Elektrochemische Untersuchung der Korrosion von Armierungsstahl in Beton

Autor(en): **Elsener, Bernhard / Böhni, Hans**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 14

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75440

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

telt worden (in Klammern die Zahl der Messwerte und das Alter der Probekörper):

Sandgestrahlter Beton
(32 Stück, 29–45 Tage) 0,7–3,3 N/mm²
(46 Stück, 180 Tage) 0,5–3,5 N/mm²

Schalungsroher Beton
(29 Stück, 6,5 Jahre) 1,1–6,3 N/mm²

Sandstein
(5 Stück, 28 Tage) 0,2 N/mm²

Kalkstein der Breggia-Schlucht
(9 Stück, 34 Tage) 0,6–1,1 N/mm²
(6 Stück, 78 Tage) 0,6–1,2 N/mm²

Zweiglimmergneis
(14 Stück, 30 Tage) 0,9–1,8 N/mm²

Rotondo-Granit
(4 Stück, 30 Tage) 0,1–0,4 N/mm²
(1 Stück, 2 Jahre) > 1,5 N/mm²

Granitgneis
(5 Stück, 1,5 Jahre) > 1 N/mm²

Biotit-Plagioklasgneis
(19 Stück, 2–3 Jahre) 0,5–2,0 N/mm²

Adresse des Verfassers: *P. Teichert*, E. Laich SA, 6671 Avegno.

Der zweite Teil dieses Beitrages folgt in Heft Nr. 16

Elektrochemische Untersuchung der Korrosion von Armierungsstahl in Beton

Von Bernhard Elsener und Hans Böhni, Zürich

Die ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit von Stahl in Beton ist seit mehr als hundert Jahren bekannt. Sie beruht auf einer dünnen oxidischen Schutzschicht, der Passivschicht, die der Stahl im stark alkalischen Milieu des Porenwassers im abgebundenen Zement bildet. Die Betonüberdeckung ist für den Korrosionsschutz der Armierung insofern von Bedeutung, als sie das Eindringen aggressiver Stoffe verhindern soll. Korrosionsschäden an der Armierung werden durch Alterung (Karbonatisierung) des Betons und/oder durch Chlorideinfluss hervorgerufen. Währenddem Abbindebeschleuniger heute keine Chloride mehr enthalten sollten, lässt der riesige Einsatz von Streusalz für den Winterdienst das Problem der Korrosion der Armierung – nicht erst seit den spektakulär bekanntgewordenen Schadensfällen – akut werden. Das Ausmass der Schäden lässt sich nur schwer abschätzen. In der BRD geht von 400 Mio DM jährlicher Brückenerhaltungskosten im Bereich der Fernstrassen [1] vermutlich ein beträchtlicher Anteil zu Lasten der Tausalze. In den USA werden die jährlichen Kosten an Strassen und Brücken, die den Tausalzen angelastet werden müssen, auf 200–500 Mio US $ beziffert [2].

Anstrengungen zur Beurteilung der Korrosionsgefährdung der Armierung in Stahlbeton als Funktion des Chloridgehalts sind daher dringend. Der in dieser Arbeit beschriebene Weg über elektrochemische Untersuchungsmethoden ermöglicht eine zerstörungsfreie Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit an Versuchsproben, eröffnet aber gleichzeitig eine Möglichkeit zur periodischen Überwachung besonders gefährdeter Konstruktionen und damit eine Früherkennung von Korrosionsschäden.

Grundlagen

Bekanntlich beginnt Armierungsstahl an der Atmosphäre (genügend Feuchtigkeit vorausgesetzt) spontan zu korrodieren, er rostet. Derselbe Stahl in Beton eingebettet korrodiert nicht, da beim Abbinden und Erhärten von Portlandzement Kalziumhydroxid, $Ca(OH)_2$ entsteht, im Porenwasser des Betons bildet sich eine stark alkalische Lösung mit *pH*-Werten > 12,5 [3]. In dieser Umgebung ist der Stahl durch eine dünne oxidische Deckschicht (Passivschicht) vor Korrosion geschützt. Die Betonüberdeckung bildet einen sekundären, mechanischen Schutz gegen Verletzungen der Passivschicht und verhindert – zumindest bei dichtem Beton – das Eindringen von aggressiven Stoffen bis zur Armierung.

Ursachen der Korrosion

Zwei Gründe können dennoch zum Rosten des Armierungsstahls in Beton führen:

- Der für den Korrosionsschutz des Stahls verantwortliche hohe *pH*-Wert der Porenflüssigkeit geht verloren. Das kann durch starkes Auswaschen des Betons, vor allem aber durch die Reaktion mit Kohlendioxid aus der Luft geschehen:

$$(1)\quad Ca(OH)_2 + CO_2 \xrightarrow{H_2O} CaCO_3 + H_2O$$

  Der Beton wird *karbonatisiert*, der *pH*-Wert im karbonatisierten Bereich ist < 9. Wenn die karbonatisierte Zone die Armierung erreicht hat, so ist dort die Passivschicht nicht mehr stabil, und es besteht Korrosionsgefahr. Der Rest der Armierung in den intakten Bereichen wird nicht angegriffen (Bild 1). Bei dichtem Beton führt die Karbonatisierung nur bei sehr alten Bauwerken zu Korrosionsschäden, da die Eindringtiefe der karbonatisierten Schicht einem $\sqrt{t}$-Gesetz gehorcht [4, 5].
- Aggressive Stoffe – vor allem Chloridionen – dringen bis zur Armierung vor und zerstören dort durch chemischen Angriff die Passivschicht *auch bei hohen pH-Werten*. Die Auflösung des Stahls erfolgt dann nur an solchen Stellen. Die Chloridionen können dabei von Zusatzmitteln, aus Zuschlagsmaterialien, vom Anmachwasser usw. stammen, mehrheitlich werden sie jedoch aus der Umgebung (Streusalzeinsatz) in den Beton gelangen.

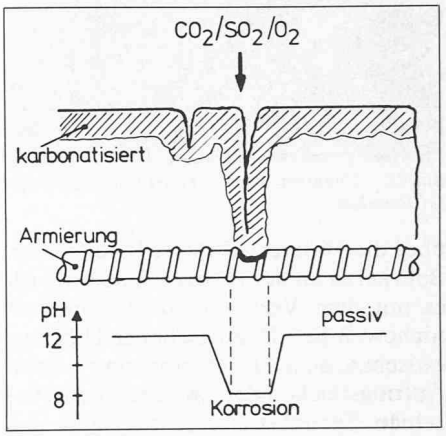


Bild 1. Lokale Korrosion des Armierungsstahls als Folge der pH-Absenkung in teilweise karbonatisiertem Beton

Der Zeitpunkt, in dem die Korrosion einsetzt, hängt wesentlich von der Dikke und der Qualität der Betonüberdekkung und von der Chloridkonzentration an der Oberfläche ab. Risse und Poren erleichtern die Karbonatisierung und das Eindringen der Chloridionen und verkürzen somit die Zeit bis zum Auftreten von Korrosionsschäden.

Mechanismus der Korrosion

Die Korrosion von Stahl im Beton ist ein elektrochemischer Vorgang, in dem der feuchte Beton den Elektrolyten bildet. Die Auflösung des Armierungsstahls kann durch die elektrochemische Reaktion

$$(2)\quad Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e^- \qquad \textbf{Anode}$$

dargestellt werden, d. h. ein Eisen*atom* an der Stahloberfläche wird in ein Metall*ion* überführt, das gelöst oder als feste Verbindung (z.B. Oxid) vorliegen kann. Die freiwerdenden Elektronen

werden ans Metall abgegeben und müssen aus Elektroneutralitätsgründen von einem in der Umgebung vorkommenden Oxidationsmittel (in der Praxis meist Sauerstoff) aufgenommen werden:

(3) $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \longrightarrow 2\,OH^-$ **Kathode**

Die gesamte Korrosionsreaktion besteht aus einer anodischen und kathodischen Teilreaktion (auch als Oxidation und Reduktion bezeichnet), die gleichzeitig ablaufen müssen. Anode und Kathode haben unterschiedliche Potentiale, und da sowohl das Metall als auch der feuchte Beton elektrische Leiter sind, bilden die beiden Teilreaktionen zusammen ein galvanisches Element (Bild 2). Der in diesem Element fliessende Strom ist nach Gleichung (2) direkt proportional zum Masseverlust und damit ein Mass für die *Korrosionsgeschwindigkeit*.

Liegen gleichmässige Angriffsbedingungen vor (z.B. an der Atmosphäre), so laufen anodische (Gleichung 2) und kathodische Teilreaktion (Gleichung 3) auf denselben Stellen und überall auf der Oberfläche ab. Die nach

(4) $Fe + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 \longrightarrow$ Rost

entstehenden Korrosionsprodukte (Rost) bedecken die ganze Oberfläche und führen unter Umständen zu einer Verlangsamung der Korrosion. Im *Beton* sind die Angriffsverhältnisse komplizierter: Konstruktive, strukturelle und chemische Inhomogenitäten (z.B. teilweise Karbonatisierung an Rissen) führen zur örtlichen Trennung von Anode und Kathode, es entsteht ein Makroelement (Bild 1). Die Metallauflösung ist dann an die unedlen Zonen (karbonatisierte Bereiche, lokal hohe Chloridgehalte usw.) fixiert, die kathodische Teilreaktion läuft auf den noch intakten (passiven) Bereichen ab. In diesem Fall

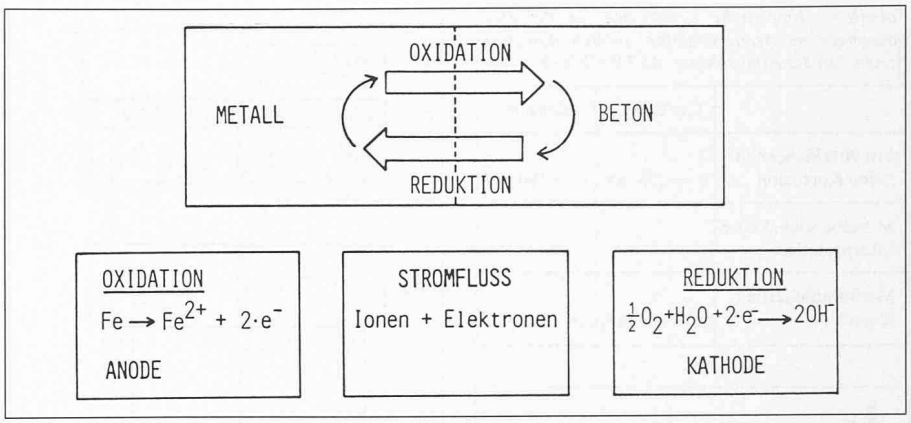


Bild 2. Korrosion von Armierungsstahl in Beton als galvanisches Element (schematisch)

wird die Korrosionsgeschwindigkeit gegenüber dem Fall an der Atmosphäre (bei gleichem Sauerstoffzutritt) stark erhöht.

Praktisch handelt es sich nicht um ganz so einfache chemische Reaktionen. Aus Gleichung (4) ist aber ersichtlich, dass die *Korrosionsreaktion das Vorhandensein von Wasser und Sauerstoff* voraussetzt – ein dichter Beton wird den Zutritt von Sauerstoff stark erschweren und damit die Korrosionsgeschwindigkeit herabsetzen.

Die elektrochemische Natur der Korrosion und die damit verbundenen Phänomene lassen sich zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens der Armierung anwenden.

Die *Potentialmessung* an der Oberfläche wird eingesetzt, um korrosionsgefährdete Stellen (z.B. in Fahrbahnplatten von Brücken) zu lokalisieren (s. Kap. 2).

Die *Polarisationswiderstandsmessung* erlaubt die Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit auf elektrochemischem Weg, also zerstörungsfrei (s. Kap. 3).

Im folgenden werden die beiden Verfahren und insbesondere die am Institut angewandte Messmethode zur Bestimmung des Polarisationswiderstands näher erläutert.

Potentialfeldmessung zur Suche nach Korrosionsstellen

In den Vereinigten Staaten von Amerika wird diese Methode seit etwa 1970 zur zerstörungsfreien Ortung von Stellen aktiver Korrosion der Armierung vor allem auf Brücken eingesetzt (ASTM Standard C876-80) [6, 7]. Entsprechende Verfahren und Geräte werden heute auch in Europa angeboten. Was steckt dahinter?

Das Korrosionspotential

Die anodischen und kathodischen *Teil*reaktionen eines Korrosionsprozesses lassen sich (ähnlich der Kennlinie von elektrischen Bauteilen) durch *Stromdichte/Potentialkurven* charakterisieren. In Bild 3 ist eine intakte, passive Stahloberfläche einer (unter Chlorideinfluss) korrodierenden Stelle gegenübergestellt, die kathodische Teilstromkurve sei in beiden Fällen identisch. Ein stabiler Zustand in einem Korrosionssystem kann sich (aus Elektroneutralitätsgründen) nur dort einstellen, wo die kathodische Teilreaktion gleich viel Elektronen aufbraucht wie bei der Metallauflösung freiwerden – d. h. die Stromdichten i_a und i_k müssen betragsmässig gleich gross sein. Dieser Punkt – das *Korrosionspotential* ε_{korr} – lässt sich

Bild 3. Korrosionspotentiale von Armierungsstahl in Beton im Passivzustand und bei Korrosion unter Chlorideinfluss

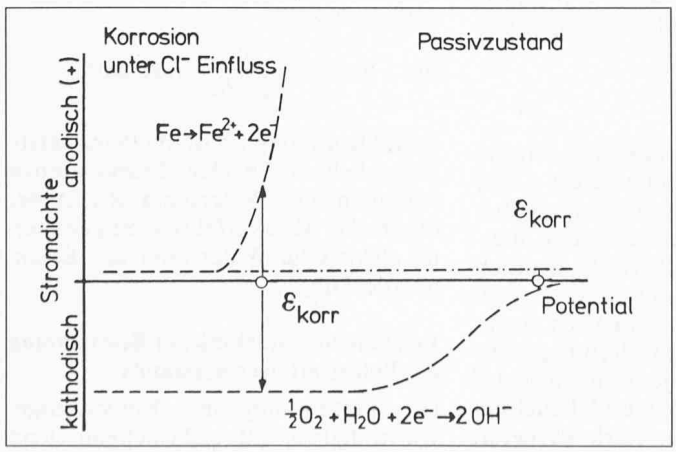


Bild 4. Potentialmessung auf der Betonoberfläche zum Auffinden korrodierender Zonen (schematisch)

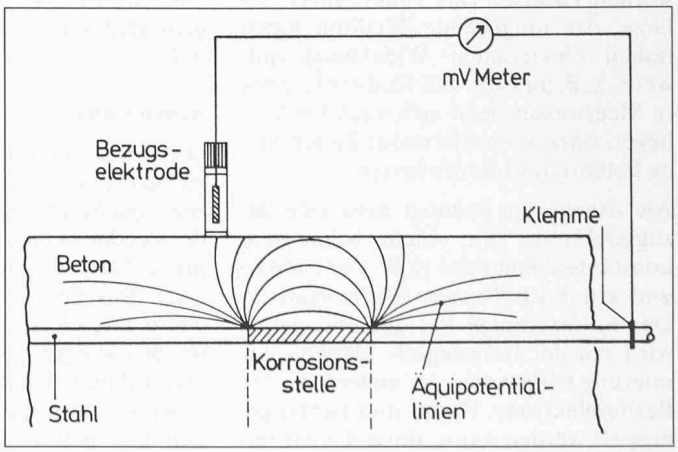


Tabelle 1. Empirische Grenzwerte für Potentialmessungen an Armierungsstahl in Betonkonstruktionen (an der Atmosphäre). ASTM C876-80

	$Cu/CuSO_4$	Kalomel
Mit 90% Sicherheit keine Korrosion	$\varepsilon > -250$ mV	$\varepsilon > -190$ mV
Mittelbereich, keine Interpretation		
Mit 90% Sicherheit Korrosion	$\varepsilon < -350$ mV	$\varepsilon < -290$ mV

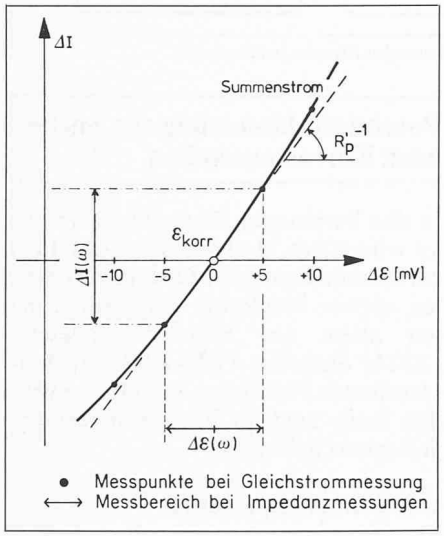
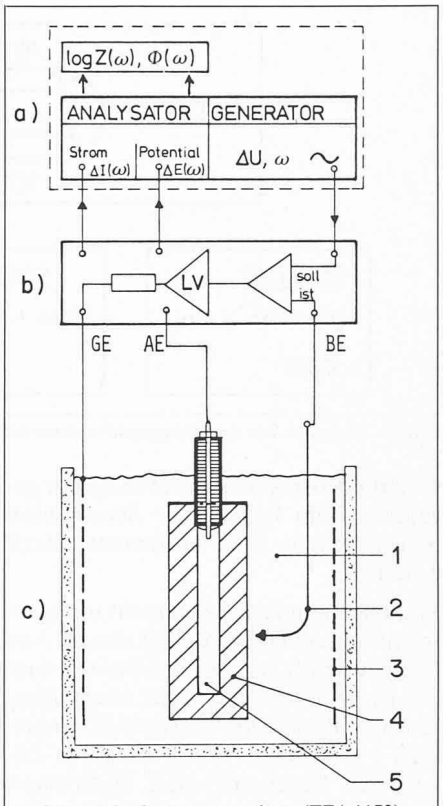


Bild 5. Polarisationswiderstandsmessung (s. Text)



a) Transfer frequency analyser (TFA 1172)
b) Potentiostat (ECI 1186)
c) Elektrochemische Zelle
1. Versuchslösung
2. Referenzelektrode
3. Gegenelektrode
4. Beton
5. Stahleinlage

Bild 6 (rechts). Experimentelle Anordnung zur Impedanzmessung von Stahl in Mörtel/Beton

aus Bild 3 leicht graphisch ermitteln. In der Korrosionsprüfung ist die Lage des Korrosionspotentials ein erster Hinweis auf das Korrosionsverhalten.

Die Potentialfeldmessung

Die Technik der Potentialfeldmessung an armiertem Beton nützt nun genau diese Verhältnisse aus: Da sich korrodierende Stellen von intakten, passiven Bereichen durch ihre elektrochemischen Potentiale unterscheiden, können durch Messung der an der Oberfläche auftretenden Potentialunterschiede die korrodierenden Bereiche gefunden werden (Bild 4). Das funktioniert, solange das umgebende Medium einen hohen elektrischen Widerstand aufweist, z. B. an Luft. Bei Konstruktionen in Meerwasser liesse sich auch bei Vorliegen stark korrodierender Zonen keine Potentialdifferenz messen.

Als *Ausrüstung* benötigt man eine Bezugselektrode mit einem bekannten, konstanten Potential (z.B. $Cu/CuSO_4$) und ein hochohmiges Millivoltmeter. Der niederohmige Pol des Messgeräts wird mit der freigelegten, blanken Armierung verbunden, der andere mit der Bezugselektrode. Damit nun richtig gemessen werden kann, muss der Stromkreis geschlossen sein, d. h. der Beton muss oberflächlich angefeuchtet werden, und die Elektrode wird mit einem feuchten Schwamm als Unterlage auf die zu messende Stelle aufgepresst. Die gesamte Ausrüstung wird heute komplett angeboten.

Die *Interpretation* der Messresultate wird nach dem ASTM Standard mit empirisch ermittelten Grenzwerten (siehe Tab. 1) durchgeführt. Bei Potentialen positiver als -250 mV ist der Armierungsstahl mit grosser Sicherheit intakt, bei Potentialen negativer als -350 mV ist starke Korrosion zu erwarten. Im Mittelbereich - der sehr häufig gemessen wird - ist keine Aussage möglich.

Beurteilung

Die Potentialmesstechnik ist - obwohl sie quantitative Resultate liefert - eine rein *qualitative* Untersuchungsmethode, was der grosse, nicht eindeutig interpretierbare Potentialbereich deutlich zeigt. Das Festsetzen absoluter Grenzwerte wird oft als problematisch erachtet, da die gegen die Armierung gemessenen Potentialwerte je nach Dicke der Überdeckung, Qualität und Feuchtigkeit des Betons usw. stark variieren können. Ein relativer Vergleich der an der Oberfläche gemessenen Potentiale erscheint sinnvoller [8, 9]. Aussagen über die *Geschwindigkeit der Korrosion* lassen sich aus Potentialmessungen prinzipiell nicht machen.

Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit

Die sicherste Methode zur Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit - visuelle Beurteilung und Messen des Gewichtsverlusts - ist bei Armierungsstahl in Beton destruktiv und erfordert erheblichen Zeit- und Materialaufwand. Die elektrochemische Technik - Messen des Polarisationswiderstands - ist demgegenüber zerstörungsfrei, rasch durchzuführen und liefert zudem noch Informationen über den zeitlichen Verlauf der Korrosionsgeschwindigkeit. Die aus elektrochemischen Messungen ermittelte Korrosionsstromdichte (mA/cm^2) lässt sich in Gewichtsverlust ($g/m^2 \cdot Tag$) oder Metallabtrag (μm/Jahr) umrechnen, der direkt die Querschnittsreduktion des Armierungsstahls angibt.

Der Polarisationswiderstand

In Bild 3 wurde das Korrosionspotential aus den beiden Teilstromkurven bestimmt. Die bei ε_{korr} fliessende Korrosionsstromdichte i_{korr} ist der Messung nicht direkt zugänglich, da von aussen kein Strom ($i_s = 0$) messbar ist. Dagegen ist die Neigung der Stromspannungskurve i_s experimentell messbar (Bild 5):

$$(5) \qquad R_p = \left(\frac{d\varepsilon}{di_s}\right)_{\varepsilon_{korr}} \simeq \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta i_s}$$

Der *Polarisationswiderstand* R_p' ist definitionsgemäss die Neigung der Stromspannungskurve, vgl. Gleichung (5). Er wird vom Verlauf beider Teilkurven beeinflusst.

Zwischen dem Polarisationswiderstand R_p' und der Korrosionsgeschwindigkeit i_{korr} besteht folgender (herleitbarer) *Zusammenhang:*

$$(6) \qquad i_{korr} = \frac{B}{R_p' - R_\Omega} \; [mA/cm^2]$$

In der Konstanten B ist die Potentialabhängigkeit der beiden Teilreaktionen enthalten, der Widerstand R_Ω ist der durch das Messverfahren mitgemessene elektrische Widerstand der Betonüberdeckung.

Impedanzmesstechnik zur Bestimmung des Polarisationswiderstands

Die Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit auf elektrochemischem

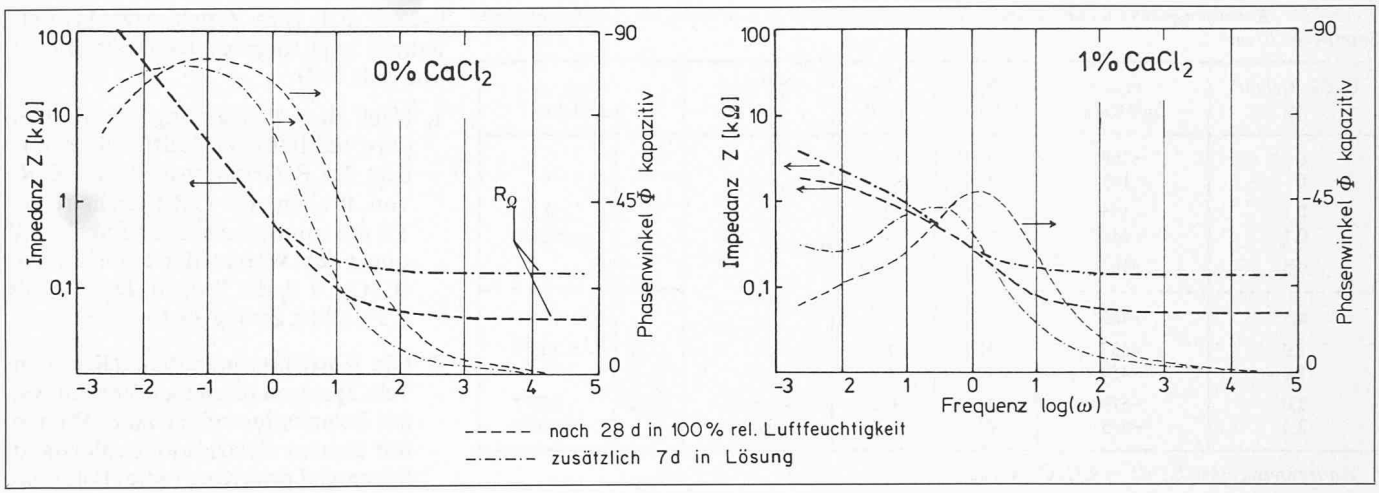


Bild 7. Impedanzmessungen an Armierungsstahl in Beton bei 0 und 1% $CaCl_2$ Zugabe (s. Text)

Weg basiert auf der Bestimmung des Polarisationswiderstands nach Gleichung (5). Dazu sind prinzipiell Gleich- und Wechselstrommethoden geeignet [10–16]. Bei *Gleichstrommessungen* [11, 14] wird ein konstantes Potential von +/− 10 mV vom Korrosionspotential aufgeprägt und die resultierende Stromantwort ΔI gemessen (Bild 5). Im Unterschied dazu wird bei der Wechselspannungsmethode (Impedanzmesstechnik) [13, 15, 16] ein um ε_{korr} alternierendes Potential benützt:

$$(7) \quad \varepsilon(\omega) = \varepsilon_{korr} + \Delta\varepsilon(\omega)$$

Die Potentialänderung $\Delta\varepsilon(\omega)$ erfolgt sinusförmig für verschiedene Frequenzen $f(\omega = 2\pi f)$ im Bereich von 10 kHz bis etwa 1 mHz. Die resultierende Stromantwort $\Delta I(\omega)$ (siehe Bild 5) hat dieselbe Frequenz wie die Potentialänderung, i.a. aber eine Phasenverschiebung Φ. Der Quotient

$$(8) \quad Z(\omega) = \frac{\Delta\varepsilon(\omega)}{\Delta I(\omega)}$$

$$(9) \quad = \left| \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta I} \right| \cdot \exp(-j\,\Phi)$$

ist die *Impedanz* des Systems bei der Frequenz ω. Sie lässt sich (für einfache Korrosionssysteme) schreiben als

$$(10) \quad Z(\omega) = R_\Omega + \frac{R_p}{1 + \omega\, R_p \cdot C}$$

Für hohe Frequenzen resultiert daraus (vgl. Bild 7)

$$(11) \quad Z(\omega \to \infty) = R_\Omega \quad [\Omega]$$

der ohmsche Widerstand R_Ω, für tiefe Frequenzen der Polarisationswiderstand R_p'

$$(12) \quad Z(\omega \to 0) = R_p' = R_\Omega + R_p \quad [\Omega]$$

der auch aus Gleichstrommessungen erhalten wird. Für das System Beton/Armierungsstahl ist die Impedanzmesstechnik vor allem aus zwei Gründen vorzuziehen:

1. Die Betonüberdeckung kann bei grosser Dicke einen sehr hohen elektrischen Widerstand R_Ω aufweisen, der die Korrosionsgeschwindigkeit nach Gleichung (6) unzulässig verfälscht und zu klein erscheinen lässt. Dieser Widerstand R_Ω wird, wie oben gezeigt wurde, aus Impedanzmessungen klar mitgemessen, während er bei Gleichstrommessungen unerkannt bleibt.
2. Impedanzmessungen liefern neben dem Polarisationswiderstand ein ganzes Frequenzspektrum. Daraus können Informationen über schnelle, vorgelagerte Teilreaktionen erhalten werden. Impedanzmessungen erlauben damit eine bessere Beurteilung des Korrosionsverhaltens.

Im folgenden wird das am Institut angewandte experimentelle Vorgehen beschrieben.

Experimentelle Durchführung

Die gesamte experimentelle Anordnung ist in Bild 6 schematisch dargestellt.

- Die *Probekörper* bestehen aus einem Stahlstab mit «Beton»-Ummantelung (Zusammensetzung siehe Tab. 2). Die exponierte Stahlfläche beträgt etwa 10 cm². Sie werden in speziellen PVC-Formen hergestellt und darin 24 Std. ausgehärtet. Um Spaltkorrosion zu vermeiden, wurde ein PVC-Röhrchen auf den Stahlstab aufgepresst. Als Zusatz wurde Calziumchlorid ($CaCl_2$) bis 2% (bezogen auf das Zementgewicht) verwendet, um unterschiedliche Chloridgehalte zu simulieren.
- Die Probekörper (= *Arbeitselektrode*) tauchen zur Messung in eine elektrochemische Zelle mit der Versuchslösung (Calziumhydroxid mit demselben Chloridgehalt wie die Probekörper). Zur Potentialmessung benötigt man eine *Bezugselektrode* (Kalomel- oder Ag/AgCl) und ein hochohmiges ($R_i > 10^{11}\,\Omega$) Voltmeter. Mit dieser Anordnung lassen sich bereits Korrosionspotentiale messen. Zur Bestimmung des Polarisationswiderstands müssen der Probe von ε_{korr} abweichende Potentiale aufgezwungen werden, d.h. es muss ein Strom fliessen. Zur Stromeinspeisung dient die *Gegenelektrode* (zylindrisches Netz aus nichtrostendem Stahl).
- Zur Regelung eines vorgegebenen Potentials dienen die sog. *Potentiostaten* (potential control amplifier), das Prinzipschaltbild ist in Bild 5 dargestellt. Das IST-Potential der Arbeitselektrode wird über die Bezugselektrode laufend gemessen und nach einer Impedanzwandlerstufe (V1) mit dem eingestellten SOLL-Potential verglichen (Differenzverstärker V2). Kleinste Abweichungen werden (mit einem Verstärkungsfaktor von 10^6) durch Änderungen im Stromfluss momentan korrigiert.
- Das Kernstück der Impedanzmesstechnik ist der automatische *Frequenzganganalysator* (TFA 1172, Solartron, Schlumberger), bestehend aus einem *Generator* (erzeugt die Potentialänderung $\Delta\varepsilon[\omega]$), dem digitalen *Analysator* (Cross Correlation) und einer Rechen- bzw. Anzeigeeinheit, die direkt den Betrag der Impedanz $Z(\omega)$ und den Phasenwinkel $\Phi(\omega)$ (siehe Gleichung 9) anzeigt. Der eingesetzte TFA 1172 erlaubt automatisches Messen und Registrieren eines ganzen Frequenzspektrums. Die Messdaten können über IEEE-Bus auf einem Rechner abgespeichert und weiter ausgewertet werden.

Tabelle 2. Zusammensetzung der Mörtelproben

Zement (PC Typ I) C_3A 9,8%	250 g
Norm*sand* (0–2 mm)	750 g
Wasser	125 g
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0–2%
W/Z Faktor 0,5 Calziumchlorid pro Zementgewicht	

Resultate und Diskussion

Eine erste Versuchsserie mit Mörtelproben auf PC-Basis (Zusammensetzung vgl. Tab. 2), die Chloridgehalte von

Tabelle 3. Korrosionspotentiale und Polarisationswiderstand nach 28 d in 100% rel. Luftfeuchtigkeit. Stahlfläche 10 cm²

$CaCl_2$-Gehalt* [%]	ε_{korr} [mV Kal.]	R_Ω [Ω]	R_p [kΩ]	Diffusion	v_{korr} [µm/Jahr]	
0	−169	49	> 400	-		
0	−165	42	> 550	-		
0,1	−155	60	> 500	-	passiv	< 0,24 µm/Jahr
0,1	−151	52	> 620	-		
0,5	−162	44	> 300	-		
0,5	−342	42	2	-		> 150**
1,0	−457	41	1	-	lokale Korrosion	> 300**
1,0	−450	42	1	-		
2,0	−579	47	0,5	schwach		> 600**
2,0	−545	43	0,9	schwach		> 300**

* Umrechnung in % Cl^-: $Cl^- \simeq \frac{1}{2}\, CaCl_2$-Gehalt

** Bei korrodierten Flächen <1 cm² sind höhere, im dauernd durchnässten Beton kleinere Korrosionsgeschwindigkeiten zu erwarten.

Tabelle 4. Korrosionspotentiale und Polarisationswiderstand derselben Proben wie Tab. 3. Zusätzlich 7 d in $Ca(OH)_2$-Lösung ausgelagert. Stahlfläche 10 cm²

$CaCl_2$-Gehalt* [%]	ε_{korr} [mV Kal.]	R_Ω [Ω]	R_p [kΩ]	Diffusion	v_{korr} [µm/Jahr]	
0	−160	146	> 300	-		
0	−161	128	> 600	-		
0,1	−149	155	> 540	-	passiv	< 0,24 µm/Jahr
0,1	−159	148	> 580	-		
0,5	−155	143	> 550	-		
0,5	−216	147	20	schwach		> 15**
1,0	−430	117	4	↓		> 75**
1,0	−613	124	2		lokale Korrosion	> 150**
2,0	−710	103	0,4	stark		> 600**
2,0	−522	93	1,8	stark		> 300**

* Umrechnung in % Cl^-: $Cl^- \simeq \frac{1}{2}\, CaCl_2$-Gehalt

** Bei korrodierenden Flächen <1 cm² sind höhere, im dauernd durchnässten Beton kleinere Korrosionsgeschwindigkeiten zu erwarten.

Literaturnachweis

[1] *Weber, D.:* «Untersuchungen zur Einwirkung von Tausalzen sowie zur Karbonatisierung an Bauwerken der Berliner Stadtautobahn». Int. Kolloquium «Werkstoffwissenschaften und Bausanierung», TAE Esslingen, Sept. 1983. Herausgeber F.H. Wittmann, EPFL Lausanne

[2] *Slater, J.E.:* «Corrosion/78». Int. Congress on Protection and Performance of Materials. Houston 1978. Paper Nr. 70

[3] Cementbulletin. Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweiz. Zementindustrie (TFB), Mai 1979

[4] *Tuuti, K.:* «Corrosion of Steel in Concrete». Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm 1982

[5] *Rösli, A.:* «Frost und Tausalzbeständigkeit von Beton». Forschungsprojekt 9/78. Strassenbauforschung des Eidg. Dep. des Innern, Bern. Schlussbericht März 1983

[6] *Van Daveer:* «Techniques for evaluating reinforced Concrete Bridge Decks». ACI Journal (1975) 697–704

[7] *Stratfull, R.F.:* «The Corrosion of Steel in a Reinforced Concrete Bridge». Corrosion NACE *13*(1957) 173t–178t

[8] *Tritthart, J./Geymayer, H.:* «Zerstörungsfreies Auffinden von Korrosionszonen der Bewehrung». Beton *31*(1981) 237–240

[9] *Geymayer, H.:* «Zur Auffindung aktiver Stahlkorrosion in Stahlbeton und Spannbetonbauwerken, insbesondere Brücken». Österr. Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift *22*(1979) 55–57

[10] *Böhni, H./Stalder, F.:* «Korrosionsprobleme erdvergrabener Metalle». Schweiz. Ingenieur und Architekt 33/34(1981) 703–710

[11] *Locke, C.E./Siman, A.:* «Electrochemistry of Reinforcing Steel in Salt-Contaminated Concrete». ASTM STP 713, Tonini and Gaids eds. (1980) pp. 3–16

[12] *Slater, J.E.:* «Constraints on Measurement Techniques for Corrosion of Steel in Concrete». Corrosion/78, Int. Congress, Houston, März 1978, Paper Nr. 121

[13] *Elsener, B.:* «Moderne elektrochemische Methoden der Korrosionsforschung». Chimia *37*(1983)153–159

[14] *Andrade, C./Gonzalez, J.A.:* «Quantitative Measurements of Corrosion Rate of Reinforcing Steel in Concrete Using Polarization Measurements». Werkst. und Korrosion *29*(1978)515–519

[15] *Wenger, B./Galland, J./Azou, P.:* «Etude de la corrosion des armatures du béton par la mesure de l'impédance electrochimique». C.R. Acad.Sc., Paris, t291, Serie C (1980), p. 149–152

[16] *Dawson, J.L./Callow, L.M./Hladky:* «Electrochemical Impedance Measurements applied to the corrosion of Reinforcing Steel in Concrete». Corrosion/78. Int. Corrosion Congress, Houston (1978), Paper Nr. 125

0–2% $CaCl_2$ (pro Zementgewicht) enthalten, zeigt folgende Resultate (Bild 7 und Tab. 3, 4):

1. Nach der Auslagerung der Proben (28 d bei 100% rel. Luftfeuchtigkeit) liegt der Polarisationswiderstand R_p von Proben mit $CaCl_2$-Gehalten ≧ 1% um mindestens einen Faktor 100 unter den Werten der chloridfreien ($CaCl_2$ < 0,5%) Proben. Der Gehalt 0,5% bildet gerade die Grenze.

2. Die Korrosionspotentiale (Kol. 2 in Tab. 3) zeigen denselben Verlauf wie der Polarisationswiderstand: Proben mit hohem Polarisationswiderstand haben viel positivere (edle) Potentiale als Proben mit kleinem Polarisationswiderstand.

3. Eine weitere Lagerung in $Ca(OH)_2$-Lösung erhöht bei allen Proben den elektrischen Widerstand R_Ω der Mörtelüberdeckung. Proben mit hohen Chloridgehalten weisen – wegen der höheren Leitfähigkeit – eine schwächere Zunahme auf. Bei den Proben mit hohen $CaCl_2$-Gehalten tritt ein markanter Diffusionseffekt und eine leichte Erhöhung des Polarisationswiderstands auf.

Nach Gleichung 6 bedeutet ein kleiner Polarisationswiderstand eine hohe Korrosionsgeschwindigkeit. Bereits nach einmonatiger Lagerung an feuchter Luft korrodieren die *Proben mit 1% und 2% $CaCl_2$-Zusatz* stark. Der für die Korrosion notwendige Sauerstoff kann in dieser Zeit in genügender Menge und rasch durch die Mörtelüberdeckung diffundieren. Eine Lagerung in $Ca(OH)_2$-Lösung unterbindet die Sauerstoffzufuhr sehr stark – die Korrosionsgeschwindigkeit in den anfänglich sehr stark korrodierenden Proben wird durch Sauerstoffnachschub kontrolliert und zunehmend verlangsamt. Die Proben mit $CaCl_2$-Zusatz < 0,5% zeigen in allen Fällen eine sehr kleine Korrosionsgeschwindigkeit, die dem passiven Zustand des Armierungsstahles entspricht. Ein Diffusionseffekt ist hier nicht festzustellen.

Beurteilung

Die Resultate aus den Impedanzmessungen stimmen mit den aus Potentialmessungen erhaltenen Informationen überein. Die Impedanzspektren liefern aber die Grundlage für eine viel weitergehende und differenziertere *Beurteilung des Korrosionsverhaltens* von Armierungsstahl in Mörtel/Beton.

Der zur exakten quantitativen Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit notwendige Polarisationswiderstand R_p' (Gleichung 12) muss in zwei Fällen extrapoliert werden:

1. Die Korrosionsgeschwindigkeit ist sehr klein, d. h. der Stahl ist passiv.
2. Die Korrosionsgeschwindigkeit wird durch den Sauerstoffzutritt bestimmt, d. h. sie ist diffusionskontrolliert.

In beiden Fällen bestimmt man einen Mindestwert des Polarisationswiderstands, der sich aber auf die gesamte Probenfläche bezieht. Korrodiert die Probe nicht ganzflächig, sondern nur *lokal,* so sind die tatsächlich auftretenden Korrosionsgeschwindigkeiten wesentlich höher als die aus R_p ermittelten Werte.

Trotz dieser Schwierigkeiten in der exakten Angabe der Korrosionsgeschwindigkeit *ist es problemlos möglich* (s. Resultate), korrodierende von nicht korrodierenden Proben zu unterscheiden und die Intensität der Korrosion aus dem Wert von R_p herauszulesen.

Folgerungen – Anwendung in der Praxis

Mit der vorgestellten Impedanzmesstechnik steht eine Untersuchungsmethode zur Verfügung, die das Korrosionsverhalten von Armierungsstahl in Beton erfasst und eine detaillierte Beurteilung ermöglicht. Die Methode ist vielseitig anwendbar:

Im *Labor* wird damit die Beurteilung der Korrosionsgefährdung der Armierung durch Chloride oder andere Zusatzmittel bzw. der Wirksamkeit von Korrosionsschutzmitteln (durch Hersteller oder Anwender) ermöglicht. Genau gleich lässt sich das Korrosionsverhalten der Armierung in Reparaturmörteln (PC oder EPC-Basis) und an Grenzflächen Beton/Reparaturmörtel untersuchen.

An *Bauwerken* kann dieselbe Methode angewandt werden. Ähnlich wie bei der Potentialmesstechnik muss ein Stück der Armierung freigelegt werden, auf der Betonoberfläche wird die Bezugs- und Gegenelektrode aufgebracht. An neuen Bauwerken ist auch der Einbau von Teststäben an besonders gefährdeten Stellen denkbar.

Die im Vergleich zur Potentialmesstechnik aufwendige Ausrüstung, die Notwendigkeit der Registrierung der Daten im Felde und die Komplexität der Interpretation der Impedanzspektren erfordern ein hohes Mass an Kenntnissen und Erfahrung. Die für sinnvolle Sanierungsmassnahmen erforderlichen genauen Kenntnisse über den Zustand der Armierung in Bauwerken dürfte den Aufwand durchaus rechtfertigen.

Adresse der Verfasser: Dr. *B. Elsener* und Prof. Dr. *H. Böhni,* Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

Bausanierung und Substanzerhaltung

Diagnose, Konzept, Sanierungskontrolle

Von Bert Romer, Beinwil am See

Eine Bausanierung kann aus verschiedenen Gründen erforderlich sein. Im vorliegenden Beitrag wird das Vorgehen bei Alterung und Verwitterung aufgezeigt. Ausgehend vom erhobenen Ist-Zustand und vom neu definierten Soll-Zustand, ist ein Sanierungskonzept zu entwickeln, woraus die Sanierungsmassnahmen abzuleiten sind. Die Darlegungen sind im Sinne einer Wegleitung für Bautenschutz und Bausanierung zu verstehen, um neuzeitliche Bauten aus Beton, Putz und Mörteln im Hoch- und Tiefbau zu erhalten, aber auch um historische Bauten mit Naturstein, Mörteln, Putzen, Grobkeramik und Bemalungen zu restaurieren oder renovieren.

Einleitung

Die baulichen Vorschriften sehen vor, dass Anlagen so zu errichten, zu ändern und instand zu halten sind, dass die *öffentliche Sicherheit und Gesundheit* nicht gefährdet werden. Bauherren, Ingenieure und Architekten werden im Zusammenhang mit *dauerhafter Gebrauchsfähigkeit* der Bauwerke immer auch massgeblich wirtschaftliche Aspekte und auch kulturelle Werte beachten. Kunsthistoriker und Denkmalpfleger messen der *Erhaltung wertvoller Bausubstanz* sehr viel Bedeutung zu, denn Material und Kunsthandwerk sind nicht beliebig ersetz- und auswechselbar. Eine sachkundige Kontrolle der bestehenden Bauten sowie der Kunstdenkmäler und Monumente soll sicherstellen, dass Mängel und Fehlverhalten der Baustoffe sowie Alterung und Verwitterung rechtzeitig erkannt werden und dass mit grösstmöglicher Gewähr ein Zerfall, ein Versagen verhindert werden kann. Ein frühzeitiges Erkennen der Sanierungserfordernisse und der geeigneten baulichen Massnahmen dient der Substanzerhaltung. Entsprechende Vorschriften regeln recht weiträumig Verantwortung und richtiges Handeln im Zusammenhang mit der Gebrauchsfähigkeit und für die Erhaltung des Gebrauchszustandes. Der Beitrag geht nicht weiter auf die Vorschriften für rechtliche Belange ein.

Alle porösen Baustoffe, also alle aufgeführten Baustoffe und auch Naturstein, *altern.* Baustoffe mit einer hohen Alterungsresistenz zu verbauen war schon immer ein wesentliches Anliegen der Baukunst. Heute versteht man unter dem Begriff der Qualitätssicherung, dass Baustoffe mit entsprechender Qualität, genügender Beständigkeit, Dichtigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit die Soll-Werte und Normkonformität geprüft im Bauwerk aufweisen. Dabei wird beachtet, dass beständige und alterungsresistente *Baustoffe* sowie eine geeignete *Konstruktion* Voraussetzungen sind, um bei einer bestimmten Nutzung und Umweltbelastung eine dauerhafte Gebrauchsfähigkeit gewährleisten zu können. Konstruktive Fehler, Verformungen, Zwängungen und falsche Dimensionierung sind separat zu behandelnde Ursachen für das Versagen eines Bauwerkes. Katastrophenschäden und Brandschäden haben ihrerseits eindeutige Ursachen. Darauf wird hier weniger eingegangen. Vielmehr wird eine Wegleitung für Bautenschutz und Bausanierung derjenigen Bauten und Kunstdenkmäler beschrieben, bei denen vor allem die *Alterung und Verwitterung* der Baustoffe Sanierungsmassnahmen erforderlich machen. Selbst bei neuerstellten Bauwerken müssen Baustoffe mit ungenügender Qualität und Beständigkeit durch präventive Schutzmassnahmen gegen eine schnelle Alterung geschützt werden.

Es ist allgemein bekannt, dass viele verschiedene Einflüsse schnelleres oder gar frühzeitiges Altern der Baustoffe auslösen können, so beispielsweise:

- Fehlplanungen in der Konstruktion, Bauweise, Materialwahl, Baugrund
- Veränderung der Nutzung
- exponierende Architektur und Konstruktion
- Übernutzung
- Nutzungseinflüsse und Umwelteinflüsse, Tausalze, Schadstoffe, Feuchtigkeit