

# Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbeton

## Ein smartes Instandsetzungsverfahren mit Zukunft

*Felix Wenk*

**Abstract:** Der kathodische Korrosionsschutz, abgekürzt KKS, wurde erstmals im Jahre 1824 durch den Briten Sir Humphrey Davy zum Schutz der Kupferbekleidung von Kriegsschiffen angewandt. Für den Schutz des Bewehrungsstahls im Beton kam das Verfahren Ende der 50er Jahre des letzten Jahrhunderts versuchsweise zum Einsatz. Seit der 70er Jahre wird KKS im Stahlbetonbau vorbeugend und als Instandsetzungsprinzip weltweit installiert, vor allem in den angloamerikanischen und skandinavischen Ländern. In den letzten 15 Jahren hat sich der KKS auch in Deutschland zunehmend durchgesetzt, insbesondere bei der Instandsetzung von Parkhäusern. Die Vorteile hinsichtlich hoher Dauerhaftigkeit, geringer Emissionen, kurzer Installationsdauer und minimalen Eingriffs in die bestehende Tragstruktur sind für seine Wahl vielfach entscheidend. Für die große Akzeptanz der Methode sorgen zudem die Norm DIN EN ISO 12696 Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton und die einschlägigen Empfehlungen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Des Weiteren wirken sich die Fortschritte der vergangenen Jahre in der Kommunikationstechnologie sowie der Entwicklung von neuen Anodenmaterialien und -systemen günstig auf die Verbreitung des Verfahrens aus. Der kathodische Korrosionsschutz weist eine breite Palette an Anwendungsmöglichkeiten auf und ist ein nachhaltiges Instandsetzungsverfahren.

**Keywords:** Kathodischer Korrosionsschutz, Anodenmaterialien, Schutzstromdichten, Depolarisation.

## 1 Historischer Rückblick

Der kathodische Korrosionsschutz von Stahlbeton (KKS) ist in Deutschland ein vergleichsweise junges Instandsetzungsverfahren. Im Jahre 1986 wurde die erste KKS-Anlage in Deutschland im Rahmen eines 1985 initiierten, internationalen Forschungsvorhabens des BRITE-Projektes [1] in Betrieb genommen und schützte 15 Jahre lang die durch Korrosion geschädigte Bewehrung einer Stützwand des Berliner Autobahnringes vor weiteren Querschnittsverlusten, bevor die Anlage wegen erforderlicher Umbaumaßnahmen im Jahr 2001 rückgebaut wurde [2]. In den letzten 15 Jahren hat sich der KKS in Deutschland zunehmend durchgesetzt, insbesondere bei der Instandsetzung von Parkhäusern. Die anfängliche Zurückhaltung gegenüber dem Verfahren ist aus technisch-wissenschaftlicher Sicht nicht ganz verständlich. In angloamerikanischen und skandinavischen Ländern wird der KKS bereits seit rund 40 Jahren angewendet. Das Schutzprinzip ist noch wesentlich älter. Der Brite Sir Humphrey Davy hat im Jahre 1824 den KKS zum Schutz der Kupferbekleidung von Kriegsschiffen angewandt. 1906 haben die Stadtwerke Karlsruhe erstmals Gas- und Wasserrohrleitungen im Einflussbereich einer Straßenbahnlinie mittels KKS geschützt. Auf Anregung des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW) wurden im selben Jahr auch die ersten spezifischen wissenschaftlichen Grundlagen zum KKS angedacht. In Deutschland, in der Schweiz und in weiteren Ländern ist der KKS bei Hochdruckgasleitungen und Pipelines gesetzlich vorgeschrieben [3]. Für den KKS bestehen seit dem Jahre 2000 eine Europäische Norm und seit 2009 einschlägige Empfehlungen des Deutschen Ausschusses Für Stahlbeton.

## 2 Schutzprinzip und Vorteile

Das Schutzprinzip beruht auf dem Erzeugen eines Gleichstromfeldes zwischen der Bewehrung und einer permanent angelegten Anode. Die Bewehrung wird dabei an den Minuspol und die Anode an den Pluspol der Gleichspannungsquelle angeschlossen (Bild 1). Durch die angelegte Spannung und den daraus entstehenden Stromfluss ergeben sich folgende Schutzmechanismen:

- Das Potential der Bewehrung wird abgesenkt.
- An der Bewehrungsfläche werden bei ausreichendem Sauerstoffangebot negativ geladene Hydroxidionen gebildet, welche zu einer Realkalisierung des Betons im Bereich des Bewehrungsstabes führen. Ein allenfalls beschädigter Passivfilm kann sich dadurch regenerieren.
- Den Passivfilm angreifende, negativ geladene Chloridionen werden in Richtung positiv geladene Anode wegtransportiert.

Die erforderlichen Schutzstromdichten hängen u.a. vom Korrosionszustand der Bewehrung und dem Chloridgehalt des Betons ab. Sie liegen in der Regel zwischen 2 und 20 mA/m<sup>2</sup> Bewehrungsfläche [4] bei einer Gleichspannung von ca. 2 Volt, wobei Stromdichten über 10 mA/m<sup>2</sup> bei hiesigen Bauwerken selten vorkommen. Die Schutzwirkung kann mittels des Depolarisationskriteriums nachgewiesen werden. Dabei sollte nach Ausschalten der KKS-Anlage ein Potentialanstieg der Bewehrung von mindestens 100 mV nach 24 Stunden gemessen werden.

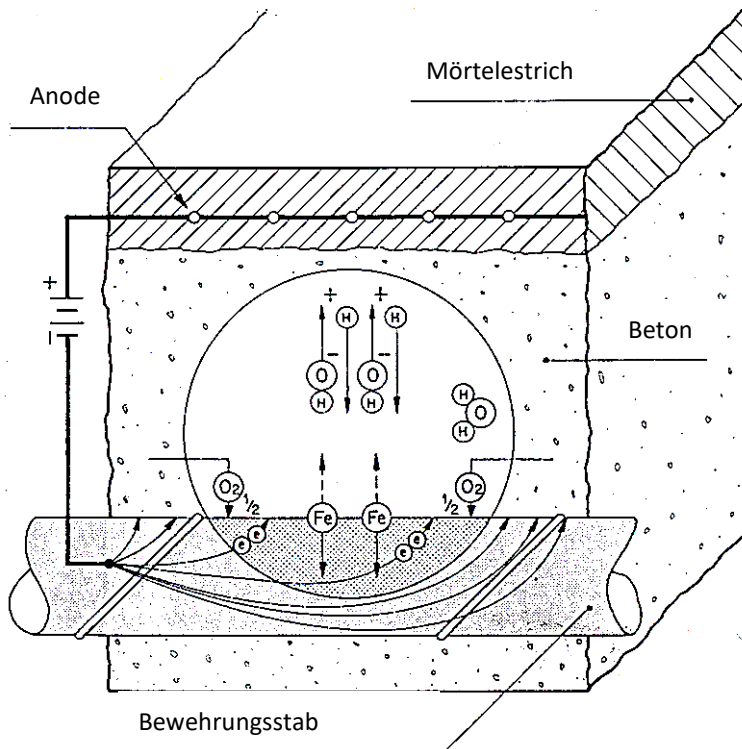


Bild 1: Prinzip des KKS

Gegenüber von konventionellen Instandsetzungsverfahren sind folgende Vorteile auszumachen:

- Nicht geschädigter chloridkontaminierter respektive karbonatisierter Beton muss nicht abgetragen werden. Dadurch werden die Emissionen hinsichtlich Lärm, Staub und Wasser stark reduziert.
- Korrodierende Bewehrung muss in der Regel nicht freigelegt werden.

- Die Bauzeit kann in der Regel reduziert und die Instandsetzung oftmals unter Betrieb/Teilbetrieb vorgenommen werden.
- Durch integrierte Messsysteme ist jederzeit eine Aussage zum Zustand des Bauwerks möglich. In der Regel geschieht dies mittels Fernüberwachung.
- Durch die Regelung von Spannung und Strom kann aktiv in den Schutzmechanismus eingegriffen und somit die Restnutzungsdauer erhöht werden.

### 3 Anodensysteme und -materialien

Das Angebot an tauglichen Anodensystemen und -materialien hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Ihr Einsatzgebiet richtet sich nach ihren Eigenschaften, Vor- und Nachteilen. Sie unterscheiden sich insbesondere bezüglich Kosten, Lebensdauer, maximal zulässigen Schutzstromdichten und -spannungen. In den Anfängen des KKS gab es verschiedentlich Probleme mit leitfähigen Polymeranoden (Bild 2), die schon nach kurzer Zeit versagten [5]. Gute Erfahrungen machte man hingegen mit aktivierten Titananoden, die eine Lebensdauer von über 50 Jahren aufweisen können und heute in Deutschland das meist angewendete Anodenmaterial sind. Aktivierte Titananoden werden in Netz-, Band-, Draht- und Stabform angeboten. Aus Bandanoden werden zudem sogenannte Diskretanoden gefertigt. Während Netzanoden vor allem auf größeren Flächen zum Einsatz kommen (Bild 3), werden Bänder sowohl in Flächen als auch bei kleineren Bauteilen wie Stützenfüßen und Unterzügen verwendet (Bild 4). In der Regel werden die Anoden in Mörtelschichten eingebettet. Bei ausreichender Bewehrungsüberdeckung können sie aber auch in gefräste Schlitz eingelegt werden, wodurch eine Erhöhung der ständigen Lasten respektive eine Reduktion der Raumhöhe verhindert werden können. (Bild 5). Diskretanoden werden für einen lokalen respektive linienförmigen Schutz, z.B. in Riss- und Fugenbereichen, eingesetzt, insbesondere wenn auch tiefere Bewehrungslagen geschützt werden sollen (Bild 6). Neben den aktivierten Titananoden kommen vermehrt auch leitfähige Beschichtungen zum Einsatz (Bild 7). Sie eignen sich besonders da, wo zusätzliche Mörtelschichten aus statischen Gründen nicht appliziert werden können und weder große Schutzspannungen noch Schutzstromdichten benötigt werden. In Norwegen werden leitfähige Beschichtungen seit über 15 Jahren aufgetragen. Die von den Herstellern angegebene Lebensdauer von mindestens 20 Jahren ist aufgrund der Erfahrungswerte bei fachgerechtem Einbau realistisch. Ebenfalls als Anodenmaterial eingesetzt wird Zink, in Form von Haftfolien, Netzprofilen oder als thermisch gespritzte Metallschicht. Zink ist unedler als die Bewehrung und erbringt seine Schutzwirkung, indem es sich als sogenannte Opferanode selber aufbraucht. Die Spannung, die Schutzstromdichten und die Lebensdauer sind daher vergleichsweise gering.



Bild 2: Elektrisch leitende Polymeranoden (Quelle: Raychem)



Bild 3: Aktivierte Titannetze



Bild 4: Aktivierte Titanbänder auf Stützensockel mit Bewehrungsanschluss



Bild 5: Aktiviertes Titanband in Betonschlitz eingelegt



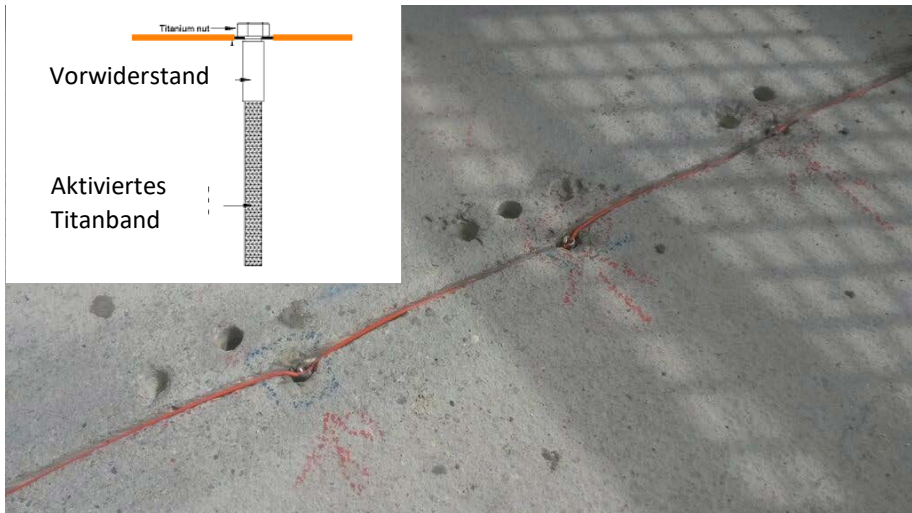


Bild 6: Installierte Diskretanoden (kleines Bild: Quelle CPI)



Bild 7: Leitfähige Beschichtung (schwarzer Anstrich auf Betonoberfläche mit Anschlüssen)

## 4 Überwachung

Ein zentrales Element eines KKSB-Systems ist die Überwachungseinheit. Sie hat zwei Funktionen. Einerseits wird sie für die Kontrolle der Schutzwirkung benötigt, ande-

rerseits liefert sie - sozusagen kostenlos im Preis der Systemprüfung enthalten - kontinuierlich Informationen über den Zustand des Bauwerks. Als Überwachungssensoren werden hauptsächlich Bezugs Elektroden zur Messung des Bewehrungspotentials und des Potentialanstiegs verwendet (Bild 8). Eher selten kommen Messcoupons oder Makrozellsensoren zur Messung der lokalen Schutzstromdichte respektive der Korrosionsgeschwindigkeit zum Einsatz.



Bild 8: Überwachungssensoren (von oben nach unten: MnO<sub>2</sub>-Bezugs elektrode, Messcoupon, Potentialanstiegssensor)

Der Aufwand für die Installation der Überwachungseinheit inkl. der Verkabelung liegt in der Größenordnung von 10 % der Gesamtkosten eines KKS-Systems. Dank den technischen Fortschritten in der Kommunikationstechnologie ist er in den letzten 10 Jahren gesunken. Mithilfe von Bussystemen können die Datenleitungen schneller installiert und die Datenauswertung über eine entsprechende Software effizienter abgewickelt werden. Die Fernwartung ersetzt die aufwändigen Messungen vor Ort. Zugleich können Fehler respektive ungünstige Veränderungen sofort entdeckt und die erforderlichen Gegenmaßnahmen umgehend getroffen werden. Die Lebensdauer der Überwachungseinheit ist in der Regel geringer als diejenige der Anoden. Insbesondere die Bezugs elektroden können oft nach 10 bis 20 Jahren ihre Funktion nicht



mehr zufriedenstellend erfüllen. Nach Einschätzung des Autors ist dies jedoch nicht gravierend. Die Elektroden sind nämlich vor allem in der Einregelungszeit des KKS-Systems wichtig, d. h. in den ersten drei bis fünf Jahren. Anschließend verhält sich die Anlage temperaturbereinigt relativ stabil (Bild 9). Die Angaben über den Spannungs- und Schutzstromverlauf genügen dann in der Regel. Der Nachweis betreffend die Schutzwirkung kann auch indirekt via die Depolarisation zwischen Anode und Kathode oder über eine mobile Bezugslektrode erbracht werden.

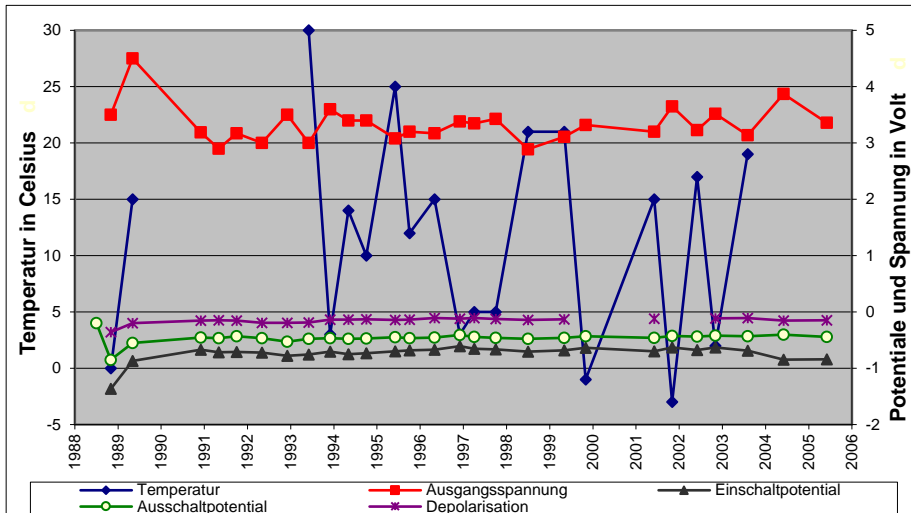


Bild 9: Während rund 20 Jahren ausgewertete Daten einer KKS-Anlage

## 5 Ausblick

Das Einsatzpotential für den kathodischen Korrosionsschutz bei Stahlbetonbauten ist groß. Bisher wurden in Deutschland hauptsächlich Parkgaragen mit entsprechenden Anlagen instandgesetzt. KKS-Systeme eignen sich aber auch für andere Stahlbetonbauten wie z.B. Brücken und Tunnels. Zurzeit wird in Rendsburg der 640 Meter lange vierspürige Unterwassertunnel mit zwei Röhren unter dem Nord-Ostsee-Kanal kathodisch geschützt. Weitere Einsatzgebiete sind u.a. chloridkontaminierte Stahlbetonstrukturen in Badanlagen und Thermen, ungenügend überdeckte Bewehrungsstäbe in Bohrpfehlwänden sowie die rückseitige, korrosionsgefährdete Bewehrung von Stützmauern. Bei weichen Flecken auf Mörtelbeschichtungen in Trinkwasserbehältern konnte nach Installation einer KKS-Anlage meistens eine Stabilisierung festgestellt werden. Eine kürzlich abgeschlossene Forschungsarbeit zu diesem Thema hat den günstigen Effekt von Gleichstromeintritten in Mörtel- respektive Betonober-

flächen nachgewiesen [6]. Der KKS ist im Vergleich zur elektrochemischen Chlorid entferntung und zum konventionellen Betonersatz auch ein nachhaltiges Instandsetzungsverfahren. Studien im Rahmen einer Masterthesis [7] zeigen, dass die Gesamtkosten, bestehend aus Objektkosten (Erhaltung, Betrieb), Straßennutzerkosten (Zeit, Fahrzeugbetrieb, Unfall) und Kosten Dritter (Lärm, Luft, Klima) vergleichsweise gering sind (Bild 10).

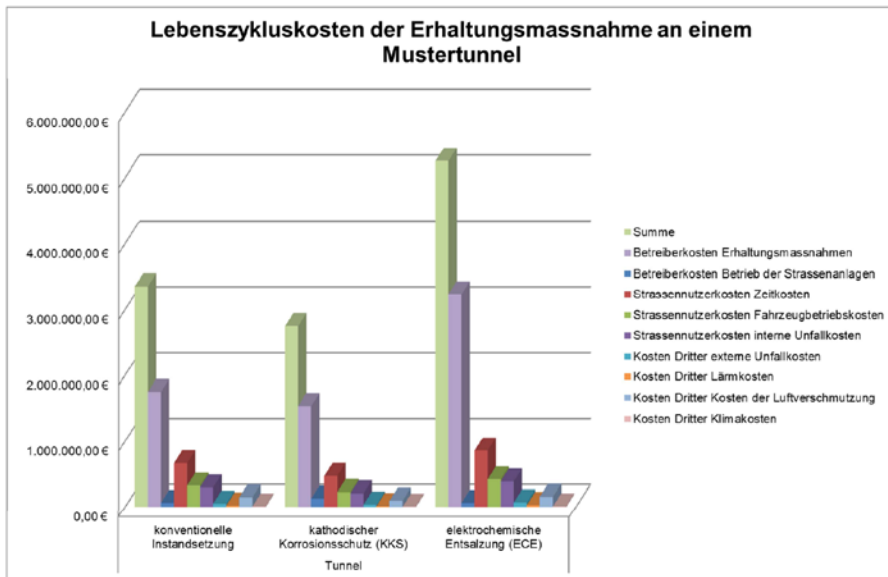


Bild 10: Gesamtkosten, Bsp. Mustertunnel (Länge: 1 km, DTV: 4000, Umfang: 3 km) [7]

## 6 Literaturreferenzen

- [1] BRITE-Project : Electrochemically-based Techniques for Assessing and Preventing Corrosion of Steel in Concrete, Final technical report, 1990
- [2] Eichler, Thorsten: Zu den sekundären Schutzmechanismen beim kathodischen Korrosionsschutz von Stahl in alkalischen Medien, Dissertation, 2012
- [3] Baeckmann, W.v. und Schwenk, W.: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes, Wiley-VCH, 4. Auflage, 1999
- [4] DIN EN ISO 12696: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton, 2012
- [5] New Hampshire Department of Transportation: Evaluation of Corrosion and Corrosion Control on Interstate 89 bridge #30 and #31, 2015

- [6] Voûte, Carl-Heinz, Büchler, Markus und Wenk, Felix: Fleckenbildung in Trinkwasserreservoirs, FOWA-Projekt, AQUA&GAS NO. 6, 2015
- [7] Künstel, Tobias: Lebenszyklus von Stahlbetoninstandsetzungsverfahren, unveröffentlichte Masterthesis, 2014