



DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG E.V.

DGZfP-Fachausschuss für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen  
Unterausschuss Korrosionsnachweis bei Stahlbeton

## **MERKBLATT B 3**

**Elektrochemische  
Potentialmessungen zur  
Detektion von Bewehrungs-  
stahlkorrosion**

April 2008, überarbeitete Fassung

## Was ist Zerstörungsfreie Prüfung?

Die Zerstörungsfreie Prüfung ist ganz wesentlich mitverantwortlich für Unfälle und Katastrophen, die **nicht** passieren. Vermutlich ist das die Ursache dafür, dass sie trotz der enormen Bedeutung, die sie für das tägliche Leben jedes Einzelnen hat, so wenig im Bewusstsein der Menschen präsent ist. Dies zu ändern, durch alle Möglichkeiten der Information und Kommunikation, ist gegenwärtig eine der wichtigsten Aufgaben der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP).

Röntgen- und Ultraschalluntersuchungen, Computertomographie, Video- und Endoskopie sind Begriffe, die den meisten Menschen bekannt sind. Dass diese und viele andere Methoden aber nicht nur in der Medizin genutzt werden, sondern auch zur Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) von Bauteilen und Materialien, ist weitgehend unbekannt.

Der Wunsch, Werkstoffe und Werkstücke zerstörungsfrei – das heißt in einer Weise, die die spätere Verwendung nicht beeinträchtigt – zu prüfen, ist so alt wie das Vermögen der Menschen, diese zu bearbeiten. Das kritische Beüben eines von Hand oder mit einem Werkzeug geformten Gegenstandes, das Abklopfen einer Keramik mit dem Fingerknöchel oder das Abtasten einer bearbeiteten Oberfläche mit der Fingerspitze sind zerstörungsfreie Prüfmethoden, die den Menschen seit Urzeiten selbstverständlich sind.

Als bedeutender wirtschaftlicher Faktor aber ist diese Technik noch relativ jung. Erst als Mitte des 19. Jahrhunderts der gewaltig ansteigende Bedarf an Rohstoffen die Industrie vor das Problem der Materialeinsparung bei gleichzeitig erhöhten Sicherheitsanforderungen stellte, wurden spezielle Verfahren in die praktische Materialprüfung eingeführt. In dieser Zeit wurde auch der Begriff „Zerstörungsfreie Materialprüfung“ geprägt.

Mit Hilfe der ZfP können verborgene Fehler in Materialien, Bauteilen und Konstruktionen vor und während ihres Betriebes so frühzeitig erkannt werden, dass deren unvorhergesehenes Versagen verhütet wird. Unfälle mit Gefährdung von Menschenleben und schweren Sach- und Umweltschäden können damit vermieden werden.

In fast allen Industriezweigen ist die ZfP zum unverzichtbaren Instrument für Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung geworden. Heute ist keine Gas- oder Ölversorgung, kein Start eines Flugzeuges, keine Herstellung eines Autos oder eines Zuges, kein Brückenbau und kein Betrieb eines Kraftwerkes mehr denkbar ohne die ständige Kontrolle mittels Zerstörungsfreier Prüfung. Jedes sicherheitsrelevante Teil wird geprüft!

## Wer ist die DGZfP?

Die Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), gegründet 1933, ist die älteste ZfP-Gesellschaft der Welt. Sie arbeitet als technisch-wissenschaftlicher Verein auf gemeinnütziger Basis und hat laut Satzung den Zweck, Aus- und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung auf dem Gebiet der Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) zu fördern. Sie organisiert die Kommunikation zwischen Forschungs- und Entwicklungsinstituten und ZfP-Anwendern, Geräteherstellern und Dienstleistern und mit der Öffentlichkeit.

Die DGZfP hat derzeit circa 1000 persönliche und knapp 500 korporative Mitglieder. Dazu gehören alle großen Konzerne und Unternehmen, die ZfP einsetzen, ebenso wie Forschungseinrichtungen, Universitäten und Behörden, aber auch einzelne Personen, die sich mit diesem Fachgebiet befassen.

Die Arbeitsschwerpunkte sind:

- Aus- und Weiterbildung von Prüfpersonal
- Ausgabe von Kompetenzzertifikaten durch die DGZfP Personalzertifizierung (DPZ)
- Veranstaltung von Tagungen und Seminaren
- Herausgabe von Fachliteratur und – gemeinsam mit der ÖGfZP (Österreich) und der SGZP (Schweiz) – der fünfmal jährlich erscheinenden „ZfP-Zeitung“
- Regelmäßige fachliche Weiterbildung in 17 regionalen Arbeitskreisen
- Erstellen und Harmonisieren von Normen und Richtlinien auf nationaler und internationaler Ebene

Die DGZfP ist Gründungsmitglied im Europäischen Verband für Zerstörungsfreie Prüfung (EFNDT) und sie ist Mitglied im Weltverband für ZfP (ICNDT).

Herausgeber:



DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG E.V.

Max-Planck-Straße 6 • D-12489 Berlin  
Telefon: +49 30 67807-0 • Telefax: +49 30 67807-109 • E-Mail: [mail@dgzfp.de](mailto:mail@dgzfp.de)

ISBN 3-78-3-940283-10-8

© Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung, vorbehalten. Nachdruck, Vervielfältigung sowie auch die Weitergabe auf elektronischem Weg ist nicht gestattet. DGZfP B 3, überarbeitete Ausgabe April 2008, 1. Fassung 1990.

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
1 Zweck und Anwendungsbereich .....	4
2 Verfahrensbeschreibung.....	4
3 Geräteausstattung und bauseitige Voraussetzungen.....	6
4 Durchführung der Messungen .....	8
4.1 Vorbereitung der Messeinrichtung und der Bezugselektrode .....	8
4.2 Kontaktierung der Bewehrung.....	8
4.3 Vorbereitung der Betonoberfläche .....	8
4.4 Messraster .....	9
4.5 Einflüsse und Fehlerquellen .....	10
4.6 Prüfprotokoll .....	11
5 Auswertung und Interpretation .....	11
6 Anwendungs- und Nachweisgrenzen .....	16
7 Qualifikation des Prüfpersonals .....	16
8 Literatur .....	17
9 Weiterführende Literatur.....	17

## 1 Zweck und Anwendungsbereich

Dieses Merkblatt beschreibt die Anwendung elektrochemischer Potentialmessungen (häufig auch als Potentialfeldmessung bezeichnet) zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion an Stahlbetonbauwerken. Mit Hilfe dieses Verfahrens können Bereiche korrodierender Bewehrung zerstörungsfrei lokalisiert werden. In der Regel kommt diese Messmethode bei der Detektion chloridinduzierter Korrosion zum Einsatz. Die Abschätzung der Gefahr einer karbonatisierungsinduzierten Korrosion sollte durch Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und der Betondeckung erfolgen. Die Beurteilung des Korrosionszustandes der Bewehrung unter einer Asphalt-schicht ist mit dieser Methode nicht möglich.

Mit der Potentialmessung können nur solche Bereiche detektiert werden, bei denen zum Zeitpunkt der Messung Korrosionsprozesse ablaufen. Frühere Korrosionsprozesse an der Bewehrung, die zum Messzeitpunkt zum Erliegen gekommen sind, können nicht festgestellt werden.

Die Einsatzbereiche dieses Verfahrens erstrecken sich auf:

- Ortung korrosionsaktiver Bereiche
- Bestandsaufnahme über Umfang und Verteilung von Bewehrungskorrosion an Stahlbetonbauwerken
- Vorbereitung von Instandsetzungsmaßnahmen
- wiederkehrende Kontrolle und Überwachung.

Der Inhalt des Merkblattes bezieht sich ausschließlich auf den Einsatz mobiler, ortsveränderlicher Bezugselektroden, die kurzzeitig zur Messung des Potentials der Bewehrung auf die Betonoberfläche aufgesetzt werden. Das Verfahren grenzt sich dadurch vom Bereich des Corrosion Monitoring mit ortsfesten, eingebauten Bezugselektroden bzw. von Sensorsystemen ab, bei denen eine kontinuierliche Verfolgung von Messgrößen im Bereich der installierten Elektroden möglich ist. Diese Methoden sind nicht Gegenstand des Merkblattes.

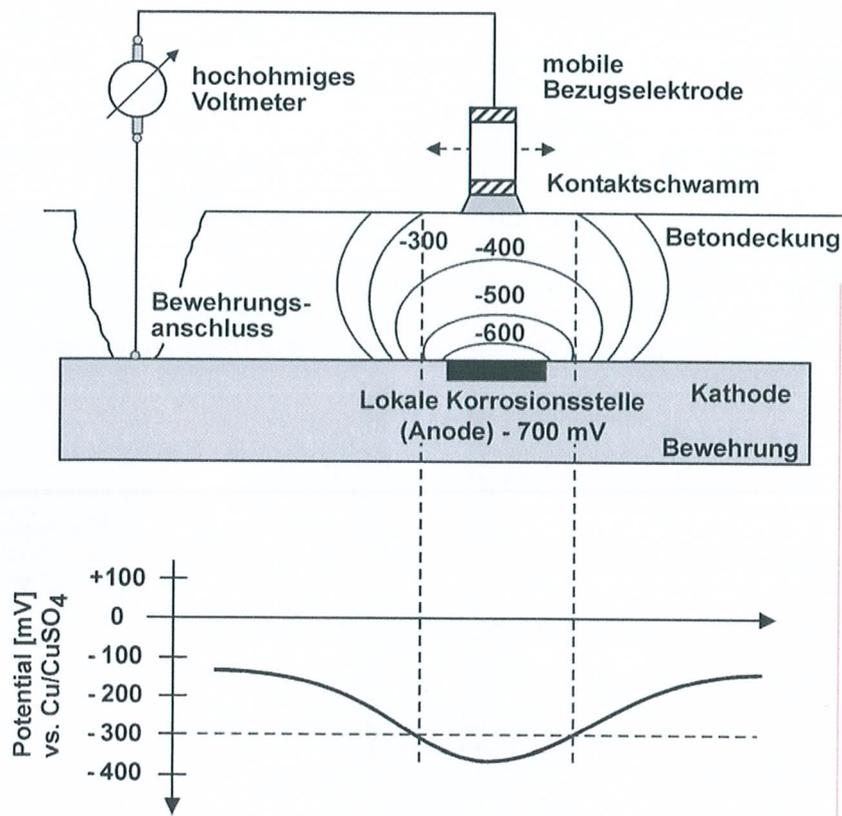
## 2 Verfahrensbeschreibung

Die elektrochemische Potentialmessung ist ein Verfahren zur Beurteilung von Korrosionsprozessen der Bewehrung in Stahlbetonbauwerken. Da Einzelpotentiale nicht messbar sind, wird die Messung des Potentials als Spannungsmessung zwischen einer Bezugselektrode (bekanntes Potential) und der Messelektrode (Bewehrung, Potential unbekannt) durchgeführt.

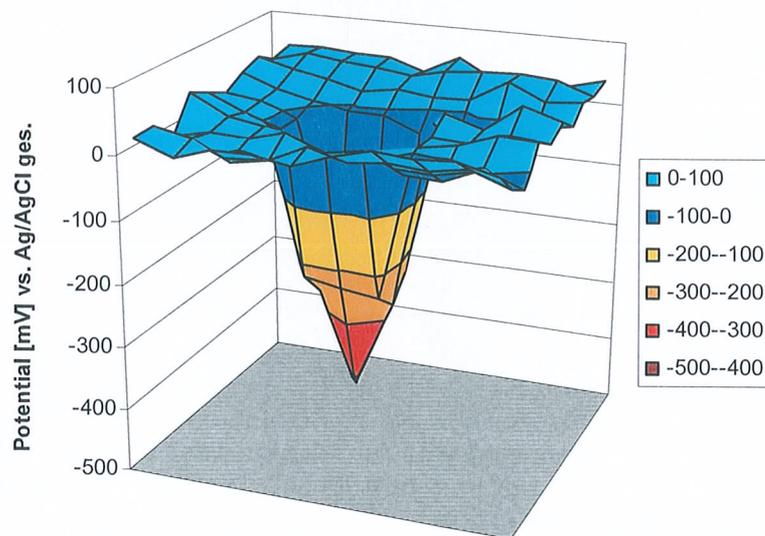
Bei der Potentialmessung an Stahlbetonbauwerken wird die Potentialdifferenz zwischen dem Bewehrungsstahl im Beton und einer auf der Betonoberfläche aufgesetzten Bezugselektrode ermittelt. Die Bezugselektrode dient als ortsveränderlicher Referenzpunkt für die Messungen. Ein direkter Zugang (elektrisch leitender Kontakt) zur Bewehrung ist erforderlich. Das Messprinzip wird in Abb. 1 gezeigt. Die Messungen ermöglichen unter bestimmten Voraussetzungen Aussagen zur tatsächlichen Potentiallage der Bewehrung.

Durch gezieltes Versetzen der Bezugselektrode kann ein beliebiges Raster an Messpunkten (Potentialfeld) aufgenommen werden. Mit den an der Betonoberfläche messbaren Potentialwerten können Rückschlüsse auf das Potential und die Potentialverteilung der Bewehrung gezogen werden (Abb. 1). Die Abb. 2 zeigt beispielhaft die Potentialverteilung im Baukörper und die Ausbildung eines sog. Potentialtrichters im Bereich einer lokalen Korrosionsstelle.

Potentialmessungen mit zwei Bezugselektroden ohne Bewehrungskontaktierung werden in diesem Merkblatt nicht behandelt.



**Abb. 1:** oben: Messprinzip;  
 unten: beispielhaftes an der Betonoberfläche gemessenes Potential



**Abb. 2:** Beispielhafte Ausbildung eines Potentialtrichters in 3D

### 3 Geräteausstattung und bauseitige Voraussetzungen

Als Bezugselektroden werden Metall-/Metallionenelektroden eingesetzt, die sich in einem dynamischen Gleichgewichtszustand zwischen Auflösung und Abscheidung befinden. Gebräuchliche Bezugselektroden sind die Quecksilber/Quecksilberchloridelektrode (Kalomel-Elektrode), die Silber/Silberchloridelektrode (SCE) und die Kupfer-/Kupfersulfatelektrode (CSE). Da die Bezugspotentiale dieser Elektroden gegenüber der Normalwasserstoffelektrode sehr unterschiedlich sind, ist die Angabe der verwendeten Bezugselektrode zusammen mit den Messergebnissen unbedingt erforderlich. Beispiele für verschiedene Bezugselektroden und deren zugehörige Referenzpotentiale gegen die Normalwasserstoffelektrode werden in Tab. 1. gezeigt.

Tab. 1: Bezugselektroden und Referenzpotentiale

Elektrodensystem	Elektrolytlösung der Bezugselektrode	Potential bezogen auf die Standardwasserstoffelektrode bei 25°C [mV]
Silber/Silberchlorid (Argental) Ag/AgCl/Cl <sup>-</sup>	KCl 0,1 Molar	+288
	KCl 3 Molar	+207
	KCl gesättigt	+199
Quecksilber/Quecksilberchlorid (Kalomel) Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /Cl <sup>-</sup>	KCl gesättigt	+242
Quecksilber/Quecksilbersulfat Hg/Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> gesättigt	+640
Quecksilber/Quecksilberoxid Hg/HgO/OH <sup>-</sup>	NaOH 1 Molar	+98
Kupfer/Kupfersulfat Cu/CuSO <sub>4</sub>	CuSO <sub>4</sub> gesättigt	+320
Mangandioxid MnO <sub>2</sub>	chloridfreies alkalisches Gel pH = 12,6	+410

In Abhängigkeit von der Messaufgabe stehen unterschiedliche Referenzelektroden zur Verfügung. So können für Punkt- bzw. Einzelmessungen Stabelektroden eingesetzt werden, während für flächige oder linienförmige Messobjekte in der Regel Radelektrodensysteme zum Einsatz kommen. Typische Einsatzsituationen sind in Abb. 3 – 5 dargestellt.



**Abb. 3 Handmessung an einer Stütze**



**Abb. 4: Messung mit Radelektrode**



**Abb. 5: Einzelmessung über Kopf**

Die Potentialdifferenz zwischen Bewehrungsstahl und Bezugselektrode wird mit einem hochohmigen Spannungsmessgerät ermittelt. Der Eingangswiderstand des Messgerätes muss mindestens  $10^7$  Ohm betragen.

Ausführliche Hinweise zur Durchführung der Messungen, der Vorbereitung der Oberflächen und zum Messraster werden unter Abschnitt 4 gegeben.

Die erhaltenen Messdaten sind in einem Protokoll bzw. auf einem Speichermedium mit eindeutiger Zuordnung zum Messraster abzulegen. Für eine erste Auswertung ist eine graphische Anzeige der Potentialwerte in einer Abstufung von 50 mV sinnvoll. Dadurch werden auffällige Potentialtrichter schnell erkannt und können einer gezielten Untersuchung unterzogen werden.

Bauseitig sind ein zugänglicher Wasseranschluss und eine 230 V Spannungsversorgung vorteilhaft.

## **4 Durchführung der Messungen**

### **4.1 Vorbereitung der Messeinrichtung und der Bezugselektrode**

Vor Beginn der Messungen sind eine Kalibrierung der verwendeten Bezugselektroden und eine Funktionsprüfung der gesamten Messeinrichtung vorzunehmen. Die für die Messungen vorgesehene Bezugselektrode wird dabei gegen eine zweite Bezugselektrode (Referenzelektrode) gemessen, welche im Rahmen des üblichen Qualitätsmanagements einer besonderen Überwachung und Kontrolle unterliegt und nicht für Messzwecke eingesetzt wird. Die Potentialdifferenz zwischen der Bezugselektrode und der Referenzelektrode ist zu protokollieren. Die Abweichung zwischen dem theoretischen Differenzwert und der tatsächlich ermittelten Potentialdifferenz muss betragsmäßig unter 10 mV liegen. Größere Abweichungen erhöhen die Wahrscheinlichkeit für ein instabiles Elektrodenverhalten. Hinsichtlich der Funktionsprüfung sind die Herstellerangaben zu beachten. Bei Überkopfmessungen ist auf die Eignung der Messelektrode zu achten.

Die Messleitung der Bezugselektrode und die Messleitung zum Bewehrungsanschluss sind an das Messgerät anzuschließen. Eine potentialrichtige Messung liegt vor, wenn die Bezugselektrode am Multimeter auf dem Eingang „COM“ liegt bzw. an einem speziell gekennzeichneten Eingang (BE, Ref. oder ähnlich). Erfolgt der Anschluss auf andere Art, ist ggf. eine nachträgliche Vorzeichenkorrektur der Messwerte durch Multiplikation mit -1 vorzunehmen. Für die Messung wird die Bezugselektrode von außen auf den Beton aufgesetzt. Zur sicheren Ankopplung an die Betonoberfläche dient ein feuchter Kontaktschwamm.

Die Plausibilität der Messergebnisse am Objekt ist während der Messungen zu prüfen.

### **4.2 Kontaktierung der Bewehrung**

Die Durchführung von Potentialmessungen ist zerstörungsfrei. Lediglich zur elektrisch leitenden Kontaktierung der Bewehrung ist diese punktuell freizulegen, sofern nicht bereits eine Anschlussmöglichkeit (z. B. Erdung) gegeben ist. Innerhalb eines Messfeldes muss die Bewehrung elektrisch leitend verbunden sein. Um dies zu überprüfen, müssen innerhalb des Messfeldes mindestens zwei räumlich möglichst weit entfernt liegende Kontaktstellen zur Bewehrung hergestellt werden. Zur Ortung der Bewehrung wird auf das Merkblatt DGZfP B2 [1] verwiesen. Durch eine einfache Widerstandsmessung zwischen diesen Punkten kann überprüft werden, ob eine Durchkontaktierung der Bewehrung gegeben ist. Die Widerstandswerte sollten im Bereich unter 1  $\Omega$  liegen. Bei höheren Werten sind weitere Kontaktstellen freizulegen und zu überprüfen.

### **4.3 Vorbereitung der Betonoberfläche**

Die Betonoberfläche ist von Verschmutzungen zu befreien. Auf bitumen- oder kunststoffbeschichteten Betonoberflächen ist eine Potentialmessung nicht möglich, da eine sichere elektrolytische Verbindung zum Beton nicht hergestellt werden kann. Kunststoffmodifizierte und mineralische Beschichtungen sowie Hydrophobierungen können die Messwerte beeinflussen. Die Auswirkung von Beschichtungen auf das Messergebnis muss vor Beginn der Messungen geprüft werden. Hierzu kann die Beschichtung stellenweise abgekratzt und das Messergebnis vorher und nachher verglichen werden. Partielle Oberflächenschutzsysteme können das Messergebnis durch Feuchtegradienten im Beton beeinflussen. Derartige Bereiche sind deshalb gesondert zu kennzeichnen. Sofern im Zuge einer Instandsetzungsmaßnahme Oberflächenbehandlungen vorgesehen sind, haben sich Mes-

sungen nach dem Kugelstrahlen bewährt. Damit können oberflächenbedingte Einflüsse auf das Messergebnis weitgehend ausgeschlossen werden.

Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, die Oberfläche vor den Messungen gleichmäßig zu befeuchten, ggf. auch mehrfach, und während der Messungen gleichmäßig feucht zu halten. Dadurch lassen sich ggf. hohe Oberflächenwiderstände und unterschiedliche Oberflächenfeuchten beseitigen, die zu fehlerhaften Potentialmessungen führen können. Gleichzeitig werden durch die bessere horizontale Leitfähigkeit kleinere Potentialtrichter auch bei größerem Messraster noch erkannt. Vor Beginn der Messung ist eine Befeuchtungszeit von ca. 20 Minuten zu empfehlen. Werden die auftretenden Potentialänderungen an einer beliebigen Referenzstelle verfolgt, lässt sich das Erreichen einer ausreichenden Befeuchtungszeit an der Potentialänderungsgeschwindigkeit deutlich erkennen. Bei den meisten Objekten zeigt eine Potentialänderung unter 3 mV pro Minute eine ausreichende Befeuchtung an [2].

Es ist zu beachten, dass bei größeren Flächen eine während der Messung einsetzende Abtrocknung der Oberfläche zu signifikanten Potentialverschiebungen führen kann. Bei direkter intensiver Sonneneinstrahlung und Wind können Teilbereiche bereits wieder vollständig abtrocknen, bevor die Messung abgeschlossen ist. Schon eine beginnende Abtrocknung (erkennbar an der Grautonänderung von dunkelgrau nach hellgrau) kann das gemessene Potential um mehr als 50 mV verändern. Derartige Zustände sind durch wiederholtes Benetzen zu vermeiden, da sie die spätere Auswertung und Interpretation der Messdaten erschweren.

Die Messungen können auch an trockenen Oberflächen erfolgen. Die Potentialgradienten zwischen anodischen und kathodischen Bereich bleiben weitgehend unverändert messbar. Lediglich die Potentiallage ist 100 bis 200 mV positiver. Es ist darauf zu achten, dass die Verweilzeit pro Messpunkt etwa gleich bleibt, weil sonst eine signifikante Potentialdrift zu negativeren Werten einsetzt. Oberflächen mit partiell anstehender Feuchtigkeit sind in jedem Fall vollständig zu befeuchten, um feuchtebedingte Potentialgradienten zu vermeiden.

An Wand- und Stützenfüßen ist immer mit einem höhenabhängigen unterschiedlichen Feuchtegehalt zu rechnen, der durch eine temporäre Befeuchtung nicht zu beseitigen ist. Beginnend vom Bodenniveau nimmt der Feuchtigkeitsgehalt mit der Höhe deutlich ab. Der unterschiedliche Feuchtigkeitsgehalt kann durch gesonderte Widerstandsmessungen festgestellt werden. Im Höhenprofil auftretende Potentialänderungen sind unter Berücksichtigung der festgestellten Feuchtigkeitsunterschiede zu bewerten.

#### 4.4 Messraster

Zur Aufnahme der Messwerte ist vor der Messung ein Messraster festzulegen. Das gewählte Messraster ist am Messobjekt so zu kennzeichnen, dass eine eindeutige Positionszuordnung der aufgenommenen Messwerte möglich ist. Dabei soll die Positionszuordnung am Messobjekt mit einer Genauigkeit von 10 cm oder besser erfolgen. Die Aufnahme von Messwerten und die Zuordnung der Werte zum Messraster kann durch elektronische Wegaufnehmer unterstützt werden. Grundsätzlich sind auch andere Arten der Positionszuordnung möglich.

In Ausnahmefällen kann das Messraster bis auf 50 x 50 cm erweitert werden. Bei diesem Raster sollte bei erkennbaren Potentialtrichtern in jedem Fall eine Nachmessung mittels Handelektrode (in kleinerem Raster) zur Ermittlung der genauen Lage der negativsten Potentialstelle (Zentrum eines Korrosionsherdes) erfolgen.

Größere Messabstände bedingen in jedem Fall, dass kleinere Korrosionsherde übersehen werden können. Die Nachweissicherheit verringert sich dann erheblich. Deshalb sind größere Raster unter ausdrücklichem Hinweis auf die eingeschränkte Aussagefähigkeit gesondert zu vereinbaren.

#### 4.5 Einflüsse und Fehlerquellen

Die gemessenen Potentiale unterliegen verschiedenen Einflüssen. Diese sind in Bezug auf die vorliegenden Randbedingungen zu identifizieren und ggf. zu quantifizieren. Die Tab. 2 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Einflüsse auf die gemessenen Potentiale.

Tab. 2: Wesentliche Einflüsse auf die gemessenen Potentiale

Einfluss	Auswirkung auf das gemessene Potential
Betondeckung	- bei kleinen Betondeckungen liegen die gemessenen Potentiale in der Nähe des Anodenpotentials (tatsächliches Stahlpotential), bei großen Betondeckungen Verschiebung in Richtung positiver Potentiale (Mischpotential)
Feuchtegehalt des Betons	- i.d.R. Verschiebung in Richtung negativer Potentiale mit zunehmendem Feuchtegehalt - bei dauerhaft sehr hohen Feuchtegehalten im Bereich der Wassersättigung sehr negative Potentiale aufgrund Sauerstoffarmut - i.d.R. flachere Gradienten bei hohen Feuchtegehalten
Schichten mit hohem elektrischen Widerstand (z.B. Reparaturschichten)	- Verschiebung in Richtung positiverer Potentiale
Freiliegende Bewehrung, Einbauteile (z.B. Übergangskonstruktionen, Entwässerungseinrichtungen)	- im Bereich der Einbauteile i.d.R. Verschiebung in Richtung negativer Potentiale, insbesondere bei Vorhandensein von Korrosion und Feuchtigkeit während der Messung
Tiefergehende Risse	- Verschiebung in Richtung negativer Potentiale im Rissbereich durch höheren Feuchtegehalt möglich
Zementart	- im Vergleich zu Portlandzement negativere Potentiale bei Verwendung von Hochofenzement

Eine Eisbildung auf der Oberfläche beeinträchtigt die Potentialmessung aufgrund auftretender Widerstandsänderungen. Eisbildung kann auf Betonoberflächen auch noch auftreten, wenn die Lufttemperatur über 0 °C liegt (Kältespeicher). Unter diesen Bedingungen sind Messungen nicht durchzuführen. Als untere Grenze zur sicheren Durchführung der Messungen werden 5 °C Luft- und Bauteiltemperatur angesehen.

Teilweise freiliegende oder im Zuge von Instandsetzungsmaßnahmen freigelegte Bewehrung (z.B. Fahrbahnübergänge, Fugen) kann auch in einigem Abstand zu

negativeren Potentialwerten führen. Bei großflächigen Ablösungen/Hohllagen der Betondeckung sind Potentialmessungen nicht möglich bzw. führen zu fehlerhaften Messungen und stellen damit eine Gefahr für Fehlinterpretationen der Messergebnisse dar. Bei Hinweisen auf Hohllagen und Ablösungen sind in diesen Bereichen ergänzende Untersuchungen erforderlich.

Insbesondere bei regelmäßigen Wiederholungsmessungen an Objekten ist auf vergleichbare äußere Bedingungen zu achten. Dabei sind die Feuchte- und Temperaturabhängigkeit der gemessenen Potentiale zu beachten. Der Feuchtegehalt beeinflusst den elektrolytischen Widerstand des Betons und das Sauerstoffangebot. Durch Temperaturänderungen werden sowohl die elektrochemischen Reaktionen an der Bewehrung als auch das Potential der Bezugselektrode verändert. Temperaturabweichungen von weniger als 10 K können im Allgemeinen vernachlässigt werden. Sind vergleichbare Bedingungen nicht gewährleistet, muss deren möglicher Einfluss auf die Ergebnisse besondere Aufmerksamkeit finden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

#### **4.6 Prüfprotokoll**

Das Prüfprotokoll muss folgende Angaben enthalten:

- Zeitpunkt der Untersuchungen
- Grundriss mit Lage der gemessenen Flächen
- Lage der Bewehrungsanschlüsse (Betondeckung, Stabdurchmesser)
- Messraster, Koordinatenursprung
- Art der Bezugselektrode und deren Bezugspotential gegen eine überwachte Laborelektrode zum Zeitpunkt der Messung
- Zustand der Betonoberfläche (Risse, Abplatzungen, Oberflächenschutzsystem, Rostfahnen)
- Art und Dauer der Befeuchtung vor den Messungen
- klimatische Bedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte)
- Darstellung der Potentialverteilung und Betondeckung im Bezugssystem
- Anzahl und Lage von Kontrollöffnungen mit Dokumentation der Ergebnisse
- Angaben über ergänzende Untersuchungen (Chloridanalysen, Bohrkernentnahmen, Elektrolytwiderstand des Betons, Karbonatisierungstiefe)
- Zementart (optional).

#### **5 Auswertung und Interpretation**

Die Interpretation der Messergebnisse erfordert Spezialkenntnisse (siehe Abschnitt 7), da eine unkritische Bewertung zu erheblichen Fehlinterpretationen führen kann [3][4]. Im passiven Zustand kann der Potentialbereich der Bewehrung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern über einen recht großen Bereich (mehrere 100 mV) schwanken. Allein aufgrund der Potentialwerte ist eine eindeutige Zuordnung aktiver (korrodierender) oder passiver Bewehrungszustände nicht möglich (Abb. 6).

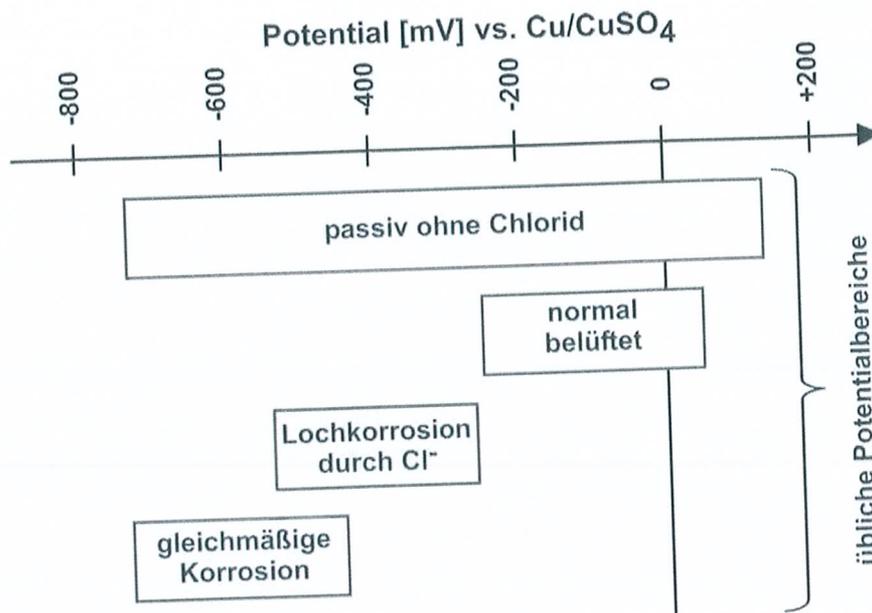


Abb. 6: Übliche Potentialbereiche von Bewehrungsstahl

Die gemessenen Potentialwerte können dahingehend interpretiert werden, dass negativere Potentiale auf eine höhere Wahrscheinlichkeit für Korrosionsvorgänge hindeuten. Praktische Erfahrungen haben gezeigt, dass feste Grenzwerte als alleiniges Indiz für die Interpretation der Ergebnisse nicht immer sinnvoll sind, da die gemessene Potentialdifferenz von verschiedenen Einflüssen abhängig ist (siehe Tabelle 2). Deshalb erweist sich die Auswertung ortsabhängiger Potentialgradienten an der Oberfläche i.d.R. als zweckmäßiger. Steile Gradienten des Potentialfeldes lassen auf eine höhere Korrosionswahrscheinlichkeit schließen.

Chloridinduzierte Bewehrungsstahlkorrosion führt häufig zu örtlich stark begrenzten korrodierenden Bereichen. Diese führen bei der graphischen Darstellung in einem Potentialdiagramm zu ausgeprägten Potentialverschiebungen in räumlich abgegrenzten Bereichen, den sogenannten Potentialtrichtern. Im Zentrum solcher Potentialtrichter liegt das Potential häufig 200 bis 400 mV negativer als in den umliegenden Bereichen (vgl. Abb. 2). Hier kann mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit von einer örtlichen Depassivierung der Stahlbewehrung ausgegangen werden. Zur genauen Lokalisierung der Schadstelle empfiehlt sich die Ermittlung der negativsten Potentialstelle innerhalb des Trichters. Aktive Korrosionsstellen lassen sich so auf wenige Zentimeter genau lokalisieren. Durch gezielte Öffnung der Betondeckung in solchen Bereichen kann eine abschließende Zustandsbewertung der Stahlbewehrung erfolgen.

Eine Interpretation der Potentialmessung bezüglich des Korrosionszustandes der Bewehrung kann nur im Zusammenhang mit ergänzenden Informationen aus begleitenden Bauwerksuntersuchungen erfolgen (Tab. 3). Der notwendige Umfang dieser begleitenden Untersuchungen ist objektabhängig. Als Mindestanforderungen werden angesehen:

- vollflächige Betondeckungsmessung
- vollflächiges Abklopfen der Betonoberfläche zur Hohlstellenfindung

- vollflächige Untersuchung der Betonoberfläche auf:
  - freiliegende Bewehrung
  - (- Verpressröhrchen bei Spannbetonbauteilen – diese sollten endoskopiert werden)
  - Abdichtungsreste
  - Auffrierungen / Betonschädigungen / Rissbildungen
  - Entwässerungseinrichtungen
- Orientierende Sondierung der Bewehrung an auffälligen Stellen

Ferner müssen tiefengestaffelte Chloridgehaltsbestimmungen an Stellen mit verdächtigen Potentialwerten und an Referenzstellen vorgenommen werden. Die Entnahmestellen sind anhand der Potentialbilder festzulegen. Die erforderliche Anzahl richtet sich nach den Ergebnissen der Potentialmessung und kann vorher nicht genau angegeben werden.

Um chloridinduzierte Korrosion in Bauwerken zuverlässig aufzufinden, ist es von entscheidender Bedeutung, die Ergebnisse aller o.g. Untersuchungen/Messungen in die Auswertung mit aufzunehmen.

Die Festlegung, welche Untersuchungen/Messungen an welcher Stelle in welchem Umfang durchgeführt werden, sollte vom verantwortlichen sachkundigen Prüfer, welcher letztlich auch die Auswertung vornimmt, erfolgen. Die Auswertung von Potentialmessungen von Personen, welche die Potentialmessungen nicht selbst durchgeführt bzw. angeleitet/begleitet haben, birgt die Gefahr von Fehlinterpretationen und sollte nur in Ausnahmefällen erfolgen.

Tab. 3: Begleitende Bauwerksuntersuchungen

<b>Begründung</b>		<b>Literatur zu den Verfahren</b>
<b>Maßnahme</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<p><b>1</b></p> <p>Bestimmung der Betondeckung (grundsätzlich erforderlich)</p> <p>Bohrmehlentnahme zum Erstellen von Chloridtieftiefenprofilen (grundsätzlich erforderlich)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Berücksichtigung des Einflusses der Betondeckung bei der Auswertung der gemessenen Potentiale</li> <li>- Gefahr der Fehlinterpretation gemessener Potentialgradienten als Indiz für Bewehrungskorrosion bei lokal streuender Betondeckungen</li> <li>- notwendige Ergänzung zur sachgerechten Interpretation der Potentialmessung</li> <li>- Bestimmung des spezifischen kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts des untersuchten Bauteils (in Kombination mit lokalen Bewehrungsbedingungen)</li> <li>- Korrelation von Chloridgehalt und gemessenen Potentialwerten</li> <li>- Beurteilung der Möglichkeit von Sauerstoffarmut an der Bewehrungsfläche als Ursache für die Messung sehr negativer Potentiale bei Chloridgehalten unter dem korrosionsauslösenden Grenzwert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deutscher Beton-Verein: Merkblatt Betondeckung und Bewehrung (Fassung 2002). Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, 2002</li> <li>- Heft 401 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Beuth-Verlag, Berlin, 1989.</li> </ul>
<p>Visuelle Aufnahme, Kartierung von Rissen und Hohl- bzw. Fehlstellen (grundsätzlich erforderlich)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beeinflussung des Potentialbildes durch Einbauteile o.Ä.</li> <li>- Berücksichtigung des Einflusses von Hohlstellen und Rissen auf die gemessenen Potentiale bzw. Gradienten</li> <li>- Gefahr des Verlusts der elektrolytischen Leitfähigkeit im Bereich von Hohlstellen/Ablösungen</li> <li>- Abschätzung des Schädigungsgrads bei Rissbildung bzw. Abplatzungen infolge von Bewehrungskorrosion</li> <li>- Auffinden von Rissen als mögliche Korrosionsbereiche, die durch Potentialfeldmessungen u.U. nicht erkannt werden können (bei großen Betondeckungen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie: „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Teil 1 – 4. Berlin, Beuth-Verlag, Ausgabe 2001.</li> </ul>



## 6 Anwendungs- und Nachweisgrenzen

Die an der Oberfläche gemessenen Potentialwerte können je nach den vorliegenden Randbedingungen vom tatsächlichen Potential an der Oberfläche des Bewehrungsstahles abweichen. Bei üblichen Betondeckungen zwischen 3 und 4 cm kann unter Beachtung der Hinweise zur Durchführung der Messung unter Abschnitt 4 in der Regel davon ausgegangen werden, dass die an der Oberfläche gemessenen Potentiale ein gutes Bild über das tatsächliche Potential der Bewehrung liefern. Die Wirkungstiefe der Potentialmessung liegt bei etwa 20 cm. Allerdings nimmt die Empfindlichkeit der Messung bezüglich der Lokalisierung kleiner Korrosionsstellen mit zunehmender Betondeckung ab. Es können erhebliche Verzerrungen des Potentialfeldes auftreten, die eine Auswertung der Messungen erschweren.

Es lassen sich aktive Oberflächenbereiche der Bewehrung mit Ausdehnungen ab etwa 0,25 cm<sup>2</sup> sicher detektieren, wenn ein Messraster von 25 x 25 cm oder kleiner eingehalten wird.

Im Regelfall erfolgt die Potentialmessung auf der Bauteiloberfläche, die der potentiell geschädigten Bewehrung am nächsten liegt. In Ausnahmefällen kann die Potentialmessung von der gegenüberliegenden Bauteiloberfläche durchgeführt werden [4].

Die Aussagefähigkeit der Potentialmessung wird durch den elektrischen Widerstand der Betondeckung begrenzt. Bei hohen Widerständen kann es zu deutlichen Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Potential der Bewehrung und dem gemessenen Potential kommen. Dabei reicht es schon aus, wenn der unmittelbare Oberflächenbereich (z. B. 0,5 bis 1 cm Tiefe) stark ausgetrocknet ist. Wird eine solche Oberfläche befeuchtet, werden nicht selten Änderungen im Messsignal von mehr als 100 mV festgestellt [2]. Die Potentialänderung erfolgt dabei nicht plötzlich, sondern über einen Zeitraum von einigen Minuten (siehe auch Abschnitt 4).

Das Freie Korrosionspotential von Stahl in Beton wird durch unterschiedliche Belüftung beeinflusst. In langfristig durchfeuchtetem Beton werden deutlich negativere Potentiale gemessen. Diese sind nicht auf Korrosionserscheinungen, sondern auf den behinderten Sauerstoffzutritt zurückzuführen (siehe auch Abschnitt 4).

Die Potentialmessungen erlauben keine Prognose zum Schädigungsgrad (Querschnittsminderung) an der Bewehrung. Hierzu sind in jedem Fall anhand der ermittelten Potentialverteilung ausgewählte Inspektionsstellen zu öffnen und der Zustand der Bewehrung durch Inaugenscheinnahme zu bewerten. Zum Zeitpunkt der Messung nicht aktiv korrodierende Bewehrungsbereiche werden bei der Potentialmessung nicht erkannt, selbst wenn bereits Querschnittsverluste vorhanden sind.

## 7 Qualifikation des Prüfpersonals

Die erforderliche Sachkunde zur Durchführung und Bewertung von Potentialmessungen ist durch eine einschlägige Ausbildung auf dem Gebiet Korrosion/ Korrosionsschutz nachzuweisen. Sie kann auch durch Teilnahme an entsprechenden Schulungen als Zusatzqualifikation erworben werden. Die erforderliche Sachkunde ist bei der Angebotsabgabe nachzuweisen.

Die Messungen selbst können unter Anleitung eines verantwortlichen Fachmannes auch von Prüfpersonal ohne Kenntnisse der elektrochemischen Zusammenhänge durchgeführt werden. Die Durchführung der Messungen ist zu überwachen. Art und Umfang der notwendigen ergänzenden Untersuchungen müssen ebenfalls durch eine sachkundige Person festgelegt werden. Dieser obliegt dann auch die zusammenfassende Aussage zur Einschätzung des Bewehrungszustandes und die Prognose zur weiteren Entwicklung des Korrosionsgeschehens. Die Übergabe von Potentialkartierungen ohne Interpretation der Messergebnisse an den Auftraggeber ist unzulässig.

## 8 Literatur

- [1] Merkblatt B2 Bewehrungsnachweis, FA ZfP im Bauwesen, DGZfP, Berlin, 1990
- [2] Y. Schiegg, M. Büchler, M. Brem: Potential mapping technique for the detection of corrosion in reinforced concrete structures: Investigation of parameters influencing the measurement and determination of the reliability of the method. EUROCORR 2007 Freiburg, Germany, 2007, paper 1071
- [3] J. Gulikers: Development of a calculation procedure for the statistical interpretation of the results of potential mapping for reinforced concrete structures. EUROCORR 2007 Freiburg, Germany, 2007, paper 1364
- [4] C. Sodeikat, C. Gehlen, P. Schießl: Auffinden von Bewehrungskorrosion mit Hilfe der Potentialfeldmessung. Beton- und Stahlbetonbau 97, 2002, S.437 – 444

## 9 Weiterführende Literatur

American Society for Testing and Materials: ASTM C876-91 (Reapproved 1999): Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel, Concrete American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Philadelphia, USA (1991).

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA: Durchführung und Interpretation der Potentialmessung an Stahlbetonbauten. Merkblatt SIA 2006, Ausgabe Februar 1993.

RILEM TC 154 EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion – Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures. Materials and Structures 36, 2003, S.461 – 471

Mietz, J. und A. Burkert: Elektrochemische Verfahren zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004), Kap. C1, 3 Materialeigenschaften, Abschnitt 3.1, S. 379 – 384.