

Grundlagen des Kathodischen Korrosionsschutzes von Stahl in Beton

Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt

Dipl.-Ing. (FH) Stephan Vestner

id+v

Ingenieurgesellschaft Prof. Dauberschmidt und Vestner mbH

▪ **Zusammenfassung**

Ein Großteil des Instandsetzungsbedarfs chloridexponierter Stahlbetonbauteile rührt aus dem Verlust der passivierenden Wirkung des hohen pH-Werts der Betonporenlösung: durch Überschreiten des kritischen Chloridgehaltes kann es zu chloridinduzierter Bewehrungskorrosion mit hohen Abtragsraten kommen. Für die Instandsetzung chloridbelasteter Stahlbetonbauwerke muss bei den sog. konventionellen Verfahren oftmals Beton in großer Tiefe abgetragen werden. Dies verursacht hohe Kosten, stellt einen erheblichen Eingriff in das Bauwerk dar und führt nicht zuletzt zu Nutzungseinschränkungen während der Instandsetzung. Aus diesem Grund gewinnt der Kathodische Korrosionsschutz (KKS) von Stahl in Beton, eine zum Großteil zerstörungsfreie Instandsetzungsmethode, als wirtschaftliches Instandsetzungsverfahren korrosionsgefährdeter bzw. -geschädigter Bauteile zunehmend an Bedeutung. Nachfolgend werden die maßgebenden elektrochemischen, technischen, wirtschaftlichen und baubestimmungsrelevanten Grundlagen in komprimierter Form wiedergegeben.

1. Einleitung

Da sich der Erkenntnisstand bezüglich der Eignung und Dauerhaftigkeit von Anodensystemen in den letzten Jahren deutlich verbessert hat und die DIN EN 12969:2000-06 /1/ inzwischen Anforderungen an die Anodensysteme festlegt, wird das KKS-System bei Stahlbetontragwerken, insbesondere im Bereich chloridgeschädigter Verkehrsbauten zunehmend als Option für eine Instandsetzung in Betracht gezogen. Dies führt zu einer stetig steigenden Anzahl von Anwendungen des Kathodischen Korrosionsschutzes in Deutschland. Dieses Instandsetzungsprinzip bietet gegenüber der konventionellen Instandsetzung, bei der der chloridbelastete Beton entfernt werden muss, einige entscheidende Vorteile. Auf der anderen Seite birgt die Anwendung des KKS auch einige Risiken, denen sich der Planer stets bewusst sein muss – schließlich muss er den Bauherren auch umfassend aufklären. Vom Planer wird dabei eine besondere Sachkunde im Bereich Bauwerksdiagnose, herkömmliche Instandsetzung, elektrochemische Grundlagen und Anwendung des KKS für den Stahlbetonbau erwartet. Letztendlich bedarf die Entscheidung, ob eine Instandsetzung herkömmlich oder mittels KKS ausgeführt wird, einer sorgfältigen Abwägung aller Aspekte und einer belastbaren Wirtschaftlichkeitsbe-

trachtung. Die nachfolgenden Ausführungen sollen einen kurzen Einblick in den Stand der Technik und Wissens beim Kathodischen Korrosionsschutz bieten.

2. Chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton

Neben dem abgestimmten Einsatz der jeweiligen Tragfähigkeiten von Stahl und Beton ist ein weiterer Grund für den seit rund 150 Jahren währenden Erfolg des Konstruktionswerkstoffes Stahlbeton der vom Beton bereitgestellte Korrosionsschutz des Stahls. Durch den hohen pH-Wert der Betonporenlösung von über pH 13 bildet sich auf der Stahloberfläche ein nur wenige Atomlagen dicker Passivfilm, der den darunter liegenden Stahl vor weiterer Auflösung schützt.

Die Passivität des Bewehrungsstahls kann verloren gehen, wenn der ihn umgebende Beton seine Alkalität verliert oder wenn ein kritischer Chloridgehalt an der Stahloberfläche überschritten wird. Der erstgenannte Vorgang ist unter Praxisbedingungen die Karbonatisierung des Betons. Hierbei diffundiert üblicherweise CO_2 aus der Umgebungsluft in den Beton ein und durch Bildung von CaCO_3 bei Umsatz von Ca(OH)_2 führt dies zu einer Absenkung des pH-Werts des Betons, wodurch sich der Passivfilm auflöst und der Stahl dadurch korrosionsbereit vorliegt. Die Depassivierung durch Karbonatisierung des Betons und anschließende aktive Korrosion des Stahls mit einhergehenden Schädigungen der Tragstruktur kann in gemäßigten Breiten durch Wahl eines geeigneten Betons (mit hoher Alkalitätsreserve) und einer ausreichenden Betondeckung zielsicher verhindert werden.

Die Gewährleistung der Dauerhaftigkeit bei Chloridexposition stellt zumeist ein ungleich größeres Problem dar. Chlorid Ionen diffundieren in den Beton (oder werden von kapillar eingesogenem Wasser mittransportiert) und treten, wenn sie die Stahloberfläche erreichen, in Interaktion mit dem Passivfilm des Stahls. Wird eine kritische Konzentration an freien Chloridionen am Stahl überschritten, versagt der Passivfilm des Stahls und Korrosion kann einsetzen.

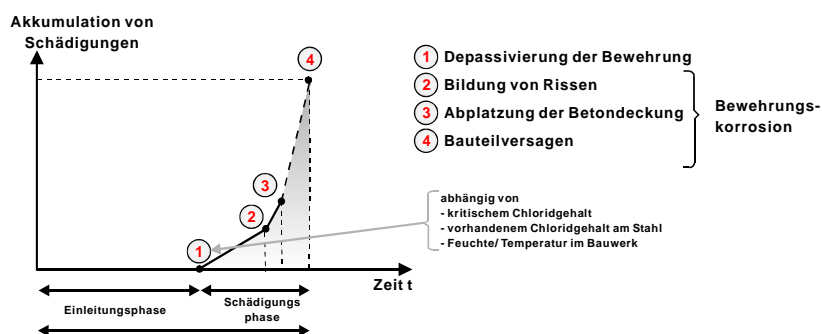


Bild 1: Zeitlicher Ablauf der akkumulierten Schädigungen an Bauwerken mit chloridinduzierter Korrosion /9/

Den zeitlichen Ablauf der akkumulierten Schädigungen an Stahlbetonbauwerken in chloridhaltiger Exposition zeigt Bild 1. Daraus ist ersichtlich, dass eine Schädigung des Stahlbeton durch Chloride erst nach Beginn der Korrosion stattfindet.

Elektrochemisch betrachtet ist ein passiver Stahl in anodische Richtung leicht polarisierbar, d.h. bereits geringe aufgebrachte Ströme führen zu großen Potentialverschiebungen. Oder umgekehrt ausgedrückt: eine Verschiebung des Potentials des passiven Bewehrungsstahls, die durch z.B. unterschiedliche Belüftungszustände innerhalb eines Bauwerks hervorgerufen werden kann, führt nur zu geringen anodischen Stromdichten (siehe Bild 2). Erst bei sehr hohen Potentialverschiebungen, die bei normalen Stahlbetonbauten unüblich sind, kommt es zu hohen Strömen im transpassiven Bereich der Sauerstoffbildung. Sind nun Chloridionen am Stahl, kann bei Überschreiten eines sog. Durchbruchpotentials eine Lochfraßkorrosion initiiert werden, die meist durch sehr hohe Korrosionsraten gekennzeichnet ist.

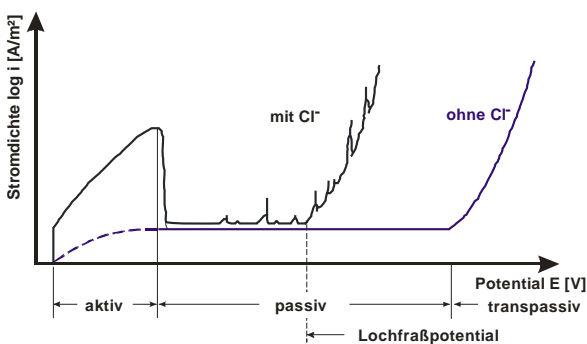


Bild 2: Stromdichte-Potential-Kurve von Stählen in Beton

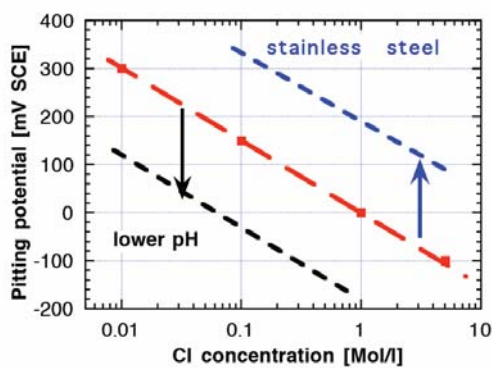


Bild 3: Lochfraßpotential in Abhängigkeit des Chloridgehaltes der Porenlösung [11]

Die Höhe dieses Durchbruch- oder auch Lochfraßpotentials ist nun maßgebend von der Chloridkonzentration in der Betonporenlösung am Stahl abhängig: je höher die Chloridkonzentration am Stahl, desto geringer sind die Lochfraßpotentiale und desto geringere Potentialverschiebungen initiieren Lochfraßkorrosion. Ist nun zusätzlich der pH-Wert durch z.B. Auslaugung oder Karbonatisierung, wird

das Lochfraßpotential weiter verringert. Durch den Einsatz von nichtrostendem Stahl kann dieses Lochfraßpotential auf meist ungefährliche, da nicht baupraktisch relevant, Werte erhöht werden.

Bei der Korrosion (z.B. der Lochfraßkorrosion) von Stahl in Beton gehen positiv geladene Eisenionen (Fe^{2+}) in Lösung, wobei Beton den Elektrolyten darstellt. Die überschüssigen Elektronen (e^-) werden an der Grenzfläche Stahl/Elektrolyt von Wasser und Sauerstoff, der üblicherweise in ausreichender Menge im Wasser gelöst ist, unter Bildung von negativ geladenen Hydroxydionen (OH^-) aufgenommen, so dass sowohl im Eisen als auch im Elektrolyten das Ladungsgleichgewicht erhalten bleibt. Die Eisenauflösung (Bildung von Fe^{2+}) wird als anodischer Teilprozess, die Bildung von Hydroxydionen (OH^-) als kathodischer Teilprozess bezeichnet, Bild 4. Vereinfacht betrachtet, entspricht die Korrosion in einem Korrosionselement den Vorgängen in einer Batterie mit einem elektrischen und einem elektrolytischen Teil eines Stromkreislaufes

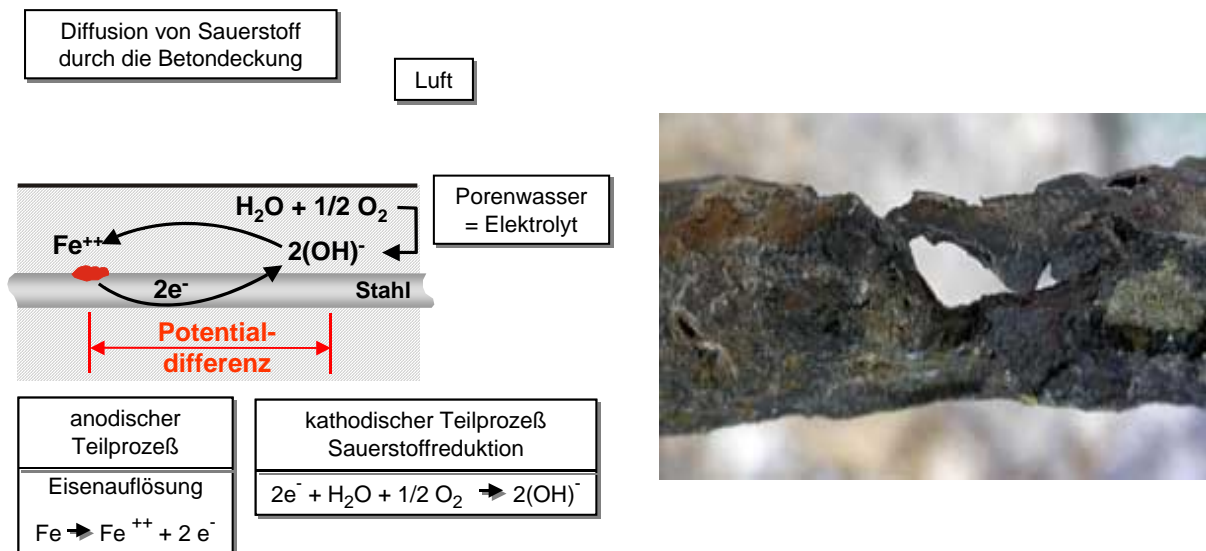


Bild 4: Schematische Darstellung der Korrosion von Betonstahl, links und durch chloridinduzierte Korrosion geschädigter Stahl, rechts /9/, /15/

Chloridinduzierte Lochfraßkorrosion von Stahl im Beton führt unter normalen Umständen (z.B. Vorhandensein von Wasser im Beton) zu hohen Korrosionsraten, da bei einer kleinen Korrosionsnarbe eine große Kathodenfläche den Korrosionsprozess „antreibt“. Die mit diesen hohen Korrosionsraten verbundenen Stahlabtragsraten können den Stahlquerschnitt der Bewehrung innerhalb kurzer Zeit deutlich reduzieren, siehe Bild 4, rechts. Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass wenn Risse die Bewehrung kreuzen, v.a. wenn es sich dabei um Trennrissen handelt, die Korrosionsinitiierung durch Chloride ohne Einleitungsphase nach Bild 1 sehr zügig stattfinden kann.

3. Instandsetzungsprinzipien nach Rili SIB

Die in Bild 4 gezeigten Korrosionsprozesse können im Rahmen eines Korrosionsschutzes wie folgt unterbunden werden:

- Vermeiden der anodischen Teilreaktion
Dieses Ziel kann auf verschiedene Weise erreicht werden. Eine erste Möglichkeit besteht darin, das alkalische Milieu in Umgebung der Bewehrung wiederherzustellen (bzw. die vorhandenen korrosionsauslösenden Chloride zu entfernen). Eine zweite Möglichkeit besteht darin, dass man die Bewehrung in einem geschlossenen Regelkreis zwingt, kathodisch zu wirken (Kathodischer Korrosionsschutz, KKS). Eine dritte Möglichkeit besteht schließlich darin, den Elektrolyten durch eine wirksame Beschichtung vom Stahl zu trennen und somit den anodischen Teilprozess zu unterbinden.
- Vermeiden der kathodischen Teilreaktion
In ausreichend feuchtem Beton kann die kathodische Reaktion bei unbeschichteter Bewehrung nur dann unterbunden werden, wenn kein Sauerstoff zur Oberfläche der Bewehrung gelangen kann. Unter baupraktischen Verhältnissen ist das Unterbinden des kathodischen Teilprozesses jedoch nur in seltenen Sonderfällen realisierbar. Die Richtlinie des DAfStb sieht diese Möglichkeit als Instandsetzungsprinzip deshalb nicht vor.
- Unterbinden des elektrolytischen Teilprozesses
Durch Absenkung des Wassergehaltes im Beton kann die Korrosionsgeschwindigkeit auf praktisch vernachlässigbare Werte gesenkt werden, da sämtliche Transportvorgänge im Beton gehemmt werden.

Aus diesen Möglichkeiten, den Korrosionsprozess zu unterbinden, ergeben sich die grundsätzlichen Korrosionsschutzprinzipien nach der Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ (Rili-SIB) des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton /16/:

- R Wiederherstellen des aktiven Korrosionsschutzes durch Repassivierung der Bewehrung bzw. durch dauerhafte Realkalisierung des Betons in Umgebung der Bewehrung.
- W Absenken des Wassergehaltes auf Werte, die sicherstellen, dass der elektrolytische Teilprozess soweit unterbunden wird, dass die weitere Korrosionsgeschwindigkeit auf ein unschädliches Maß reduziert ist.
- C Beschichtung der Stahloberflächen, um den anodischen (und kathodischen) Teilprozess im Bereich der Instand gesetzten Stahloberflächen zu unterbinden.
- K Kathodischer Korrosionsschutz, um die Bewehrung in einem geschlossenen Regelkreis zu zwingen ausschließlich kathodisch zu wirken.

Das Korrosionsschutzprinzip R sieht als konventionelle Instandsetzungsvariante das Entfernen des chloridbelasteten Betons (Chloridbelastung über den kritischen Chloridwerten) und das anschließende Reprofilieren vor. Alternativ können durch elektrochemische Verfahren die Chloride aus dem Beton extrahiert werden (Prinzip Rx). Das Prinzip W bei Chloridbelastung ist mit einem so hohen technischen Risiko verbunden, dass nach gängiger Expertenmeinung diese Variante nicht als anerkannte Regel der Technik angesehen werden kann (vergleiche hierzu Kapitel 9.1). Auch das Prinzip C ist bei der Baustellenanwendung mit erheblichen technischen Risiken verbunden.

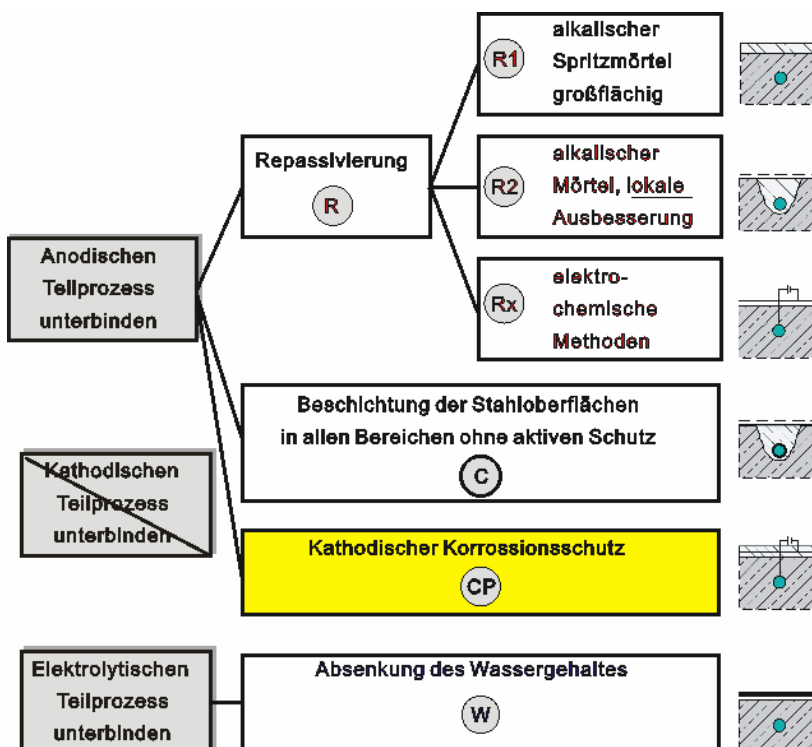


Bild 5: Korrosionsschutzprinzipien nach Rili-SIB

4. Wirkungsweise des Kathodischen Korrosionsschutzes bei Stahlbetonanwendung

Das Prinzip des elektrochemischen Schutzverfahrens „Kathodischer Korrosionsschutz (KKS)“ besteht darin, durch Einleitung eines Gleichstromes oder durch Kurzschluss mit einem unedlen Metall (sog. galvanische Anode) den Korrosionsvorgang von unlegierten oder niedriglegierten Stählen (z.B. Betonstahl) in einem ausgedehnten Elektrolyten (Böden, Meerwasser, bei Anwendung in Stahlbeton: Beton) elektrisch zu beeinflussen. Das Aufprägen dieses Gleichstroms (Schutzstrom) bewirkt eine Verschiebung des elektrochemischen Potentials des zu schützenden Metalls in negative Richtung, wodurch die Metalloberfläche kathodisch polarisiert wird und schädigende Korrosion unterbunden wird, siehe Bild 6, Bereich C.

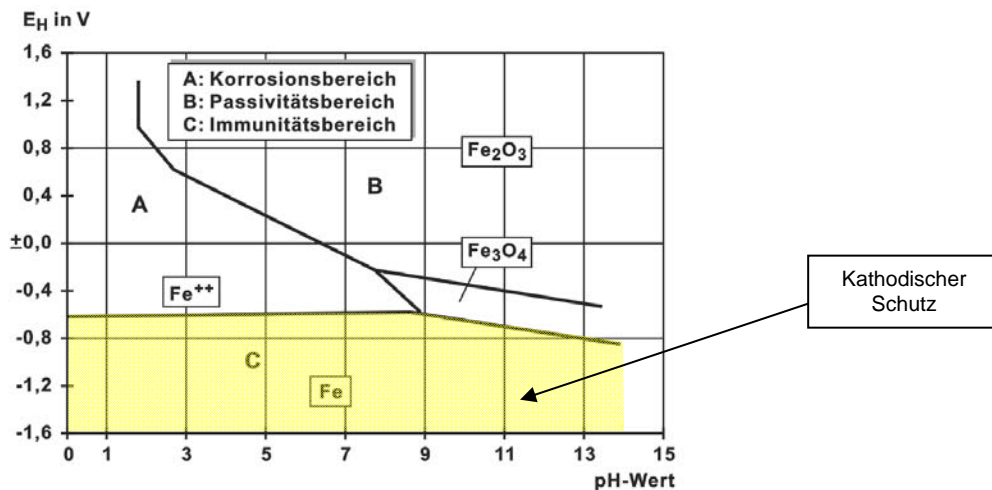


Bild 6: Pourbaix-Diagramm: Potential-pH-Diagramm für Eisen im Wasser bei 25 °C

Bildlich ausgedrückt: durch den kathodischen Schutz werden von außen in den Korrosionsprozess so viele Elektronen „gepumpt“, dass der Elektronenüberschuss im Metall der anodischen Teilreaktion entgegengewirkt und diese dadurch maßgebend verlangsamt abläuft. Dabei ist es für die kathodische Schutzwirkung unerheblich, ob der Schutzstrom mit galvanischen Anoden oder durch eine Gleichspannungsquelle erzeugt wird.

Bei KKS-Systemen mit Fremdstrom muss zur Aufprägung eines Schutzstroms zunächst eine dauerhafte und korrosionsresistente Anode (Inertanode, z.B. Titan) an den Beton angekoppelt und an den Pluspol eines als Spannungsquelle dienenden Gleichrichters angebracht werden. Der Minuspol der Gleichspannung wird an die Bewehrung angeschlossen, siehe Bild 7. Nach Einschalten der Gleichspannung wird die Bewehrung kathodisch polarisiert und die Stahlkorrosion weitgehend unterbunden.

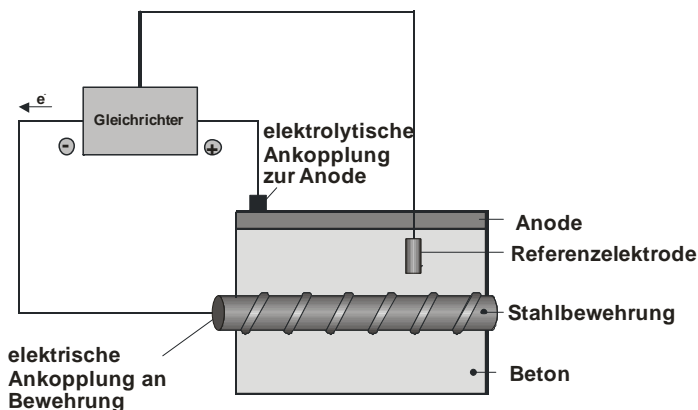


Bild 7: KKS als Fremdstromsystem für Stahlbetonbauwerke

Durch die Betrieb eines KKS-Systems entsteht ein elektrisches Feld zwischen der Bewehrung (Kathode) und der Anode (gleichgültig, ob Opferanode oder Inertanode mit Fremdstrom): Alle positiv geladenen Ionen (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) wandern zur Bewehrung und alle negativ geladenen Ionen (OH^- , Cl^- , SO_4^{2-}) wandern von der Bewehrung weg in Richtung Anode. Dies führt als positive Konsequenz zum einen zu einer „Entsalzung“ in der Nähe der Bewehrung über die Zeit. Dies kann die potentielle Korrosionsgefährdung für die Bewehrung u.U. erheblich reduzieren. Zum anderen führt eine Bildung von OH^- - Ionen (hervorgerufen durch den kathodischen Schutz) zu einer Erhöhung der Alkalität nahe der Bewehrung, wodurch der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt erhöht und somit der Korrosionsschutz der Bewehrung verbessert wird.

Mögliche negative Konsequenzen durch den Kathodischen Schutz von Stahlbetonbauwerken können sein /13/:

- Bei extrem niedrigen Potentialen kann u.U. erhebliche Wasserstoffentwicklung an der Kathode auftreten. Dieser Effekt führt zu einer gewissen Gefahr wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion bei Spannstählen, sofern solche Stähle im zu schützenden Bauwerk vorhanden sind. In solchen Fällen muss das Schutzpotential entsprechend begrenzt werden, um die Wasserstoffbildung sicher zu verhindern.
- Reduzierung der Verbundwirkung von Bewehrung zu Beton: bei sehr hohen Schutzströmen, die um den Faktor 1000 über den für Stahlbeton üblichen Schutzstromdichten lagen, wurde eine Reduzierung der Verbundfestigkeiten um rd. 30 % festgestellt. Bei für Stahlbeton üblichen Schutzstromdichten wurde eine solche Schädigung des Verbundes nicht nachgewiesen.
- Gefahr einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) durch Erhöhung der pH-Wertes und der Alkalikonzentration (Na^+ , K^+) im Bereich der geschützten Bewehrung: hier sollte überprüft werden, ob bei der Herstellung des zu schützenden Bauwerks alkali-empfindliche Zuschläge (Opalsande, Flint oder präkambrische Grauwacke) verwendet wurde. Ggf. müssen flankierende Maßnahmen (Redzierung der Schutzströme oder des Wassergehaltes des Betons) ergriffen werden.
- Ansäuerung im Bereich der Anode mit Entstehung von sehr niedrigen pH-Werten im Bereich der Anode, wodurch es zu einer elektrolytischen Entkoppelung von Anode zu Ankoppelungsmörtel kommen kann. Um dies zu verhindern, ist gegebenenfalls für entsprechende Belüftung und Reduzierung der Stromdichten an den Anoden zu sorgen.

Um die letztgenannten möglichen nachteiligen Effekte des Kathodischen Korrosionsschutzes zu unterbinden, sind die Schutzströme auf ein Maß zu reduzieren, das erforderlich ist, um die Bewehrung

vor Korrosion zu schützen, d.h., unnötig hohe Ströme müssen durch entsprechende Planung, Ausführung und Überwachung des KKS-Systems verhindert werden.

Wichtig für die Anwendbarkeit des Kathodischen Korrosionsschutzes ist, dass die Schädigung durch die Korrosion des Stahls noch nicht soweit fortgeschritten ist, dass die Tragfähigkeit des Bauwerks nicht mehr garantiert werden kann (vergleiche Bild 1). Der vorhandene Querschnittsverlust der Bewehrung infolge Korrosion ist deshalb durch eine umfassende Bauwerksdiagnose festzustellen und ggf. die Tragfähigkeit rechnerisch nachzuweisen.

5. Schutzkriterien

Zur laufenden Überwachung der Funktion der KKS-Anlage bzw. des funktionierenden Schutzes des Stahlbetonbauteils werden üblicherweise Referenzelektroden eingebaut. Diese sind möglichst nahe der zu schützenden Bewehrung anzubringen, um bei späteren Potentialmessungen den Einfluss des Betonelektrolytwiderstands klein zu halten.

Als einfach zu ermittelndes und zugleich sicheres Verfahren zur Beurteilung bzw. Überprüfung von kathodischen Schutzanlagen haben sich Depolarisationsmessungen durchgesetzt. Bei diesen Messungen wird das Schutzsystem ausgeschaltet und der anschließende Abfall des Stahl/Beton-Potentials gemessen und registriert, siehe Bild 8. Bei Betonstahlbewehrung in Beton ist nach DIN 12696:2000-06 eine 100 mV-Depolarisation innerhalb von 24 h anzustreben, was bei Annahme einer Steigung der anodischen Tafelgeraden von 100 mV/dec der Verringerung der Korrosionsschutzdichte durch den KKS um eine Dekade entspricht.

Weitere Schutzkriterien zur Beurteilung, ob der kathodische Schutz funktioniert, können nach /1/ und /4/ das Potentialkriterium und das Polarisationskriterium sein: beim Potentialkriterium muss das Ausschaltpotential < -720 mV bezüglich Ag/AgCl/0,5 M KCl-Referenzelektrode; minimal -1100 mV (Betonstahl) bzw. -900 mV (Spannstahl) sein. Dieses Kriterium wird am leichtesten bei sehr durchfeuchtetem Beton und aktiven Bereichen erreicht. Das Polarisationskriterium wird über einen mindestens „300 mV Shift“ (ins Negative) im Vergleich zum Ruhepotential (28 Tage nach Einschalten der Schutzspannung) nachgewiesen. Die neu überarbeitete Norm, deren Entwurf seit Oktober 2009 /2/ vorliegt, lässt die Anwendung weiterer Schutzkriterien zu.

Der große Vorteil des kathodischen Korrosionsschutz im Vergleich zu herkömmlicher Instandsetzung liegt dabei in der ständigen Wartungs- und Kontrollmöglichkeit: sowohl die Funktion der KKS-Anlage als auch das Erreichen der Schutzkriterien kann jederzeit (bei den meisten Anlagen per Funkmodem über Fernabfrage) abgerufen und kontrolliert werden. Dagegen kann der Erfolg einer konventionellen

Instandsetzung („Unterbindung der Korrosion der Bewehrung“) üblicherweise nicht oder nur stichprobenhaft überprüft werden.

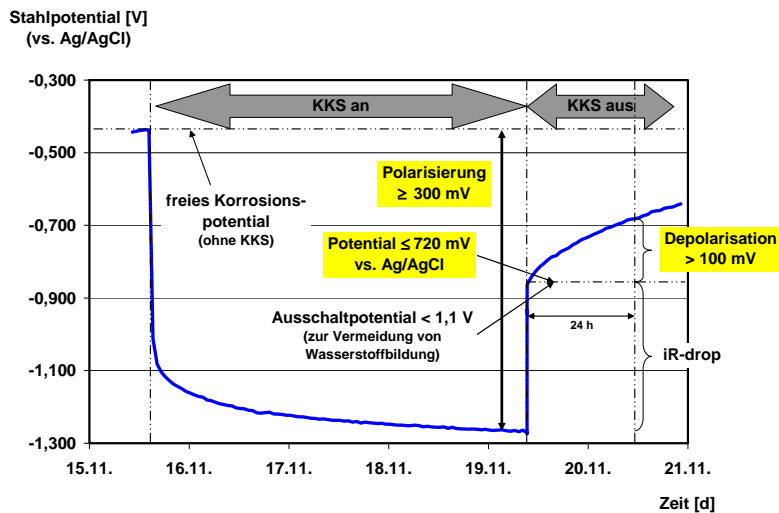


Bild 8: Beispielhafte Ausschaltmessung mit Darstellung der Schutzkriterien nach [1] und [4]

6. Anodensysteme

Als Anodensysteme haben folgende Typen von Anoden eine größere Anwendung gefunden /13/:

- **Karbon-Anoden:** diese sind bei trockenen Umgebungsbedingungen und niedrigen erforderlichen Schutzstromdichten bei geringen Lebensdauern zu empfehlen.
- **Thermisch gesprühte Metall-Anoden:** diese können auch bei komplexen Oberflächenstrukturen eingesetzt werden. Empfohlen werden hohe Umgebungsfeuchten (Unterwasserbereich), um eine ausreichend hohe Treibspannung sicher zu stellen. Auch hier sind keine lange Nutzungsdauern zu erwarten.
- **Leitfähige Beschichtungen:** empfohlen bei niedrigen erforderlichen Schutzstromdichten. Langzeiterfahrungen liegen kaum vor.
- **Titanbasierte Anoden:** für diesen Typ von Anoden liegen die meisten Langzeiterfahrungen vor. Nach /8/ kann von einer langen Lebensdauer auch bei hohen Schutzstromdichten und alternierenden Expositionen ausgegangen werden.

Für KKS-Anlagen im Stahlbetonbau sind verschiedene Anodensysteme entwickelt worden:

- **Netzförmige Titananoden in zementöser Ankoppelung (Bild 9):**
Netzförmige Anoden aus MMO beschichtetem Titan wurden für den kathodischen Schutz

von Stahl in Beton erstmals 1985 eingesetzt und sind heute am weitesten verbreitet. Die Anodennetze werden mit einem speziellen Ankoppelungsmörtel an den Beton angekoppelt und ermöglichen eine sehr gleichmäßige Schutzstromverteilung. Dieses Anodenmaterial zeichnet sich durch eine hohe Langlebigkeit (rd. 25 Jahre) aus – die Lebensdauer wird praktisch nur durch die Einbettmasse bestimmt. Mit diesem System wurden bis heute weltweit mehr als 1 Mio. m² Betonoberfläche kathodisch geschützt.

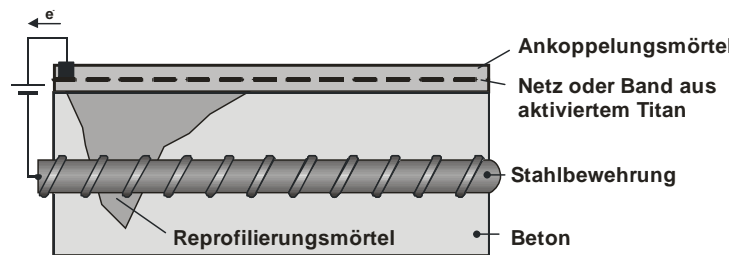


Bild 9: Systemaufbau mit aktiviertem Titannetz

▪ **Leitfähige Beschichtung mit spezieller Primäranode (Bild 10):**

Leitende Beschichtungen als Anoden basieren auf Anstrichen, welchen z.B. Ruß oder Graphit zugesetzt wird. Das System eignet sich am besten für Bauwerke mit geringem Schutzstrombedarf. Häufig wird es bei Wohngebäuden mit geringen Bewehrungsgraden bzw. geringer Korrosionsaktivität eingesetzt oder wenn aus statischen Gründen eine Zunahme des Gewichtes nicht möglich ist. Langzeiterfahrungen liegen derzeit kaum vor. Dieses Anodensystem wurde in jüngster Zeit mehrfach erfolgreich eingesetzt.

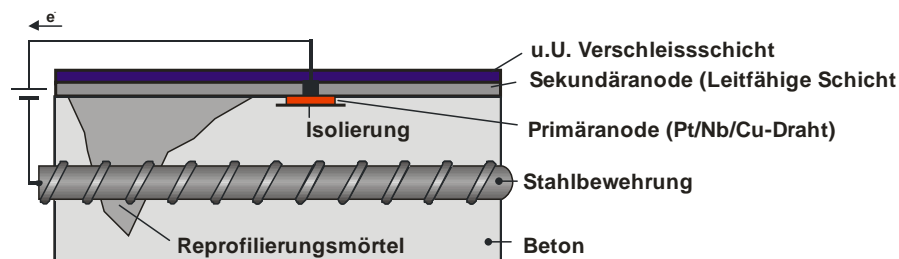


Bild 10: Aufbau des Anodensystems mit leitender Beschichtung

▪ **Titan Draht- oder Bandanoden (Bild 11):**

Die Bandanode besteht aus MMO-beschichtetem Titan und wird in eingefräste Fugen installiert. Dieses System wird empfohlen, wenn aus statischen Gründen keine Zusatzmasse aufgebracht werden darf. Bei dieser Technik ist jedoch eine ausreichende Betondeckung erforderlich.

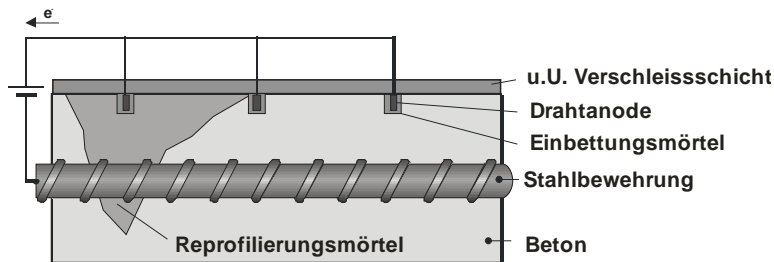


Bild 11: Systemaufbau mit aktivierten Titanetzbandern

▪ **Diskrete Stabanoden eingebettet in Bohrlöcher (Bild 12):**

Stabanoden werden seit 1985 im Stahlbetonbau meist an Bauwerken verwendet, die einen uneinheitlichen Schädigungsgrad oder Bewehrungsgrad aufweisen, oder bei denen eine unzugängliche Bewehrungslage zu schützen ist. Auch zum Schutz von korrodierenden Walzträgern in Beton wurden Stabanoden (oder auch Kernanoden) eingesetzt. Diese werden in Bohrlöcher des Konstruktionsbetons montiert. Das Bohrloch wird mit einem zementgebundenen, hochalkalischem, schwindfreien Mörtel hinterfüllt, welcher den elektrolytischen Kontakt zwischen Anode und Konstruktionsbeton herstellt. Zur Vermeidung von Kurzschlüssen muss beim Einbau der Anoden darauf geachtet werden, dass diese nicht in elektrischen Kontakt mit Bewehrungsstahl oder sonstigen Stahlbauteilen (z.B. Rödeldraht) kommen. Dieses System ist eingehend praxisbewehrt und besitzt eine hohe Lebensdauer (rd. 25 Jahre).

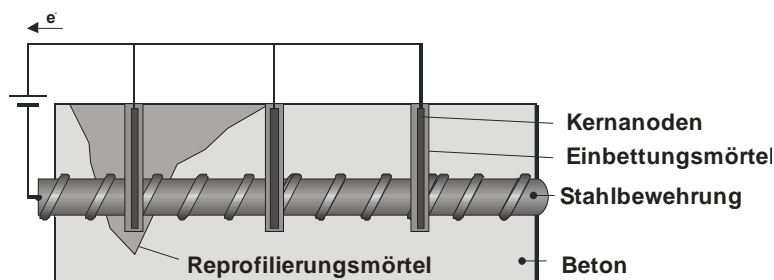


Bild 12: Systemaufbau mit Kernanoden

▪ **Galvanische Anoden (Bild 13):**

Der kathodische Schutz kann grundsätzlich mit Hilfe von Opferanoden ohne Anlegen einer äußeren Spannung oder mit Inertanoden über einen von außen über eine Spannungsquelle angelegten Schutzstrom erzielt werden. Wenn Opferanoden verwendet werden, muss das Potential der Opferanode negativer sein als das Potential der korrodierenden Bewehrung, um eine ausreichende Treibspannung zwischen Bewehrung und Anode zu erzielen, damit der kathodische Schutz für die Bewehrung in ausreichendem Maße wirksam ist. Als Materialien für Opferanoden im Stahlbetonbau werden üblicherweise

Zink, Aluminium, Magnesium oder spezielle Legierungen dieser Metalle verwendet. Die Schutzströme, die von den Anoden zur Bewehrung fließen, verhalten sich nach den Faraday'schen Gesetzen proportional zum Masseverlust der Opferanoden. Daher können die Dimensionen der Opferanoden, die erforderlich sind, um die Bewehrung für eine definierte Zeit vor Korrosion zu schützen, in einfacher Weise rechnerisch abgeschätzt werden.

Opferanodensysteme kommen i.d.R. nur dort zum Einsatz, wo aufgrund der Umgebungsbedingungen und Betoneigenschaften mit ausreichend hohen Treibspannungen zwischen Anoden und Bewehrung gerechnet werden kann. Sie werden daher häufig für den Korrosionsschutz von Stahlbetonbauteilen im Meerwasserbereich verwendet, da insbesondere im Unterwasserbereich in der Regel hohe Anodenaktivitäten und ausreichende Treibspannungen erzielt werden können.

- o Spritzverzinkung (Bild 13)

Das Schutzsystem mit Opferanode besteht aus einer 0,2 – 0,3 mm dicken Zinkschicht, die mittels Lichtbogenspritzverfahren auf die vorbereitete, gereinigte Betonoberfläche aufgetragen wird. Das System funktioniert nachweisbar, wenn dauerhaft stark erhöhte Chloridgehalte vorhanden sind. Bei zu geringen Chloridgehalten kommt es nach kurzer Zeit zu einer Inaktivierung des Zinks, wodurch die Anwendbarkeit des Verfahrens deutlich eingeschränkt ist. Die Lebensdauer des Systems beträgt rd. 10 bis 15 Jahre.

- o Zink-Hydrogel-Anode

Dabei handelt es sich um eine Zinkschicht mit einseitig aufgebracht Gelschicht, die mehrere Funktionen erfüllt: Befestigung der Zinkschicht auf der Betonoberfläche, Aktivierung der Zinkschicht und Sicherstellung einer guten Leitfähigkeit zwischen Zink und Betonoberfläche. Dieses Anodensystems wurde mehrfach bei lokal begrenzten Korrosionsproblemen eingesetzt, wobei von geringen Lebensdauern ausgegangen werden muss.

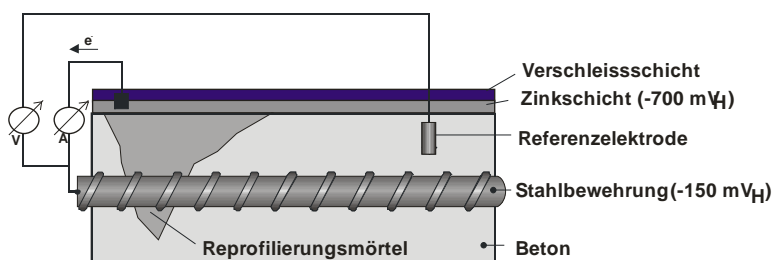


Bild 13: Systemaufbau mit galvanischen Anoden

7. Anwendungsbeispiele

Im Rahmen der Symposien zum Kathodischen Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken wurden in den letzten Jahren zahlreiche Anwendungsbeispiele vorgestellt und diskutiert. Nachfolgend sollen kurz einige Bauwerk- bzw. Bauteilgruppen exemplarisch aufgezeigt werden, an denen eine Instandsetzung mit KKS erfolgreich und wirtschaftlich (siehe nachfolgendes Kapitel) durchgeführt wurde:

- Zwischendecken und Bodenplatten von Parkhäusern und Tiefgaragen: aufgrund der starken Chloridexposition sind diese horizontalen, direkt befahrenen Bauteile besonders häufig stark von Korrosion betroffen, v.a. dann, wenn eine Beschichtung fehlt bzw. nicht mehr funktionstüchtig ist und Risse (v.a. Trennrisse) die tragende Bewehrung kreuzen. Ein Großteil der in den letzten Jahren in Deutschland ausgeführten KKS-Anwendungen bei Stahlbauwerken waren solche Parkflächen. Hier kamen meist Anoden aus Titannetzen oder eingeschlitzten Titanbändern zum Einsatz, siehe z.B. /11/, neuerdings auch leitende Beschichtung.
- Stützen- und Wandfüße von chloridexponierten Parkflächen und Straßen: durch Einsatz eines KKS-Systems kann meist auf kostenintensive Abstützmaßnahmen verzichtet werden. Eingesetzt werden häufig netzartige Anoden ggf. in Kombination mit Kernanoden bei besonders hohen Bewehrungsgehalten /10/.
- Konsolbereiche bei Dehnfugen: gelangt chloridhaltiges Wasser durch z.B. undicht gewordene Dehnfugen an Konsolbereiche, ist eine erhöhte Korrosionsgefahr durch evtl. vorhandene Rissbildung an der Konsole gegeben. Gerade an hochbelasteten Konsolen Bonaustausch durchzuführen, ist auf Grund der massiven Eingriffe in die Bausubstanz problematisch. Aus diesem Grund stellt gerade an solchen Stellen der Einsatz eines KKS-Systems mit Titanbändern oder –kernanoden eine sinnvolle Instandsetzungsvariante dar.
- Hohlkastenbodenplatten bei Spannbetonbrücken: leider kommt es immer wieder vor, dass infolge mangelnder Wartung der Entwässerung von Brücken, chloridhaltige Wässer über längere Zeiträume in Spannbetonhohlkästen ansteht und die Konstruktion schädigt. Ein Abtrag des chloridbelasteten Betons ist aus Gründen der Bauausführung (meist nur sehr dünne Bodenplatte mit der Gefahr des „Durchschießens“ bei HDW-Strahlen) und aus Gründen der Tragsicherheit (Stichwort: Torsionssteifigkeit) meist problematisch. Auch hier stellt KKS mit Titanbändern oder –netzen eine sinnvolle Alternative dar.

Weitere Bauteile, bei denen KKS erfolgreich eingesetzt wurde sind: Tunnel, Brücken aus Walzträgerim-Beton-Konstruktion, Meeresbauwerke aus Stahlbeton wie Kaimauern, Trockendocks, Stahlbetonkonstruktion mit Fußgängerverkehr (z.B. Laubengänge, Einkaufspassagen), etc.

8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (z.B. /14/) zeigen, dass der Einbau und Betrieb eines KKS-Systems gegenüber einer herkömmlichen Instandsetzungsmaßnahme (Abtrag des chloridbelasteten Betons und Reprofilierung mit anschließender Beschichtung) bei Betrachtung der reinen Baumaßnahmen nicht per se „billiger“ ist. So erhalten bei Ausschreibungen, bei denen die Preise beider Instandsetzungskonzepte abgefragt werden, in vielen Fällen die konventionellen Instandsetzungen den Zuschlag.

Häufig sind aber Randbedingungen vorgegeben, die den Einsatz eines KKS-Schutzes für Stahlbetonbauten in der Gesamtbetrachtung gegenüber der konventionellen Instandsetzung deutlich wirtschaftlicher gestalten. Hierzu einige Beispiele:

- **Kosten für Abstützungsmaßnahmen:** bei konventionellen Instandsetzungsmaßnahmen fallen durch die Entfernung von Beton, der sowohl als Druckzone wie auch zur Übertragung der Zugkräfte der Bewehrung infolge Verbund erforderlich ist, und der während der Baumaßnahme verringerten Tragfähigkeit z.T. sehr hohe Kosten für Abstützungsmaßnahmen an. So sind üblicherweise Lasten in Stützen, Deckensystemen und Unterzügen während der Baumaßnahme sicher abzuleiten.
Bei einer Baumaßnahme wäre durch Entfernen des chloridbelasteten Betons bei einer Bodenplatte der Lastabtrag bei anstehendem Grundwasser nicht mehr gesichert gewesen. Die erforderlichen Maßnahmen für Auflasten und Abstützung hätten den Kostenrahmen einer herkömmlichen Instandsetzungsmaßnahme bei weitem gesprengt, so dass die Installation eines KKS-Systems die wirtschaftlichste Alternative war.
- **Verkürzung der Bauzeit:** KKS-Systeme können in den meisten Fällen im Vergleich zu herkömmlichen Instandsetzungen in kürzeren Bauzeiten installiert werden. Durch Reduktion des Nutzungsausfalls kann ein KKS-System wirtschaftlicher werden.
- **Reduktion des Baulärms und der Staubentwicklung und der dadurch bedingten Reduktion von Mietminderungen bei Einbau eines KKS-Systems.**
- **Verminderte Zugänglichkeit:** wenn Chloridbelastung an unzugänglichen oder schwer zugänglichen Stellen vorliegt, ist KKS häufig die einzige Möglichkeit, einen Rückbau des Bauwerks zu verhindern. Beispiele hierzu sind: Chloridbelastung an der Bauwerksaußenseite durch Meerwasser und chloridhaltige Böden bei Tunnel, Brückenbauteilen, Stützwänden, etc.

In /9/ ist ein Beispiel von einer Brücke vorgestellt, bei der die Chloridbelastung von einer darüber verlaufenden Fahrbahn herrührt. Da die Brücke bis zu 5 m überschüttet ist, wäre für eine Instandsetzung ein sehr kostenintensives Freigraben und Betonersatz erforder-

lich gewesen. Durch Einsatz eines KKS-Systems konnten die Kosten gegenüber einer konventionellen Instandsetzung annähernd halbiert werden.

- Verminderte Eingriffe in die Bausubstanz: gerade bei Bauteilen, auf die sehr hohe Lasten ruhen (Stützen, Unterzüge, Brückenüberbauten), ist der Abtrag der chloridbelasteten Betonschicht hinsichtlich der Tragfähigkeit sehr problematisch. An den Repofilierungsbeton und die Vorbereitung der neu entstehenden Arbeitsfuge sind häufig sehr hohe Anforderungen zu stellen, was mit erhöhten Kosten und/oder vermehrten Betonabtrag (Austausch des gesamten hoch beanspruchten Tragwerks) verbunden ist. Dadurch, dass beim KKS der hinsichtlich Lasten und Chloriden hochbelastete Beton im Regelfall verbleiben kann, können die Eingriffe in die Bausubstanz minimiert werden.
- Dauerhaftigkeit von Beschichtungsmaßnahmen: Nach Durchführung einer konventionellen Instandsetzung werden die Bauteile in den meisten Fällen beschichtet oder abgedichtet. Gerade bei rissüberbrückenden Beschichtungen kann die Lebensdauer bei hoher mechanischen Belastung z.T. unter 10 Jahren liegen. Die Beschichtung muss dann wieder erneuert werden. Bei kathodisch geschützten Bauteilen sind Beschichtungen zur Sicherstellung der Dauerhaft nicht zwingend erforderlich (häufig werden aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit starre OS8-Systeme verwendet, die deutlich längere Lebensdauern haben), so dass für die Restnutzungsdauer des geschützten Bauwerks Kosten für Beschichtungsmaßnahmen reduziert werden können.

Ein weiterer Vorteil eines KKS-Systems ist, dass der Zustand des geschützten Bauteils kontinuierlich überwacht werden kann. Schäden können deshalb früher festgestellt werden, was über den Nutzungszeitraum des Bauteils betrachtet, die Instandsetzungskosten reduziert.

9. Vertrags- und Haftungsrechtliche Gesichtspunkte

9.1 KKS als „Anerkannte Regel der Technik“

Der sachkundige Planer einer Instandsetzungsmaßnahme schuldet dem Bauherrn einen Werkerfolg, wobei die aktuelle Gesetzesprechung nicht den Weg, wie dieser geschuldete Werkerfolg erreicht werden kann, vorgibt. Allerdings besteht für den Planer das Gebot, risikoarm und sicher auch hinsichtlich der Dauerhaftigkeit einer Instandsetzungsmaßnahme zu planen. Eine solche risikoarme Planung wird erreicht, wenn im Rahmen der anerkannten Regeln der Technik geplant wird. Erfolgt eine Planung außerhalb der anerkannten Regeln der Technik, besteht gegenüber dem Bauherrn ein Aufklärungsbedarf über mögliche Risiken.

Die Frage, die sich im Rahmen einer Instandsetzungsplanung mit KKS ergibt, lautet: Handelt es sich bei dem Kathodischen Korrosionsschutz um eine Maßnahme, die den anerkannten Regeln der Technik entspricht? Diese Fragestellung wurde in letzten Jahren mehrfach von Juristen behandelt. Sowohl Motzke [6] als auch König [7] vertreten dabei die Meinung, dass es sich bei dem Kathodischen Korrosionsschutz um eine Instandsetzungsmaßnahme handelt, die den anerkannten Regeln der Technik entspricht, da er seit Oktober 2001 in der Instandsetzungsrichtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton wie auch seit 2000 in der DIN EN 12696 geregelt ist.

Insofern bestehen nach aktueller Rechtsmeinung keine Bedenken, wenn ein Planer, nachdem er den Bauherrn über die Vor- und Nachteile verschiedener technisch möglicher Lösungen umfassend aufgeklärt hat, das Instandsetzungsprinzip KKS empfiehlt. Dabei muss dem Bauherrn u.a. vermittelt werden, dass evtl. zusätzliche Voruntersuchungen erforderlich sind. Ferner muss sich der Bauherr bewusst über die Tatsache sein, dass mit der Installation eines KKS-Systems nun eine „Maschine“ die Tragfähigkeit seines Bauwerks sicherstellt. Diese „Maschine“ muss über die gesamte Restnutzungsdauer des Bauwerks betrieben (und damit gewartet) werden. Bei Veräußerung des Bauwerks muss der Käufer über diesen Umstand informiert werden. Bei dem Planer eines KKS-Systems muss es sich formal um einen sachkundigen Planer nach Rili SIB handeln.

9.2 Zustimmung im Einzelfall für Anwendungen des KKS bei Stahlbeton

Das Verfahren des KKS für Stahlbeton ist, wie oben erläutert, mittlerweile anerkannte Regel der Technik. Dennoch ist für den Einsatz der Materialien im standsicherheitsrelevanten Bereich nach der aktuellen Empfehlung des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau vom Juni 2009 /8/ hinsichtlich der bautechnischen Eignung und Dauerhaftigkeit des Anodensystems einschließlich Einbettungsmörtel eine bauaufsichtliche Zulassung gefordert. Da eine solche Zulassung bis dato nicht vorliegt, ist eine projektbezogene Zustimmung im Einzelfall des Anodensystems einschließlich Einbettungsmörtel durch die zuständige Bauaufsichtsbehörde zu erlangen.

Dabei werden an Anodenmaterial und Einbettungsmörtel bzw. Betonersatz folgende Anforderungen gestellt:

- **Anforderung an die Anode**

Die längsten und umfangreichsten Erfahrungen liegen international für das Anodensystem aus aktiviertem Titan vor. Es hat sich gezeigt, dass nach NACE TM 0294 geprüfte Titananoden ohne weitere Nachweise für den Betrieb von KKS-Systemen empfohlen werden können.

▪ Anforderungen an den Einbettungsmörtel

Grundsätzlich sollten in einem KKS-System Mörtel eingesetzt werden, die die Anforderungen der Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Beton“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (Rili-SIB 2001) erfüllen.

Prinzipiell muss unterschieden werden, ob es sich bei dem Mörtel/Beton um einen Reprofilierungsmörtel (Betonersatz) handelt (siehe z.B. Bild 9) oder um einen Einbettungsmörtel. Damit eine gleichmäßige Stromverteilung gewährleistet ist, sollte der Betonersatz einen ähnlichen elektrolytischen Widerstand haben wie der Altbeton. Der Einbettungsmörtel sollte möglichst elektrolytisch leitende sein, deswegen sind Anforderungen an den Maximalwiderstand formuliert.

DIN EN 12696 fordert in Abschnitt 5.10.4 und analog in 5.11:

„... Der elektrische Widerstand des Reparaturmaterials muss innerhalb von 50 % bis 200 % des nominellen elektrischen Widerstands des Altbetons liegen. Anodenüberdeckungen dürfen 200 % des elektrischen Widerstandes des Ausgangsbetons bis zu einem Maximum von 100 kΩcm in den Umgebungsbedingungen überschreiten ...“

Um der Forderung nach einem möglichst gleichen Elektrolytwiderstand nachzukommen und damit eine möglichst gleichmäßige Schutzstromverteilung zu gewährleisten, werden folgende Nachweise empfohlen:

- KKS-Funktionsprüfung: Erreichen des Schutzkriteriums, z.B. 100 mV-Kriterium, mit dem gesamten Anodensystem (z.B. Anode und Einbettungsmörtel) für den KKS für die zu erwartenden Umgebungsbedingungen.
- Prüfung des elektrischen Widerstands zur Abstimmung des Einbettungsmörtels auf den Betonuntergrund: Nachweis der Ähnlichkeit der elektrischen Widerstände des Einbettungsmörtels und des Betonuntergrunds für sämtliche zu erwartende Widerstände des Einbettungsmörtels und des Betonuntergrunds für sämtliche zu erwartende Umgebungsbedingungen. Dies ist insbesondere bei trockener Lagerung relevant.

Die KKS-Funktionsprüfung sollte so angelegt sein, dass ein möglichst großer Bereich der in der Praxis auftretenden Fälle abgedeckt wird. Als Ergebnis dieser Prüfung kann der Anwendungsbereich des Systems für verschiedene projektspezifische Fälle festgelegt werden.

Es sei abschließend darauf hingewiesen, dass die Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall bei den Obersten Baubehörden bei entsprechend fundierten Begründungen und Darlegungen üblicherweise in so kurzen Zeiträumen erfolgt, dass es zu keiner Verzögerung im Planungs- oder gar Bauablauf kommt. Auch die anfallenden Kosten hierfür sind normalerweise moderat.

Literatur

1. DIN EN 12696; 2000-06: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton; Deutsche Fassung EN 12696:2000
2. DIN EN ISO 12696 Norm-Entwurf , 2009-10: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton (ISO/DIS 12696:2009); Deutsche Fassung prEN ISO 12696:2009
3. V. Baeckmann, W.; Schwenk, W.: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. 4. Ausgabe, 2009, Wiley-VCH Verlag
4. Hafenbautechnische Gesellschaft e.V.: „Kathodischer Korrosionsschutz für Stahlbeton“, Hamburg, 1994
5. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Richtlinie Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauteilen. Wien, 12. 2005
6. Motzke, G.: Vertrags- und haftungsrechtliche Gesichtspunkte bei der Planung und Ausführung von Kathodischem Korrosionsschutz, Symposium Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken, Esslingen, 23. November 2007.
7. König, N.: Haftungs- und vertragsrechtliche Gesichtspunkte bei der Planung und Ausführung von KKS-Projekten. Symposium Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken, Esslingen, 20. und 21. November 2008.
8. Empfehlung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zu den erforderlichen Nachweisen der Bauprodukte für den Kathodischen Korrosionsschutz im Betonbau. 05.06.2009 (Ersatz für die Empfehlung vom 16.04.2008)
9. Dauberschmidt, C.; Sodeikat, Ch.; Vestner, S.: Instandsetzung einer Betonbrücke mit Walzträgern nach dem Prinzip des Kathodischen Korrosionsschutzes. Beton- und Stahlbetonbau 11/2009
10. Gieler-Breßmer, S.; Pruckner, F.; Schalko, D.: Generalerneuerung der A2-Südautobahn Wien-Graz: Kathodischer Korrosionsschutz an den Stützenreihen der Überführungen Ü 13 bis Ü 22. Beton- und Stahlbetonbau 5/2008 344-354
11. Klein, H.-H.; Schade, A.; Eichler, T.; Isecke, B.; Pruckner, F.; Michel, S.: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton: Instandsetzung des Parkhauses "Am Gericht" in Frankfurt am Main. Beton- und Stahlbetonbau 5/2007. 310-320
12. Bertolini, L.; Elsener, B.; Pedferri, P.; Polder, R.: Corrosion of Steel in Concrete“. Wiley VCH (2004)
13. Eichler, T.: Grundlagen des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahl in Beton. Symposium Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken, Esslingen, 20. und 21. November 2008.
14. Pruckner, F.: Lebensdauerauslegung für Betonbauwerke. Symposium Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken, Esslingen, 23. November 2007.
15. Vestner, S.: Kathodischer Korrosionsschutz (KKS) für die Auermühlbachbrücke in München – Planung und wissenschaftliche Betreuung der Vorinstallation. Diplomarbeit, Hochschule München, Januar 2008.
16. DAfStb.-Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen, Rili-SIB. Beuth-Verlag, Berlin, 2001