



Korrosion von Stahl in Beton

Einleitung

Die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken erfolgt über Regelwerke [1], die auf einem umfangreichen Wissen über die Eigenschaften der verwendeten Baustoffe beruhen. Weiterhin dienen Beobachtungen und Untersuchungen dazu, eine genaue Aussage über den Ist-Zustand von Bauwerken abgeben zu können. Eine detaillierte Bestandsaufnahme und Zustandsanalyse auf Grundlage geeigneter Messdaten ermöglicht eine Prognose über die verbleibende Nutzungsdauer. Fortlaufende Untersuchungen können auch dazu genutzt werden, Wartungs- und Sanierungsintervalle auf der Grundlage von Regelwerken [2, 3] zu koordinieren und so den Erhalt von Bauwerken zu sichern.

Die Korrosion von Bewehrungsstahl und die damit verbundene Degradation ganzer Bauteile ist ein häufig zu beobachtendes Problem von Stahlbetonbauwerken. Da die entstehenden Korrosionsprodukte zunächst vom Porengefüge des Betons aufgenommen werden, bleibt die fortschreitende Schädigung der Bewehrung längere Zeit unbemerkt. Elektrochemische Untersuchungsverfahren wie die Potentialfeldmessung können dazu genutzt werden, aktive (korrodierende) und passive (nicht korrodierende) Bereiche der Bewehrung zu ermitteln. Um das Verständnis für die Korrosion von Stahl in Beton zu vertiefen, werden in diesem Beitrag zunächst die Grundlagen dargestellt und in einem weiteren Beitrag die Möglichkeiten der Korrosionsortung näher betrachtet.

Passivität und Depassivierung von Stahl in Beton

Die Passivität von Stahl in Beton ist auf die hohe Alkalität des Elektro-

lyten Beton zurückzuführen. Die Werte liegen direkt nach dem Anmachen je nach Zementart in einer Größenordnung von etwa $\text{pH} = 12,5$. Im weiteren Verlauf der Festigkeitsentwicklung gehen weitere Alkalien wie KOH und NaOH in Lösung und steigern den pH-Wert [4] auf Werte im Bereich von 13,0 bis 13,8. Die Höhe des pH-Wertes wird hierbei nachhaltig durch die Art und die Menge des verwendeten Zementes bestimmt. Das Calciumhydroxid wird dabei in großen Mengen bei der Hydratation der Zementklinkerphasen C_3S und C_2S freigesetzt. Für den alkalischen Schutz stehen allerdings in erster Linie die leicht löslichen Natrium- und Kaliumsalze zur Verfügung. Das schwerlöslichere Calciumhydroxid liegt in der Zementsteinmatrix in Form von Portlandit [4] vor.

Depassivierung infolge Karbonatisierung

Der Schutz des Stahls im Beton beruht auf einer passivierenden Oxidschicht [5-7] aus Fe_3O_4 , die elektrolytseitig zu Fe_2O_3 aufoxidiert. Diese dünne sandwichartige Struktur von wenigen Atomlagen (2 - 20 nm) [8] verhindert infolge ihrer hohen Dichte den weiteren Auflösungsprozess des Stahls. Die Beständigkeit dieser Passivschicht ist jedoch an die Alkalität des Elektrolyten gebunden.

Infolge der Karbonatisierung sinkt der pH-Wert des Betons von ca. $\text{pH} = 12,5 - 14$ auf Werte um 9 ab, der alkalische Schutz geht verloren und die Passivschicht wird instabil und zerfällt (Depassivierung), Eisenionen gehen erneut in Lösung (anodische Teilreaktion nach Gleichung 1).



An gut belüfteten Bereichen der Stahloberfläche (Kathoden) kommt es dann unter Verbrauch von Sauerstoff zur Bildung von Hydroxylionen.



In den Folgereaktionen entstehen unterschiedliche Reaktionsprodukte des Eisens,



die in weiteren Sekundärreaktionen unter Verbrauch von Sauerstoff aus Eisen(II)Hydroxid zu schwerlöslichem Eisen(III)Hydroxid aufoxidieren.



- 1 DIN 1045, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2001-07.
- 2 DAFStb-Richtlinie, Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAFStb, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001.
- 3 DIN EN 12696, Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2002-06.
- 4 J. Stark und B. Wicht, Dauerhaftigkeit von Beton, Der Baustoff als Werkstoff, Baupraxis, F.A. Finger-Institut für Baustoffe der Bauhaus-Universität Weimar, Birkhäuser Verlag, 2001, S. 24.
- 5 H. Kaesche, Die Korrosion der Metalle, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1979, S. 37.
- 6 D. A. Koleva, J. Hu, A. L. A. Fraaij, P. Stroeven, N. Boshkov und J. H. W. de Wit, Quantitative characterisation of steel/cement paste interface microstructure and corrosion phenomena in mortars suffering from chloride attack, Corrosion Science, 48, 12, 2006, S. 4001-4019.
- 7 V. L'Hostis, D. Neff, L. Bellot-Gurlet und P. Dillmann, Characterization of long-term corrosion of rebars embedded in concretes sampled on French historical buildings aged from 50 to 80 years, Materials and Corrosion, 60, 2, 2009, S. 93-98.
- 8 K. J. Vetter, Elektrochemische Kinetik, Springer-Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg, 1961.



Abb. 1: Flächiger Korrosionsabtrag infolge Karbonatisierung mit Betonabplatzungen [9]

Das entstandene Reaktionsprodukt (Rost), lagert sich an der Anode auf der Stahloberfläche und in der Zementsteinmatrix an und es ist ein gleichmäßiger, flächiger Korrosionsabtrag zu beobachten (Abb. 1).

Depassivierung infolge Chloridangriff

Neben der flächigen Korrosion unter Sauerstoffreduktion durch Karbonatisierung der Betondeckung, kann die Depassivierung auch durch Chloride eingeleitet werden. Betroffen sind vor allem Bauwerke, die Tausalzen aus dem Winterdienst ausgesetzt sind (Brücken, Parkhäuser) oder aus dem maritimen Bereich. Als Transportmittel im Beton kommt dabei dem Wasser eine entscheidende Rolle zu. Je nach Feuchtegehalt und der Porosität des Betons können Chloride kapillar aber auch durch Diffusion transportiert werden [10, 11]. Durch die Chloride wird die Passivschicht lokal zerstört und der Stahl korrodiert.

Die Folge der Depassivierung ist eine ausgeprägte Elementbildung zwischen dem depassivierten Bereich (Lokalanode) und der sie umgebenden passiven Stahloberfläche, die als Kathode wirkt und unange-

griffen bleibt. Dabei laufen die Teilreaktionen aufgrund ihrer unterschiedlichen flächigen Ausdehnung unterschiedlich schnell ab. Im Bereich der Anode bildet sich durch die starke Eisenauflösung eine hohe Stromdichte, während in den benachbarten kathodischen Bereichen niedrigere Stromdichten infolge größerer kathodischer Flächen zu finden sind.

Direkt nach der Depassivierung folgt die kathodische Teilreaktion auch hier dem Sauerstofftyp (Gleichung 2). Als Folge des sehr kleinen depassivierten Bereiches und der hohen Triebkraft zwischen Anode

und Kathode kommt es allerdings sehr schnell zu einem Systemwechsel und die kathodische Teilreaktion wechselt in den Wasserstofftyp (Abb. 2).

Die anodische Eisenauflösung folgt dabei weiterhin Gleichung 1. Die daraus entstandenen Eisenionen reagieren in einer Zwischenreaktion mit den Chloridionen zu Eisenchlorid und Salzsäure. Die Säure führt zu einer deutlichen Absenkung des pH-Wertes ($pH \leq 5$) im Loch.



Im entstandenen Loch wird unter den stark sauren Bedingungen ein Teil der Protonen direkt unter Bildung von gasförmigem Wasserstoff reduziert.



- 9 J. Fischer B. Isecke J. Mietz, Langzeiterfahrungen mit einem kathodischen Korrosionsschutzsystem für Stahl in Beton, *Materials and Corrosion / Werkstoffe und Korrosion*, 52, 12, 2001, S. 920-930.
- 10 G. K. Glass und N. R. Buenfeld, The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete, *Corrosion Science*, 42, 2, 2000, S. 329-344.
- 11 C. Hall, Barrier performance of concrete: A review of fluid transport theory, *Materials and Structures*, 27, 1994, S. 291 - 306.

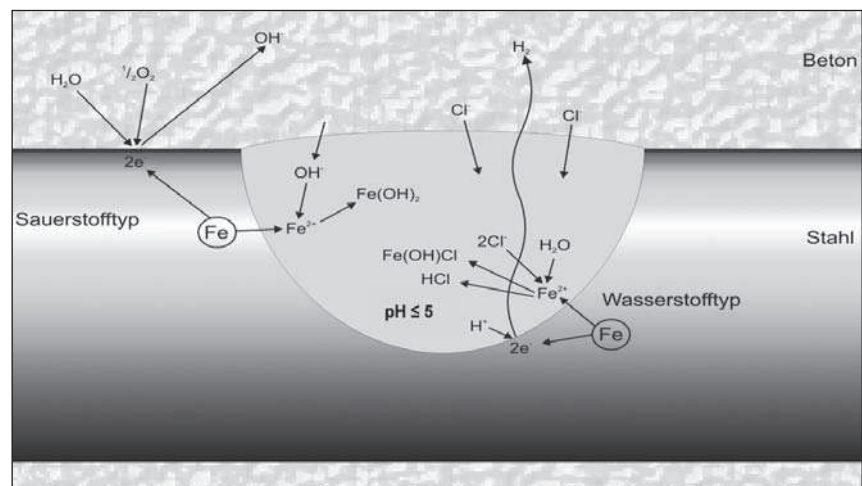


Abb. 2: Schadensmechanismus der chloridinduzierten Lochkorrosion von Stahl in Beton

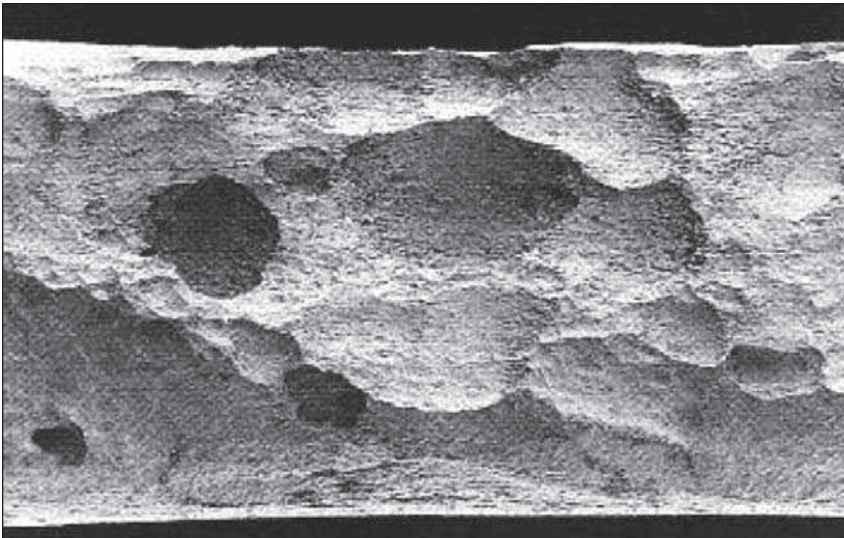


Abb. 3: Zusammenwachsen von Bereichen mit chloridinduzierte Lochkorrosion [11]

In der Praxis sind sehr unterschiedliche Erscheinungsformen der Lochkorrosion zu beobachten, Löcher und Mulden, die teils ineinander übergehen (Abb. 3).

Das tatsächliche Ausmaß des Korrosionsangriffs, wie er in Abb. 3 zu erkennen ist, lässt sich trotz elektrochemischer Messverfahren, wie der Potentialfeldmessung [12, 13] erst nach dem Ausbetten des Stahls aus dem Beton einschätzen.

Fortschritt der Korrosion von Stahl in Beton

Die treibende Kraft der Korrosion von Stahl in Beton beruht auf einer Potentialdifferenz und dem unterschiedlichen Flächenverhältnis zwischen anodischen und kathodischen Bereichen. Über das zusammenhängende Bewehrungsnetz sind die aktiven, anodischen Bereiche und die passiven, kathodischen Bereiche elektronenleitend miteinander verbunden. In der Folge kommt es zu einer gegenseitigen Polarisation, die häufig über große Entfernungen erfolgen kann. Es kommt zur Ausbildung eines großflächigen Korrosionssystems (Makrokorrosionselement).

Anodische Bereiche können in diesem Fall kathodischen Flächen ge-

genüberstehen, die um ein vielfaches größer sind (1:100; 1:1000). Wie weit die Anode in der Lage ist, andere passive (kathodische) Flächenbereiche zu polarisieren, hängt neben der Größe der Anode selbst auch von der Betonfeuchtigkeit (Leitfähigkeit) und den Eigenschaften des verwendeten Betons ab. Die Teilprozesse können vereinfacht wie in Abb. 4 dargestellt, als elektrisches Ersatzschaltbild dargestellt werden.

Während der Elektronenfluss zwischen Anode und Kathode aufgrund der Treibspannung des Systems (Potentialdifferenz ΔE) durch den elektrischen Leiter (Bewehrung) erfolgt und als widerstandslos angesehen werden kann,

wird der Ionenstrom signifikant von den Eigenschaften des Betons (Elektrolyten) bestimmt. Der Transport der Ionen durch die Betonmatrix setzt Wasser als Transportmedium und eine ausreichende Porosität voraus. Dabei beeinflussen insbesondere Zementart, Feuchte und Temperatur die Leitfähigkeit. Eine Verdichtung des Porengefüges führt zu einer Behinderung des Ionenstromes und erhöht damit den elektrischen Widerstand des Elektrolyten (R_E).

Weiterhin wirken die Betoneigenschaften auf anodische und kathodische Teilprozesse. Beispielsweise verbessert eine höhere Porosität des Betons die Belüftung der Kathode und steigert damit den Korrosionsfortschritt, der maßgeblich vom Sauerstoffangebot bestimmt wird. Eine vollständige Behinderung des Sauerstofftransportes ist aufgrund der Permeabilität der Zementsteinmatrix unter üblichen baupraktischen Bedingungen nicht zu erwarten.

12 SIA Merkblatt 2006, Durchführung und Interpretation der Potentialmessung an Stahlbetonbauten Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein -SIA, Zürich, 2/ 1993.

13 DGZfP-Merkblatt B3, Merkblatt für elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., DGZfP, Berlin, 4/2008.

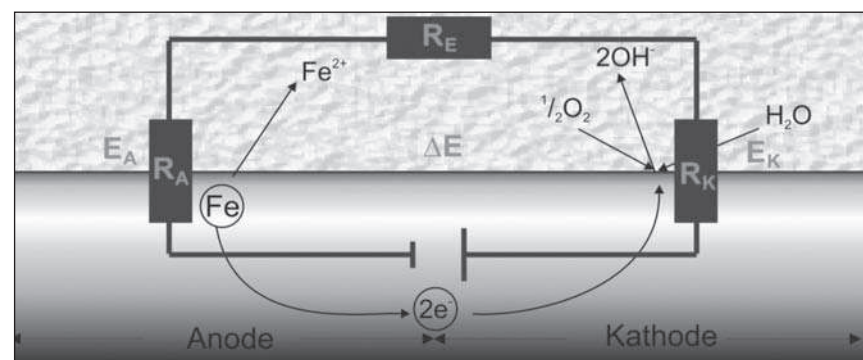


Abb. 4: Vereinfachtes Ersatzschaltbild zur Beschreibung der Korrosion von Stahl in Beton



Ist ein ausreichendes Angebot von Sauerstoff und Wasser an der Kathode gewährleistet, kann die Leistungsfähigkeit der Kathode nur durch den Ladungsübergang Metall/Elektrolyt beeinflusst werden. Diese Bereitschaft zum Ladungsaustausch lässt sich durch den kathodischen Polarisationswiderstand (R_k) als einer der bestimmenden Faktoren beschreiben.

Neben der kathodischen Teilreaktion wird auch der anodische Teilprozess durch die umgebende Zementsteinstruktur bestimmt. Sowohl Antransport von Reaktionspartnern an die Anode als auch der Abtransport von Reaktionsprodukten kann zu einer Hemmung der anodischen Teilreaktion führen. Der Transport von Eisenionen durch die Schicht aus Korrosionsprodukten wird daher zunehmend durch die Diffusionseigenschaften der Oxidschicht bestimmt. Oxidieren die gelösten Eisenionen unmittelbar vor der Anode zu Oxiden auf, so bewirken diese dichten und fest anhaftenden Rostschichten eine deutliche Hemmung der anodischen Teilreaktion (Eisenauflö-

sung). Der Widerstand den diese Barriere aus Korrosionsprodukten darstellt, gewinnt dann zunehmend an Bedeutung und kann den Korrosionsfortschritt hemmen (anodischer Polarisationswiderstand R_A).

Das einfache Ersatzschaltbild zeigt, dass die fortschreitende Degradation der Bewehrung maßgeblich von den Bauteilbedingungen und dem Baustoff selbst abhängig ist. Der Korrosionsfortschritt und die Ausweitung der betroffenen Bereiche bleiben durch die Betondeckung zunächst verborgen und werden erst erkannt, wenn Korrosionsprodukte an der Oberfläche sichtbar werden oder Risse und Betonabplatzungen auftreten. Mit geeigneten Methoden können die ablaufenden Korrosionsprozesse jedoch frühzeitig detektiert werden, so dass geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Die Potentialfeldmessung, ihre Einsatzmöglichkeiten und -grenzen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion werden im zweiten Teil dieses Beitrags vorgestellt. ■

Dr.-Ing. Matthias Beck
BetonMarketing Nord, Hannover

Dr.-Ing. Andreas Burkert
BAM Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung
Berlin