

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 105 (1987)
Heft: 19

Artikel: Lokalisierung von Korrosion im Stahlbeton: Potentialfeldmessungen - Möglichkeiten und Grenzen
Autor: Elsener, Bernhard / Böhni, Hans
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76584>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 29.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

dass an Balkonvorderkanten nach oben gerichtete Luftströmungen mit mehr als 1 m/s Geschwindigkeit auftreten können.

Mischluftströmung

Im Gegensatz zu den beiden Varianten der Verdrängungsmischströmung wird die Luft bei der Mischluftströmung von oben oder von der Seite durch spezielle Induktionsdrallauslässe oder Weitwurfdüsen eingeführt (Bild 5). Diese Auslässe haben ein hohes Induktionsvermögen. Die konditionierte Zuluft vermischt sich dadurch intensiv mit Raumluft und bildet grossvolumige Raumluftwalzen. Bei seitlich installierten Auslässen mit horizontaler Einströmung stammt ein Teil der Induktionsluft direkt aus der Aufenthaltszone, der andere aus dem oberen Raumbereich. Bei Einführung von oben wird vor allem Luft aus dem oberen Raumbereich induziert.

Unterschiedliche Wärmelasten beeinflussen die Ausbildung der Raumluftwalzen. Damit sich auch bei grossen Wärmelastschwankungen möglichst stabile Raumluft-Strömungsverhältnisse ausbilden, ist eine optimale Anordnung der Luftauslässe wichtig. Die Auslässe müssen so gestaltet sein, dass die Lufteindringtiefe der Betriebsart entsprechend (heizen, kühlen) verändert werden kann. Die Zuluft wird mit Temperaturen bis 10 K unter (min. 15 °C) bzw. 15 K über (max 35 °C) der Raumlufttemperatur eingeführt.

Für Messe- und Ausstellungshallen (Bild 6) wurde ein spezielles Mischluftsystem mit Lufteinführung von oben entwickelt. Die wesentlichen Komponenten dieses Systems sind Geräte

(Temcoils), die – je nach Raumhöhe – direkt an der Decke montiert oder von ihr herabgehängt werden. Jedes Gerät konditioniert die Luft des ihm zugeordneten Raumbereichs.

Der eingebaute Ventilator saugt an der Geräteunterseite Raumluft an. Die Luft wird an den Wärmetauschern – je nach Bedarf – erwärmt oder gekühlt und anschliessend nach zwei bzw. vier Seiten in den Raum zurückgeführt. Durch Verstellen der beweglichen Leitlamellen wird die Ausblasrichtung vorgegeben. Die erforderliche Frischluft wird von einer separaten Aussenluft-Aufbereitungsanlage zugeführt.

Mit der entsprechenden Anzahl Geräte können grosse Flächen klimatechnisch optimal nach Sektoren aufgeteilt und belüftet werden. Da jedes Gerät einen eigenen Raumregler hat, werden Wärme- bzw. Kühllasten dort zu- oder abgeführt, wo sie entstehen.

Wandbelüftungen gegen Fallluftströme

Da Grossräume oft auch besonders hoch sind, können zusätzliche Probleme entstehen: Die Raumströmung in den Randzonen wird durch die Differenz zwischen Wandoberflächen- und Raumlufttemperatur wesentlich beeinflusst. An hohen, kühlen Wänden entstehen starke, abfallende Luftströmungen. Sie beeinträchtigen den Komfort – vor allem in Wandnähe – durch zugartige Effekte.

Um störende Fallströmungen zu verhindern, werden in den Wandbereichen zusätzlich Heizeinrichtungen oder Wandbelüftungen eingebaut. Die von diesen Einrichtungen aufsteigende

warme Luft kompensiert die kühlen Fallströme. Solche Wandbelüftungen können mit warmer Abluft aus dem Raum betrieben werden. Sie erhöhen mit minimalem Energiemehraufwand den Komfort beträchtlich.

Schlussfolgerungen

Verglichen mit Büroräumen ist die Raumlufttechnik für Grossräume bedeutend komplexer. Vor allem die Beurteilung der Raumluft-Strömungsverhältnisse im Zusammenhang mit der hohen Wärmebelastung verlangt fundiertes Wissen. Durch die meist hohen Belegungsdichten wird die Raumluft in Grossräumen wesentlich stärker mit «verbrauchter» Luft (CO₂) und Geruchsstoffen belastet als in Büroräumen. Durch entsprechend fachgerechte Planung und den Einsatz geeigneter Technik werden auch in Grossräumen gute Komfortverhältnisse wie in Büroräumen erzeugt.

Im allgemeinen hat sich heute in Räumen mit fester Bestuhlung das Verfahren der Verdrängungsmischströmung durchgesetzt. Besonders hinsichtlich des Beherrschens der Strömungsverhältnisse im Aufenthaltsbereich bringt dieses Verfahren Vorteile.

Das Verfahren der Mischluftströmung wird vor allem in Räumen eingesetzt, die die baulichen Voraussetzungen für das Verdrängungsmischströmungsverfahren nicht erfüllen – das heisst z.B. variable Bestuhlung haben.

Adresse des Verfassers: W. Todt, Ing. HTL, Branchenbereichsleiter Lufttechnik, Produktbereich Heizungs- und Klimatechnik, Gebrüder Sulzer Aktiengesellschaft, 8401 Winterthur.

Lokalisierung von Korrosion im Stahlbeton

Potentialfeldmessungen – Möglichkeiten und Grenzen

Von Bernhard Elsener und Hans Böhni, Zürich

Einleitung

Überwachung und Unterhalt von Bauwerken werden in der Schweiz sehr unterschiedlich gehandhabt, obwohl die SIA-Norm 160 vorschreibt: «Die Bau-

werke sind vor der Inbetriebnahme sorgfältig zu untersuchen und nach der Inbetriebnahme durch periodische und eingehende Untersuchungen ständig zu überwachen und zu untersuchen.»

Eine sorgfältige Bauwerksinspektion ist Voraussetzung, um rechtzeitig Schäden

zu erkennen und damit Massnahmen – z.B. Sanierungsarbeiten – vorausplanen und schliesslich durchführen zu können. Rechtzeitiges Erkennen der Schäden hat darüber hinaus eine eminente wirtschaftliche Bedeutung: Das Bundesamt für Strassenbau (ASB) teilte 1986 rund 41 Mio Fr., d.h. 0,9% der Erstellungskosten, für Unterhalt und Sanierung der Nationalstrassenbrücken zu – für die Zukunft rechnet man mit dem doppelten Betrag! Eine in genauer Kenntnis des Schadens erfolgende Intervention zum richtigen Zeitpunkt kann im Vergleich zu einer zu späten Sanierung nach einer Überschlagsrechnung [1] bis zu 30% der Unterhalts- und

Instandstellungskosten einsparen. Vor dem Hintergrund der 5 Mrd Fr., die 1983 für Instandsetzung und Erneuerung von Bauwerken in der Schweiz ausgegeben wurden, wird die volkswirtschaftliche Bedeutung des «richtigen Zeitpunktes» offensichtlich.

Die Problematik der Bauwerksuntersuchung ist heute folgende:

- Die an sich bewährte und auf jeden Fall beizubehaltende visuelle Inspektion kann verdeckte Schäden erst er-

fassen, wenn diese an der Oberfläche des Bauwerks sichtbar werden.

- Die punktuellen Probenentnahmen an Bauwerken liefern zwar genaue, aber für das Bauwerk als Ganzes nicht unbedingt repräsentative Werte aus Laboruntersuchungen.

Insbesondere die Hauptursache für Schäden, die Korrosion der Bewehrung, wird bei diesem Vorgehen sehr oft nicht oder zu spät entdeckt. Im folgenden soll daher die Potentialfeldmes-

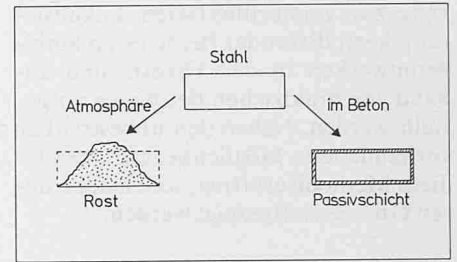


Bild 1. Korrosion von Stahl an der Atmosphäre und im Beton. Im Beton bildet sich im alkalischen Milieu des Porenwassers eine schützende Oxidschicht

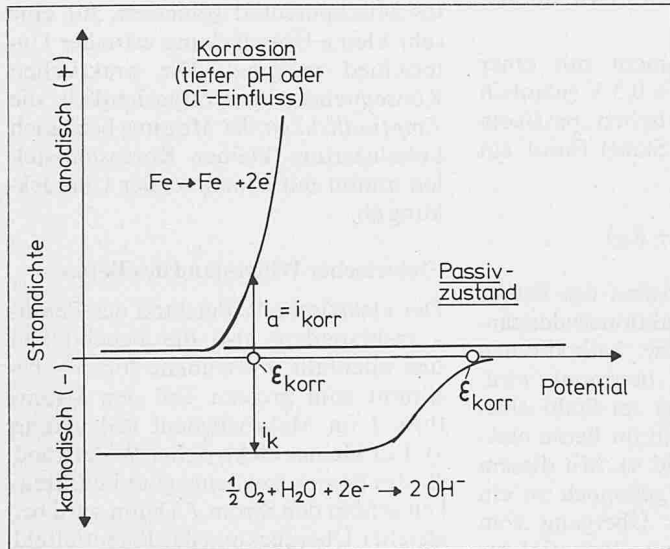


Bild 2. Korrosionspotentiale von Armierungsstahl in Beton im Passivzustand und bei Korrosion unter Chlorideinfluss

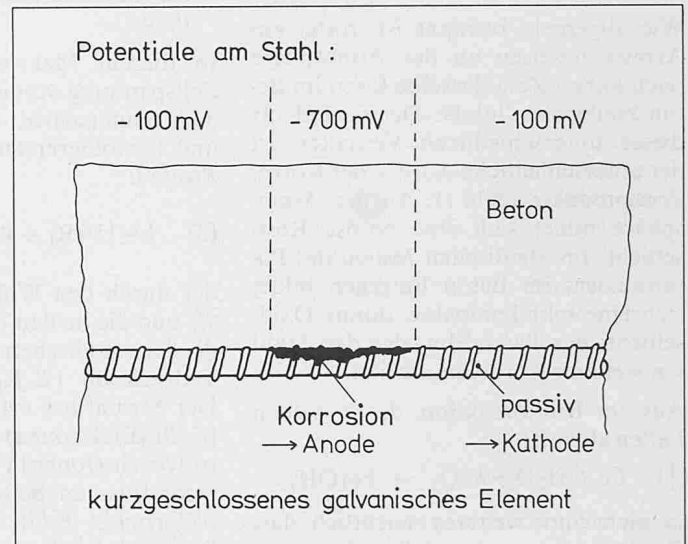


Bild 3. Nebeneinander von korrodierenden und intakten Bereichen des Armierungsstahls in Beton (schematisch)

Bild 5 (rechts). a Elektrisches Feld im Beton (schematisch), b Einfluss der Überdeckung auf das an der Betonoberfläche gemessene Potentialfeld

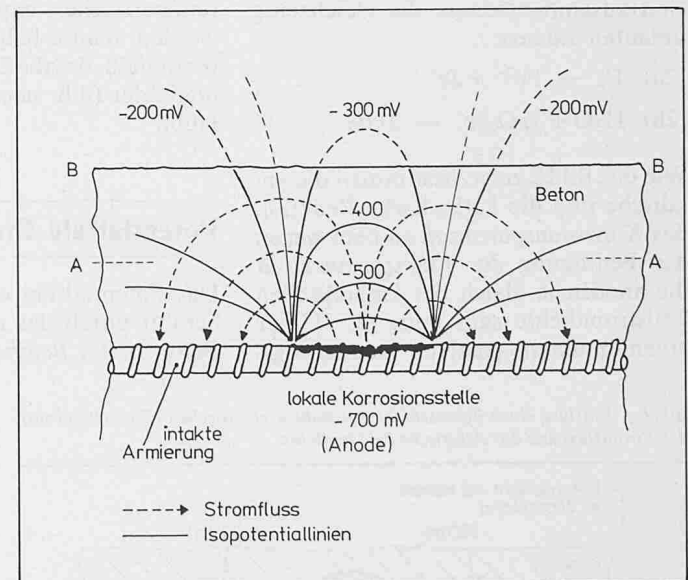
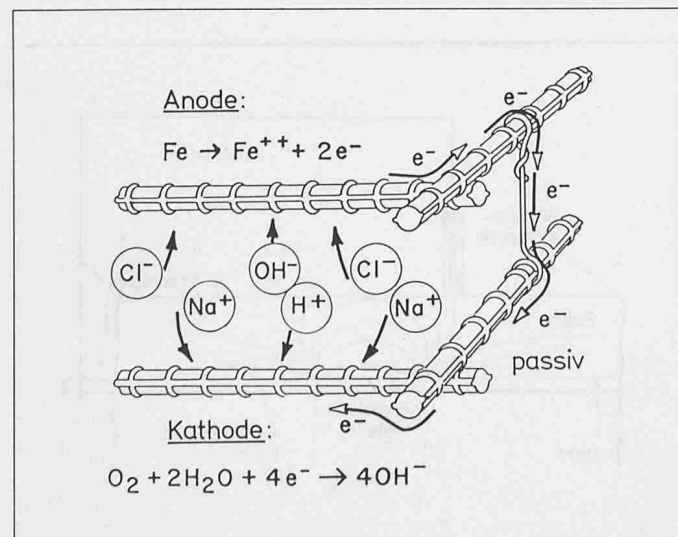
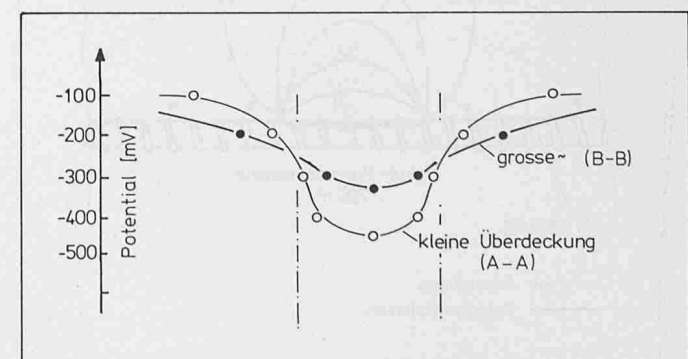


Bild 4. Stromfluss zwischen intakten und korrodierenden Bereichen. Im Stahl Elektronenleitung, im Beton Ionenleitung

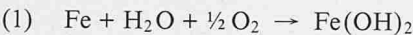


sung zur zerstörungsfreien Lokalisierung korrodierender Bereiche an Stahlbetonwerken in der Theorie und anhand von praktischen Beispielen vorgestellt werden. Neben den unbestreitbar vorhandenen Möglichkeiten, welche diese Methode eröffnet, sollen auch deren Grenzen aufgezeigt werden.

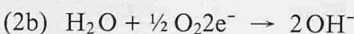
Ursachen der Korrosion – elektrochemische Grundlagen

Wie allgemein bekannt ist, rostet ein Armierungseisen an der Atmosphäre nach kurzer Zeit, dasselbe Eisen im Beton bleibt aber intakt. Der Grund für dieses unterschiedliche Verhalten ist der unterschiedliche Aufbau der Korrosionsprodukte (Bild 1): An der Atmosphäre bildet sich eine poröse Rostschicht. Im alkalischen Milieu des Porenwassers im Beton hingegen bildet sich eine sehr kompakte, dünne Oxidschicht: der Passivfilm, der den Stahl vor weiterer Korrosion schützt.

Aus der Bruttoreaktion, die in beiden Fällen abläuft:



ist nicht ohne weiteres ersichtlich, dass Korrosionsprozesse elektrochemische Vorgänge sind, die sich aus einer anodischen und einer kathodischen Teilreaktion zusammensetzen, die gleichzeitig ablaufen müssen:



Wie das Bild 2 zeigt, bestimmen die anodische und die kathodische Reaktion das *Korrosionspotential*, an dem wegen der Bedingung der Elektroneutralität die anodische gleich der kathodischen Teilstromdichte sein muss [2, 3]. Für einen intakten, passiven Armierungs-

stahl in Beton misst man etwa -100 mV bis 0 mV gegen die Kupfersulfatelektrode, ein rostiges, korrodierendes Eisen ergibt Werte von -600 mV bis -700 mV.

Charakteristisch für Stahlbetonbauwerke ist nun das *Nebeneinander von passivem und korrodierendem Armierungsstahl* (Bild 3); es entsteht ein kurzgeschlossenes galvanisches Element (ähnlich einer Batterie):

- die korrodierende Stelle wird zur *Anode*
- die intakten, passiven Eisen zur *Kathode*.

In diesem Makroelement mit einer Zellspannung von etwa 0,5 V (nämlich dem Unterschied zwischen passivem und korrodierendem Stahl) fliesst ein *Strom I*:

$$(3) \quad I = U / (R_E + R_A + R_K)$$

der durch den Widerstand des Betons R_E und die beiden Reaktionswiderstände der anodischen bzw. kathodischen Teilreaktion ($R_A R_K$) bestimmt wird. Der Stromfluss erfolgt im Stahl elektrisch (Elektronen) und im Beton elektrolytisch (Ionen) (Bild 4). Mit diesem Stromfluss im Beton gekoppelt ist ein *elektrisches Feld*; der Übergang vom Potential der Anode zum Potential der Kathode erfolgt kontinuierlich. Dieses elektrische Feld kann nun an der Betonoberfläche experimentell erfasst werden, man erhält als Schnitt das Potentialfeld, das die Lokalisierung korrodierender (d.h. negativer) Bereiche erlaubt.

Potentialfeld-Einflussgrößen

Das Potentialfeld entspricht also dem Schnitt durch das elektrische Feld im Beton an der *Betonoberfläche* (Bild 5a).

Daraus lässt sich eine erste und sehr wichtige Einflussgrösse ableiten, die Betonüberdeckung.

Die Überdeckung

Die Überdeckung beeinflusst das an der Oberfläche gemessene Potentialfeld direkt (Bild 5b), da mit zunehmender Distanz von den Armierungseisen die Potentialwerte von Anode und Kathode immer näher beieinander liegen. Für den Grenzfall einer sehr grossen Überdeckung wird überall nur ein konstantes Mischpotential gemessen; für eine sehr kleine Überdeckung wäre der Unterschied maximal. Die praktischen Konsequenzen sind offensichtlich: die *Empfindlichkeit der Messung* bezüglich Lokalisierung kleiner Korrosionsstellen nimmt mit zunehmender Überdeckung ab.

Elektrischer Widerstand des Betons

Der elektrische Widerstand des Betons – insbesondere also die Feuchtigkeit und allenfalls vorhandene Ionen – bestimmt zum grossen Teil den Stromfluss *I* im Makroelement (Gleichung 3). Ein kleiner elektrischer Widerstand R_E des Betons bzw. eine gute Leitfähigkeit erhöht den Strom *I*. Damit wird bei gleicher Überdeckung das Potentialfeld flacher. Ein hoher Betonwiderstand (trocken) dagegen senkt den Strom, und das Potentialfeld an der Oberfläche zeigt steilere Gradienten.

Diskontinuitäten im Betonaufbau, Risse

Liegen im Aufbau des Betons über der Armierung stark unterschiedliche Schichten (mit verschiedener Leitfähigkeit) vor, so wird das an der Oberfläche messbare Potentialfeld beeinflusst. Im Fall eines Überzugs mit hohem elektrischem Widerstand (Bild 6) wird der Strom den «Weg des geringsten Wider-

Bild 6. Einfluss einer Betonschicht mit hohem elektrischem Widerstand auf den Stromfluss und das elektrische Feld im Beton

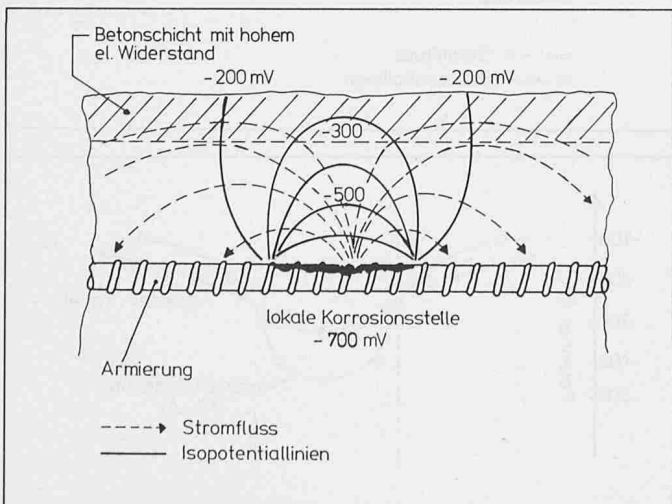
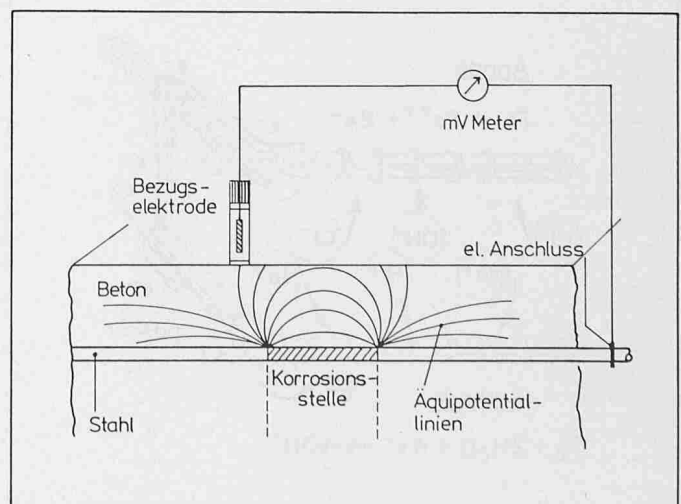


Bild 7. Prinzip der Potentialfeldmessung



stands» wählen und nicht in den oberflächennahen Bereichen fließen – das Potentialfeld an der Oberfläche wird zu positive Werte aufweisen, d.h. korrodierende Bereiche werden unter Umständen nicht entdeckt [4]. Eine dicke Karbonatisierungsschicht könnte denselben Effekt haben. Risse im Beton, deren Breite und Länge ein bestimmtes Mass überschreiten, stören den Stromfluss im Beton ebenfalls.

Neben diesen eher «elektrischen» Einflussgrößen können auch elektrochemische Faktoren die gemessenen Potentiale beeinflussen:

Erschwerter Sauerstoffzutritt

Wie bereits bei der Herleitung des Korrosionspotentials gezeigt, bestimmen die anodische und die kathodische Teilreaktion das Korrosionspotential. Im Wasser oder im Erdboden ist der Sauerstoffzutritt erschwert oder unmöglich, so dass die kathodische Teilreaktion (Sauerstoffreduktion, Gleichung 2b) praktisch nicht mehr ablaufen können wird. Dadurch verschiebt sich das Korrosionspotential zu sehr negativen Werten, ohne dass eine nennenswerte Korrosionsreaktion abläuft! Aus dem Wasser bzw. dem Erdboden herausragende Stahlbetonkonstruktionen weisen infolge dieser Beeinflussung in einer Übergangszone zu negative Werte auf, welche das Vorliegen von Korrosion vortäuschen.

Diffusionspotentiale

Am Übergang von der auf die Oberfläche aufgesetzten Messelektrode zum Beton können je nach Feuchtigkeit und Karbonatisierungsgrad unterschiedliche Diffusionspotentiale auftreten, welche durch die unterschiedliche Konzentration an Hydroxylionen bestimmt sind. Ähnliche Effekte sind auch beim Eindringen von Chloriden möglich.

Während theoretisch Potentialverschiebungen bis zu 100 mV erwartet werden, sind experimentell nur kleinere Verschiebungen gefunden worden [4], zudem in positiver statt wie erwartet in negativer Richtung!

Die Tabelle 1 zeigt die Faktoren, die das Potentialfeld beeinflussen können.

Durchführung von Potentialfeldmessungen

Erforderliche Geräte

Zur Messung des Potentialfeldes an der Betonoberfläche benötigt man eine Referenzelektrode mit bekannter und konstanter Spannung (in der Praxis meist eine Cu/CuSO₄-Elektrode). Der zweite Anschluss des Voltmeters wird mit der freigelegten oder angebohrten Armierung verbunden (Bild 7). Damit in diesem Messkreis nur ein sehr kleiner Strom fließt, ist ein hochohmiges Voltmeter erforderlich, mit einer Eingangsimpedanz von 10⁸ Ohm/Volt. Der Kontakt zwischen Elektrode und Beton ist sehr wichtig; meist werden zur Abtrennung der Elektrodenflüssigkeit Holzapfen als poröses Diaphragma und zur Ankopplung der Elektrode auf den Beton ein feuchter Schaumgummi eingesetzt. Der Anschluss an die Armierung erfolgt am sichersten durch Anbohren des Stahls und Kontaktieren mit einer selbstschneidenden Schraube.

Grosse Objekte – Einsatz von Rechnern

Das Arbeiten mit einer Einzelelektrode ist unbequem und zeitraubend. Deshalb werden heute bereits Datenerfassungsgeräte mit acht Elektroden und automatischer Registrierung der Potentialwerte angeboten [5, 6]. Um das Ausmessen grosser Brücken-Oberflächen oder auch -Untersichten weiter zu be-

schleunigen, wurde am Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion (IBWK) der ETH Zürich ein System entwickelt, das die Referenzelektroden fix enthält und den Kontakt zum Beton über acht stets feucht gehaltene Kontakträder bewerkstelligt (Bild 8).

Mit dieser Anordnung können problemlos 2 bis 4 m²/min (auch über Kopf) ausgemessen werden. Die rasche Messung und die damit auftretende grosse Datenmenge erfordert den Einsatz von Rechnern. Die vorhandene Lösung ermöglicht das Abspeichern der Messdaten on-line, die numerische Darstellung auf Bildschirm oder Drucker und eine zusammengefasste grafische Darstellung des Potentialfeldes von maximal 10 m Breite und beliebiger Länge. So ist es möglich, bereits auf der Baustelle eine Darstellung des Potentialfeldes zu erhalten und die Bereiche zu bezeichnen, in denen Korrosion zu erwarten ist. Damit ist die Frage nach dem Potentialwert bzw. einem andern Kriterium gestellt, das korrodierende Armierungseisen anzeigt.

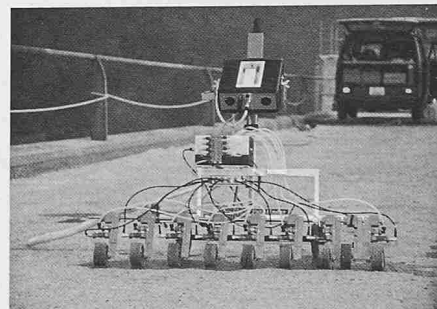


Bild 8. Die am IBWK entwickelte Messapparatur mit Radelektroden in der praktischen Anwendung

Bild 9. Ausschnitt aus dem Potentialfeld (Fahrbahnplatte Cugnetobelbrücke II, Sommer 1986)

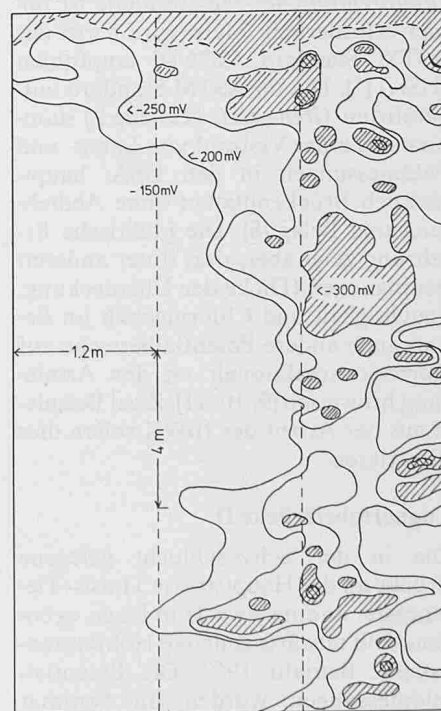


Tabelle 1. Zusammenstellung der wichtigsten Einflussgrößen und ihrer Auswirkung auf das Potentialfeld an der Betonoberfläche

Einflussgrösse	Auswirkung
Zunehmende Ueberdeckung	Potentialfeld flacher, zu positiven Werten verschoben
Kleinerer elektrischer Widerstand des Betons	Potentialfeld flacher
Betonschichten mit hohem elektrischem Widerstand	Potentialfeld flacher, viel zu positive Werte
Asphaltschicht Isolation / Abdichtung	Potentialfeldmessung nicht möglich oder Resultate falsch
Risse im Beton	Störung des Potentialfelds
Diffusionspotentiale am Uebergang Elektrode - Beton	trockener Beton: generell zu positive Potentialwerte
Bauwerke im Wasser oder im Erdboden (erschwerter Sauerstoffzutritt)	am Uebergang zu den Bereichen an Luft stark negative Potentiale ohne Auftreten von Korrosion

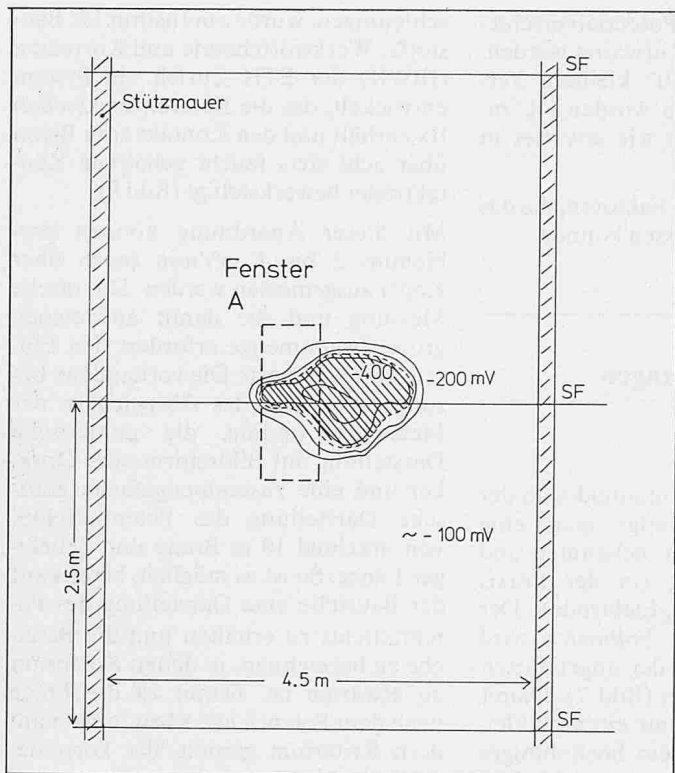


Bild 10. Potentialfeld der Fahrbahnplatte, Untersicht (San-Bernardino-Tunnel, Herbst 1986)

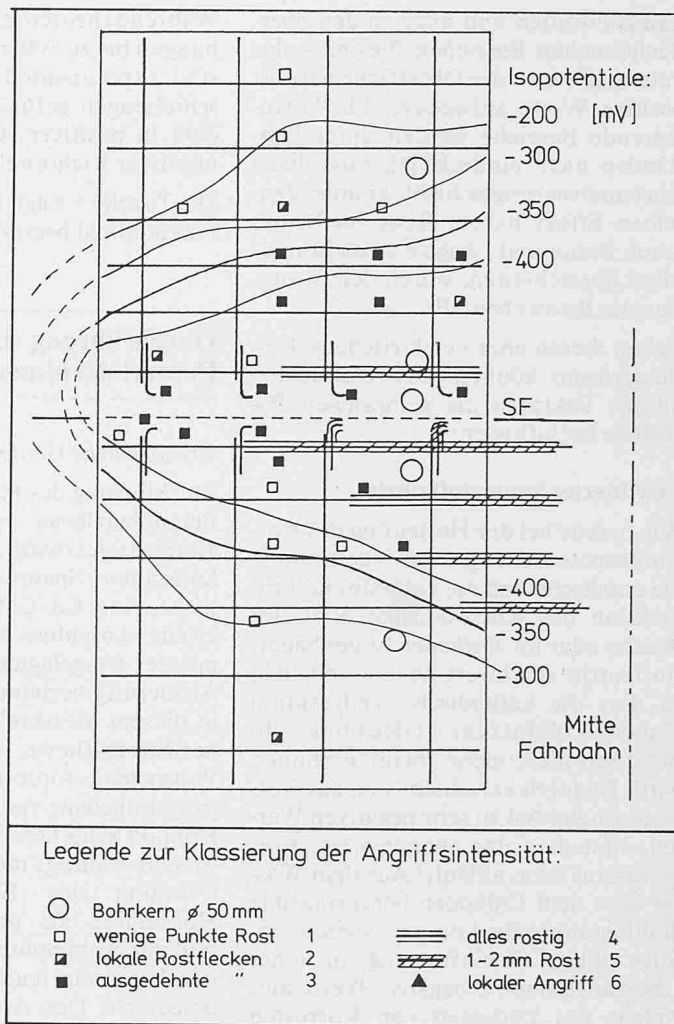


Bild 11 (rechts). Vergleich des Korrosionszustands der Armierung mit dem Potentialfeld (Fenster A aus Bild 10)

Interpretation und Beispiele

Wie bereits gezeigt, lassen sich infolge der Betonüberdeckung der Armierung nur *Mischpotentiale* messen, und eine *Interpretation* der Messresultate ist immer erforderlich. Meist wird dabei der ASTM Standard C876-80 empfohlen (USA) [7]. Die im ASTM Standard aufgeführten *Grenzwerte* (Tabelle 2) stammen aus einer Vielzahl von Labor- und Feldmessungen in den USA, hauptsächlich Brückenplatten ohne Abdichtung und Belag [8]. Die praktische Erfahrung zeigt aber, dass unter anderen Bedingungen (Dicke der Überdeckung, Feuchtigkeit und Chloridgehalt im Beton) auch andere Potentialbereiche auf Korrosionsreaktionen an der Armierung hinweisen [9, 10, 11]. Zwei Beispiele aus der Arbeit des IBWK sollen dies illustrieren.

Cugnertobelbrücke II

Die in der Schynschlucht gelegene Brücke an der Hauptstrasse Thusis-Tiefencastel ist eine etwa 45 m lange, gebogene und talwärts geneigte Hohlkastenbrücke, Baujahr 1962. Die Potentialfeldmessungen wurden im Sommer

1986 im Rahmen einer Sanierung durchgeführt. Im Bild 9 ist ein Ausschnitt aus dem gemessenen Potentialfeld dargestellt. Sofort ins Auge sticht die unruhige, kleinräumige Struktur des Potentialfeldes, welche auf eine *Vielzahl von kleinen lokalen Korrosionsstellen* hindeutet. Das Freilegen der Armierung bestätigte dies eindrücklich.

Als *Grenzwert* für das Vorliegen von Korrosion wurde der Wert von -300 mV (CuSO_4) erhalten; mit dem ASTM-Grenzwert von -350 mV wären über 70 Prozent aller (vor allem kleinen) Korrosionsstellen nicht angezeigt worden. Die rein visuelle Beurteilung ergab nur vereinzelte, anhand von Rostspuren sichtbare Korrosionsstellen! Im weiteren zeigt sich klar, dass das Auffinden sehr lokalisierter Lochfrassangriffe einen *genügend feinen Messraster* voraussetzt, ein Abstand von 15 cm von Punkt zu Punkt war gerade ausreichend.

San-Bernardino-Tunnel

Der 6,6 km lange San-Bernardino-Tunnel (N 13) ist von der Konstruktion her gesehen eine «Brücke im Tunnel». Die doppelt abgestützte und an den Tunnel-

rändern im Gewölbe gelagerte *Fahrbahnplatte* besteht wegen der grossen auftretenden Dehnwege aus Abschnitten mit Scheinfugen (SF) in Abständen von 2,5 m und echten Dilatationsfugen (DF) nach je 25 m. Die Untersicht der Fahrbahnplatte wurde im Bereich von 15 Fugen (5 DF, 10 SF) auf einer Fläche von je etwa 25 m² mittels Potentialfeldmessung auf Korrosionsschäden überprüft.

Ein Beispiel zeigt das Bild 10. Offensichtlich treten hier Korrosionsschäden nur im Bereich der Fugen auf; der Grossteil der Fahrbahnplatte ist intakt. Zur Überprüfung wurde die Armierung im Übergangsbereich korrodiert/intakt auf einer Fläche von rund 1 m² freigelegt (Fenster A). Wie das Bild 11 zeigt, werden mit dem Kriterium -350 mV praktisch alle, auch erst beginnende Korrosionsstellen erfasst. Quantitativ ist dieser Sachverhalt im Bild 12 dargestellt: Starke Korrosionsschäden (Intensität 4) sind bei diesem Beispiel bei Potentialen > -450 mV zu finden.

Das *Schadensbild* wird durch die aus Bohrkernen bestimmten Chloridgehalte abgerundet: In Übereinstimmung mit dem Potentialfeld werden nur in der Nähe der Fuge Chloridgehalte $> 0,4\%$

(pro Zementgewicht) gemessen. Zwischen dem mittels Potentialfeldmessung festgestellten Vorliegen von Korrosion und dem gemessenen Chloridgehalt besteht in über 90% aller Fälle (total 60 Bohrkerne) eine eindeutige Korrelation:

- zu hohe Chloridgehalte sind stets mit Potentialwerten unter -350 mV verbunden;
- Bereiche mit Chloridgehalten unter 0,4% zeigen Potentialwerte positiver als -250 mV.

Im Vergleich zur rein visuellen Inspektion (Abplatzungen, Frost-/Tausalzschäden am Beton) ist die mit der Potentialfeldmesstechnik festgestellte korrodierende Zone etwa 30 bis 50% grösser.

Die bereits ausführlich diskutierten Einflussgrössen auf das Potentialfeld lassen ein absolutes Kriterium für das Auffinden korrodierender Bereiche der Armierung *problematisch* erscheinen (Tabelle 2). Die vorgestellten Beispiele - zusammen mit vielen anderen - zeigen denn auch, dass die *Struktur des Potentialfelds und der Gradient* (Steilheit des Übergangs zwischen intakten und korrodierenden Bereichen der Armierung), viel bessere Möglichkeiten bieten, um korrodierende Bereiche zu lokalisieren und das Korrosionsverhalten der Armierung im Gesamtrahmen des Bauwerks zu beurteilen.

Diese Aussage bedeutet aber auch, dass das Auswerten einer Potentialfeldmessung stets eine qualifizierte Arbeit bleibt, die nicht einem Rechner oder Gerät allein übertragen werden kann.

Zusammenfassung

Die Potentialfeldmesstechnik ist als zerstörungsfreie Methode zum raschen Auffinden und Erfassen korrodierender Armierungen in Stahlbeton gut geeignet. Zur korrekten Interpretation der Resultate sind aber folgende Punkte unbedingt zu beachten:

- Die Methode beruht auf der Beurteilung des *Makroelementes* zwischen korrodierendem und passivem Stahl im Beton und des damit verbundenen Stromflusses. Damit ist klar, dass die Korrosionsreaktion zum Zeitpunkt der Messung *aktiv* sein muss, damit Gefahrenherde gefunden werden.

Aussage	Cugnertobelbrücke	Fahrbahnplatte	Brücke im Tessin	Pfeiler im Meer [9]	Kriterium ASTM C876
90% Sicherheit keine Korrosion	> - 0,2 V	> - 0,25 V	> - 0,05 V	> - 0,40 V	> - 0,20 V
Übergangsbereich (keine Aussage)	- 0,2 V... - 0,3 V	- 0,25 V - 0,35 V	- 0,05 V.. - 0,20 V	- 0,40 V... - 0,55 V	- 0,20 V... - 0,35 V
90% Sicherheit Korrosion	< - 0,3 V	< - 0,35 V	< - 0,20 V	< - 0,55 V	< - 0,35 V

Tabelle 2. Vergleich von Potentialgrenzwerten, die für passiven bzw. korrodierenden Armierungsstahl an verschiedenen Objekten gefunden wurden, mit dem ASTM Standard C876-80 (Potentiale Volt vs. Cu/CuSO₄-Elektrode)

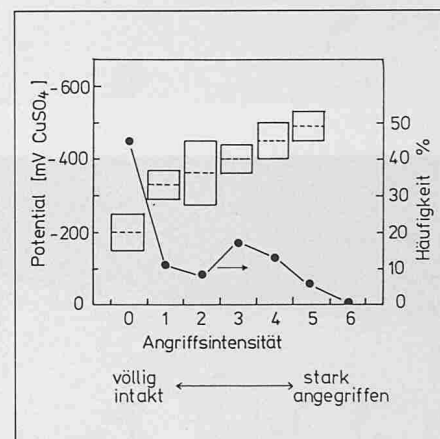
- Das mit dem Stromfluss gekoppelte *Potentialfeld* im Beton wird von verschiedenen betonseitigen Eigenschaften (Dicke der Überdeckung, Widerstand des Betons, Inhomogenitäten) und von elektrochemischen Grössen (Diffusionspotentiale infolge unterschiedlicher Feuchtigkeit, sehr negative Potentiale infolge Sauerstoffmangels) beeinflusst. Das Festsetzen absoluter Grenzwerte zur Beurteilung, wie im ASTM Standard C876-80 vorgeschlagen, ist daher nicht sinnvoll und führt zu Fehlinterpretationen. Viel eher geeignet ist eine Beurteilung, die den Gradienten des Potentialfelds als Indikator für Korrosionsbereiche verwendet.

Die Potentialfeldmesstechnik ist - auch bei weitergehender Automatisierung - eine diagnostische Methode. Sie kann daher nur von qualifiziertem Personal und im Zusammenhang sinnvoll eingesetzt werden: Die visuelle Inspektion und ergänzende Untersuchungen (z.B. Chloridgehalt, Karbonatisierung usw.) sind für eine korrekte Interpretation unbedingt miteinzubeziehen.

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

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETH Zürich (IBWK) im Rahmen eines Forschungsprojektes der Kommission für Strassenbauauforschung des EVED «Korrosion von Armierungsstahl in Stahlbetontragwerken» (1985-1987). Wir danken Dr. P. Schmalz vom Bundesamt für Strassenbau und P. Mantovani vom kantonalen Tiefbauamt Graubünden für ihre aktive Mitarbeit und vor allem für das bereitwillige Zurverfügungstellen der Bauwerke sowie der Infrastruktur.

Bild 12. Korrelation des Zustands der Armierung (aus den festgestellten Angriffintensitäten) mit den Potentialwerten



Literatur

- [1] Müller, R.: Die Bauwerksinspektion aus neuer Sicht. In Werkstoffwissenschaften und Bausanierung. Herausgeber F.H. Wittmann. 2. Int. Kolloquium, 2.-4. Sept. 1986, TAE Esslingen, S. 689-699.
- [2] Elsener, B., und Böhni, H.: Elektrochemische Untersuchung der Korrosion von Armierungsstahl in Beton. Schweizer Ingenieur und Architekt 102 (1984) H. 14, S. 264-269.
- [3] Böhni, H., und Elsener, B.: Korrosionsbeständigkeit von Armierungen. In Beständigkeit von Stahlbeton. Zürich 1984. SIA Dokumentation 72, S. 35-43.
- [4] Brown, R.D. et al. Analysis of Structural Condition from Durability Results. In Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. Editor A.P. Crane. Ellis Horwood Publ. 1983, p. 193-222.
- [5] «Pathfinder». Vertrieben durch Fa. Colebrand Ltd., London.
- [6] «Micaps». Vertrieben durch PathTechnics Ltd., St. Catherine, Ontario, Canada.
- [7] Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete. ASTM C 876-80.
- [8] Van Deever, J.R. J. American Concrete Inst., 12 (1975), p. 697-704.
- [9] Baker, A.F.: Potential Mapping Technique. In Seminar on Corrosion in Concrete - Monitoring, Surveying and Control by Cathodic Protection. London Press Center 13.5.1986.
- [10] Dawson, J.L.: Corrosion Monitoring of Steel in Concrete. In Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. Editor Alain P. Crane. Ellis Horwood Publ. 1983, p. 175-190.
- [11] Tritthardt, J.; Geymayer, H. Beton 31 (1981), S. 237-240.