphaltbelag. Die am Objekt bekannten erhöhten Chloridgehalte in Deckenplatten (bis ca. 2 %, bezogen auf die Zementmasse) bei gleichzeitig geringen Betonschäden ließen den Einsatz eines KKS als grundsätzliche Instandsetzungsmethode sinnvoll erscheinen. Die Fachplanung erfolgte in folgenden Schritten:

- Voruntersuchung: Im Bereich von einzelnen, an der Unterseite sichtbaren Rissen (teilweise mit Ausstürzungen, Flächen von ca. 30 m^2) wurde der Gussasphalt an der Oberseite entfernt und eine Korrosionsdiagnose durchgeführt. Aus engmaschigen Potential-, Widerstands- und Betondeckungsmessungen, Chlorid- und Wassergehaltsbestimmungen und erweiterten Korrosionsmessungen ging hervor, dass ein Korrosionsschutz erforderlich ist, dass aber auch an erhöht korrosionsaktiven Stellen das 100-mV-Kriterium für galvanische Systeme erfüllbar ist.
- Pro Instandsetzungsabschnitt wurden nach den Ergebnissen von vollflächigen Potential- und Betondeckungsmessungen (nach Entfernen des Gussasphaltbelags) Prüfstellen für Bohrmehlproben ausgewählt (wahrscheinliche Korrosionsbereiche) und daraus Prüfstellen für erweiterte Korrosionsmessungen (AC-Impedanz, galvanostatischer Puls, lineare Polarisation, Tafel-Polarisation, Simulation KKS) ausgewählt und getestet.

Prüfstelle	E_{OCP} [mV vs. SE]	i_{corr} [μA]	i_{min} [μA/cm²]	i_{max} [μA/cm²]	i_{average} [μA/cm²]	$\Delta E_{-100 \mu\text{A}}$ [mV]
1	-67	11,68	0,10	0,26	0,18	-173
2	-61	17,57	0,15	0,39	0,27	-128
3	-406	28,05	0,23	0,62	0,43	-68
4	-140	17,78	0,15	0,39	0,27	-123
5	-51	23,71	0,20	0,52	0,36	-98
6	-78	20,81	0,17	0,46	0,32	-92

Tabelle 3: Ergebnisse der erweiterten Korrosionsmessungen an den für die KKS-Simulation und als KKS-Monitoringfeld ausgewählten Prüfstellen

- Mit deren Ergebnissen (Elektrolyt- und Polarisationswiderstand, Korrosionsrate, Polarisationwert bei $-100 \mu\text{A}$) und im Vergleich mit den Chloridgehalten in Bewehrungsnähe wurde geprüft, ob der Funktionsnachweis nach EN ISO 12696 [1] voraussichtlich eingehalten werden kann, und an welchen Koordinaten der Betonfläche KKS-Monitoringfelder angelegt werden sollen, in denen die Anode für Depolarisationsmessungen schaltbar ist.
- Bei diesen Monitoringfeldern werden im laufenden Betrieb Signale von zwei Referenzelektroden, der Schutzstrom zwischen Anode und Bewehrung und die Temperatur aufgezeichnet. Einige Wochen nach Inbetriebnahme kann dann mit einer Ausschaltmessung geprüft werden, wie gut die zuvor gemachten Prognosen zutreffen.

Tabelle 3 zeigt Ergebnisse der Korrosionsmessungen aus einem der Instandsetzungsabschnitte. Die Chloridgehalte lagen zwischen 0,5 und 2,0 %, bezogen auf die Zementmasse, können aber den Prüfstellen nicht direkt zugeordnet werden. E_{OCP} (*open circuit potential*) steht für das freie Korrosionspotential, gemessen mit

einer Ag/AgCl-Referenzelektrode in der in Bild 6 gezeigten Aufsatzmesszelle. Die Korrosionsströme wurden bei Stabdurchmessern von 10 mm und Betondeckungen zwischen 20 und 53 mm gemäß Punkt 3/Bild 6 gemessen und in minimale bzw. maximale Korrosionsraten umgerechnet. Als maßgebend für die weiteren Berechnungen wurde anschließend der Durchschnittswert verwendet. In der linken Spalte sind die bei der KKS-Simulation mit $-100 \mu\text{A}$ ermittelten, IR-korrigierten Potentialänderungen gelistet.

In Tabelle 4 werden für die Prüfstellen die sich daraus ergebende Bewertung für Machbarkeit und Normenkompatibilität des galvanischen KKS gezeigt, d. h. die für den technischen Korrosionsschutz erforderliche Potentialverschiebung im Vergleich zum Ergebnis der Simulationsmessung sowie der voraussichtlichen Einhaltung des 100-mV-Kriteriums nach EN ISO 12696 [1]. Dabei ergibt sich, dass der Korrosionsschutz – in Prüfstelle 3 annähernd, sonst sicher – erreicht wird, dass die normative Vorgabe in Prüfstelle 3 jedoch nicht und in den Prüfstellen 5 bis 7 nur knapp erfüllt werden. Die zu beobachtende Korrelation von höheren Korrosionsströ-

Prüfstelle	$\Delta E_{\text{erforderlich}}$ für $i \leq 0,1 \text{ A/cm}^2$ [mV]	$\Delta E_{-100 \mu\text{A}}$ (KKS-Simulation) [mV]	Voraussichtliche Einhaltung von DIN EN ISO 12696, Abschn. 8.6 [1]	Korrosionsschutz gewährleistet nach Punkt 4
1	-31	-173	ja	ja
2	-52	-128	ja	ja
3	-76	-68	nein	(ja)
4	-52	-122	ja	ja
5	-67	-98	(ja)	ja
6	-61	-92	(ja)	ja

Tabelle 4: Abschätzung der für Passivität erforderlichen Potentialverschiebung und Vergleich mit Simulation sowie der normativen Forderung

men und geringeren Potentialverschiebungen bei der KKS-Simulation ist typisch und liegt an den in diesen Fällen geringeren Polarisationswiderständen sowie bei Vorkorrosion daran, dass Oxide aus aktiver Korrosion, anders als die Passivschicht, die Polarisation behindern.

Nach Inbetriebnahme des KKS erfolgte eine erste Ausschaltmessung, deren Ergebnisse in Tabelle 5 mit den prognostizierten Werten verglichen werden sollen. Hier ist anzumerken, dass zur Potentialmessung Mn/MnO₂-Referenzelektroden in Bewehrungsnähe in den Beton fest installiert werden, so dass, obwohl es nur wenige cm Unterschied zur Position der Aufsatzmesszelle sind, andere Messbedingungen vorliegen. Bild 11 zeigt die Einbausituation.

Die realen Potentialverschiebungen durch das KKS waren stets größer als bei der Simulation, was ein Indikator dafür ist, dass die Simulation

auf der sicheren Seite durchgeführt wird. An den Prüfstellen 1 und 6 lagen die Werte nah beieinander, aber an den Prüfstellen 2 und 3 gab es größere Unterschiede. Wahrscheinlich waren die bei der Zustandsuntersuchung geprüften Korrosionsstellen sehr klein, und die 10 m² große Anode des Monitoringfelds konnte eng benachbarte passive Bewehrungsanteile mit polarisieren, was zu deutlich negativeren Mischpotentialen an den eingebauten Referenzelektroden führt. In anderen Projekten konnte jedoch stets eine gute Übereinstimmung von Prognose- und Ist-Werten gefunden werden.

7 Weitere Gesichtspunkte bei der Beurteilung der Wirkung von KKS-Systemen

Passive oder sich katodisch verhaltende Bewehrungsabschnitte lassen sich durch KKS viel einfacher und stärker polarisieren als korrosi-



Bild 11: Markierungen der Stablagen und der Montagepositionen für die fest einzubauenden Referenzelektroden eines Monitoringfelds und Beispiel für eingemörtelte Referenzelektrode ERE20 und Kabelführung in gefrästem Kanal

Prüfstelle	Korrosionsmessungen bei Planung		Ausschaltmessung	
	$\Delta E_{\text{erforderlich}}$ für $i \leq 0,1 \text{ A/cm}^2$ [mV]	$\Delta E_{-100 \mu\text{A}}$ (KKS-Simulation) [mV]	$\Delta E_{\text{OCP KKSaktiv}}$ [mV]	Einhaltung DIN EN ISO 12696, Abschnitt 8.6 [1]
1	-31	-173	-193	ja
2	-52	-128	-223	ja
3	-76	-68	-174	ja
4	-52	-122	-172	ja
5	-67	-98	-167	ja
6	-61	-92	-102	ja

Tabelle 5: Vergleich von Prognosewerten der Polarisation aus den Korrosions- und KKS-Simulationsmessungen mit den bei der ersten Ausschaltmessung an der Monitoringeinrichtung festgestellten Depolarisationswerten

onsaktive, insbesondere vorkorrodierte Bereiche. Dadurch können – wenn sowohl passive als auch benachbarte aktive Bewehrungsabschnitte mit der Anode des KKS verbunden sind – ursprüngliche Makroelemente entlang der Bewehrung unterdrückt und beseitigt werden. Dieser Effekt des KKS wurde bereits 1938 in [7] beschrieben und in neueren Publikationen, z. B. [8], bei Laborexperimenten an Stahlbetonprüfkörpern bestätigt, als sich Aktivpotentiale an der Bewehrung unter Einfluss von Zinkanoden so einstellten, dass die passiven, katodischen Bereiche deutlich negativere Werte aufwiesen als die aktiven, anodischen Teilflächen. Folglich kam es zu einem umgekehrten Elementstromfluss als im ungeschützten Zustand, aber mit zusätzlichem Schutzstromertrag aus den Zinkanoden in die Bewehrungsteile.

Mit einer entsprechenden Anordnung von Referenzelektroden kann man diesen Effekt auch praktisch nutzen: Wenn sich an Messpunkten, die einerseits an einer sehr aktiven, in chloridhaltigem Beton befindlichen Koordinate und andererseits an einer nah benachbarten, offensichtlich passiven Koordinate platziert sind, an letzterer gleiche oder noch negativere Aktiv- bzw. Ausschaltpotentiale zeigen, kann davon ausgegangen werden, dass unter Einfluss des KKS das vormalige Makroelement aufgelöst wurde, unabhängig davon, wie stark die Potentialänderung an der (Bewehrungs-)Anode ist.

8 Schlussfolgerungen

Das 100-mV-Kriterium ist ein abgesicherter und etablierter Leistungsnachweis für ordnungsgemäß arbeitende KKS-Anlagen. Gleichwohl ist die Nicht-Einhaltung dieses Kriteriums allein noch kein Versagensnachweis für den KKS. Bei gering bis moderat erhöhten Korrosionsraten im ungeschützten Zustand können auch deutlich geringere Potentialverschiebungen ausreichend sein, um sicheren Korrosionsschutz zu gewährleisten. Mit diesem objektbezogenen messtechnischen Ansatz können v. a. galvanische KKS-Systeme beurteilt und funktionsgeprüft werden. Dabei ist es auch möglich, den zu erwartenden Polarisierungseffekt mit katodischen Simulations-

messungen zu dokumentieren und damit eine Eignungsprüfung durchzuführen.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 12696:2017-05: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton (ISO 12696:2016); Deutsche Fassung EN ISO 12696:2016.
- [2] Bockris, O. M. J.: National Bureau of Standards Circular 524 (1953), S. 243, zitiert nach Atkins, C.; Merola, R.; Lambert, P.: A comparison between 24-hour decays and Butler Volmer corrosion rates. *Materials and Corrosion* 70 (2019) 9, S. 1693–1699
- [3] Eichler, Th.: Grundlagen zu Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. In: Tagungsband Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton, 2010 an der Technischen Akademie Esslingen
- [4] Schneck, U.: Insights from corrosion measurements on corrosion mechanisms in reinforced concrete and on the evaluation of other corrosion data. In: Grantham, M.: (Hrsg.): Proc. of the 7th Concrete Solutions Conference, 30.09.–02.10.2019 in Cluj Napoca (Rumänien), veröffentlicht bei: MATEC Web of Conferences 289 (2019) 03008, 8 S. – DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928903008>
- [5] Schneck, U.: Nutzung erweiterter elektrochemischer Prüfungen zur Bestimmung des objektbezogenen, korrosionsauslösenden Chloridgehalts an Stahl- und Spannbetonbauwerken. In Curbach, M.; Opitz, H.; Scheerer, S.; Hampel, T. (Hrsg.): Tagungsband 7. Symp. Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen (SEUB) am 05.09.2012 an der TU Dresden, erschienen in: Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden kid, Heft 32, TU Dresden, 2013, S. 35–49
- [6] Angst, U.; Büchler, M.: On the applicability of the Stern-Geary relationship to determine instantaneous corrosion rates in macro cell corrosion. *Materials and Corrosion* 66 (2015) 10, S. 1017–1028
- [7] Mears, R.; Brown, R.: A theory of cathodic protection. In: Proc. of the 74th General Meeting of the Electrochemical Society, Rochester, NY (USA), 1938, Reprint aus: Gummow, R. A. (Hrsg.): Cathodic Protection Criteria – a literature survey, NACE, 1989, S. 17–29
- [8] Giorgini, R.: Issues using potential decay techniques to assess a cathodic protection system of steel in concrete caused by macrocell corrosion. In: Grantham, M.; Muhammad Basheer, P. A.; Magee, B. J.; Soutos, M.: (Hrsg.): Proc. of the 5th Concrete Solutions Conf., 01.–03.09.2014 in Belfast (Nordirland), Leiden: CRC Press/Balkema, 2014, S. 189–197

Bildquellen

Alle Bilder: Ulrich Schneck; Bild 2 auf Grundlage von [3] erstellt; Bild 9 bereits veröffentlicht in [4].

Das 11. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ (SEUB) fand am 08. März 2021 als digitale Veranstaltung an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

In der Keynote Lecture wurde über Versuche an einem Brückenbauwerk sowohl in situ als auch im Prüflabor berichtet – eine Verifizierung, die nur selten vorkommt. Danach spannte sich der thematische Bogen über die Tragfähigkeit von Gewölbebrücken, berührungslose Messverfahren im Praxistest, über Monitoring und schwingungsbasierte Messungen an Bauwerken hin zu faseroptischen Messsystemen und ihren Einsatzmöglichkeiten bei der Risserfassung. In weiteren Beiträgen wurde eine neue Methode zur verbesserten Bestimmung des Chloridgehalts im Beton vorgestellt, über ein Verfahren zur Spanndrahtbruchdetektion mittels Schallemission und über das Potential des kathodischen Korrosionsschutzes berichtet. Mit einem Bericht über eine erfolgreiche Probelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke endete die Tagung.

Das 12. SEUB ist für März 2023 geplant.

Der vorliegende Tagungsband ist als digitale Version Open Access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden abrufbar.