

KKS mit eingeschlitzten Bandanoden – Grundlagen und Ergebnisse von Laboruntersuchungen

Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt
Hochschule München, Fakultät für Bauingenieure, München, Deutschland

Dipl.-Ing. (FH) St. Vestner
Ingenieurgesellschaft Prof. Dauberschmidt & Vestner mbH, München, Deutschland

Zusammenfassung

Ein Großteil des Instandsetzungsbedarfs chloridexponierter Stahlbetonbauteile rührt aus dem Verlust der passivierenden Wirkung der Porenlösung im Beton: durch Überschreiten des kritischen Chloridgehalts kann es zu chloridinduzierter Bewehrungskorrosion kommen, was langfristig zu einer Reduzierung der Tragfähigkeit der Stahlbetonkonstruktion führen kann. Da es sich bei einer Instandsetzung mittels KKS gegenüber einer konventionellen Instandsetzung unter bestimmten Randbedingungen um ein wirtschaftliches und auch baubetrieblich vorteilhaftes Instandsetzungsverfahren handelt, wird das Verfahren in den letzten Jahren auch zunehmend in Deutschland eingesetzt. Nachfolgend sollen das Anodensystem mit eingeschlitzten Bandanoden vorgestellt, die Anforderung an die einzelnen Komponenten zusammengefasst und die ersten Ergebnisse eines Laborversuchs dargestellt werden.

1. Einleitung

Da sich der Erkenntnisstand bezüglich der Eignung und Dauerhaftigkeit von Anodensystemen in den letzten Jahren deutlich verbessert hat und die DIN EN 12696:2000-06 [2] 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 des Kathodischen Korrosionsschutzes für Stahlbetonbauten bietet gegenüber der konventionellen Instandsetzung einige entscheidende Vorteile, so muss z.B. der chloridbelastete Beton nicht entfernt werden.

Die nachfolgenden Ausführungen beschäftigen sich speziell mit dem Anodensystem eingeschlitzter und mittels Vergussmörtel eingebetteter Bandanoden. Dabei werden der Regelaufbau des genannten Systems, die Anforderungen an Anode und Einbettungs- sowie Reprofilierungsmörtel angegeben. Abschließend werden die ersten Ergebnisse von an der Hochschule München durchgeführten Laboruntersuchungen an Probekörpern mit in Schlitzen verlegten Bandanoden vorgestellt.

2. Systemdarstellung eingeschlitzter Bandanoden

2.1 Anodensysteme allgemein

Zunächst werden zur besseren Übersicht die grundsätzlich einsetzbaren Anodensysteme, die bisher bei KKS im Stahlbeton größere Anwendung gefunden haben, zusammengestellt und deren Anwendungsbereiche erläutert [1]:

- **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. Dabei sind jedoch keine langen Nutzungsdauern zu erwarten.
- **Leitfähige Beschichtungen:** empfohlen bei niedrigen erforderlichen Schutzstromdichten. Langzeiterfahrungen liegen bis dato kaum vor.
- **Titanbasierte Anoden:** für diesen Typ von Anoden liegen die meisten Langzeiterfahrungen vor. Nach [5] kann von einer langen Lebensdauer auch bei hohen Schutzstromdichten und alternierenden Expositionen ausgegangen werden.

2.2 Eingeschlitzte Bandanoden

Bei diesem System handelt es sich um einen mittels Fremdstrom gespeisten Kathodischen Korrosionsschutz, dessen Stromabgabe in den Beton (Elektrolyt) mittels Anoden auf Basis Titan erfolgt. Die Bandanode besteht aus MMO-beschichtetem Titan, die in eingefräste oder eingeschnittene Schlitze installiert wird, vgl. Abbildung 1. Titananoden aus MMO beschichtetem Titan wurden für den kathodischen Schutz von Stahl in Beton erstmals 1985 eingesetzt und finden heute die weiteste Verbreitung. Dieses Anodenmaterial zeichnet sich durch eine hohe Langlebigkeit (rd. 25 Jahre) aus – die Lebensdauer wird unter Voraussetzung üblicher Schutzstromdichten praktisch nur durch die Einbettmasse bestimmt. Die Anodenbänder werden mit einem speziellen Ankoppelungsmörtel (Vergussmörtel) an den Beton in den Schlitzen angekoppelt und ermöglichen eine sehr gleichmäßige Schutzstromverteilung. Zur Stromzuführung und – Verteilung wird nicht aktiviertes Titanmaterial eingesetzt, das in bestimmten Abständen an das Titanband geschweißt wird. Der Abstand dieser sog. Primäranode muss so gewählt werden, dass der Spannungsabfall die geforderten Grenzwerte nicht übersteigt.

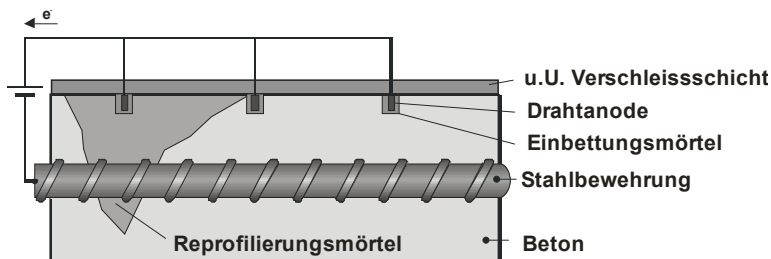


Abbildung 1: Systemaufbau mit aktivierten Titanbändern [7]

Als Sonderfall von Bandanoden können auch die sog. Kernanoden (auch Stabanoden) genannt werden. 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 [3]. Diese werden in Bohrlöcher des Konstruktionsbetons montiert. Das Bohrloch wird mit einem zementgebundenen, hochalkalischen, schwindfreien Vergussmörtel hinterfüllt (analog der Bandanode), welcher den elektrolytischen Kontakt zwischen Anode und Konstruktionsbeton herstellt, vgl. Abbildung 2. 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). In den nachfolgenden Ausführungen wird dieses System mit Kernanoden nicht weiter eingegangen. Die in Kap. 3 genannten Anforderungen an das Anoden-, Einbettungs- und Refilierungsmaterial sind jedoch übertragbar.

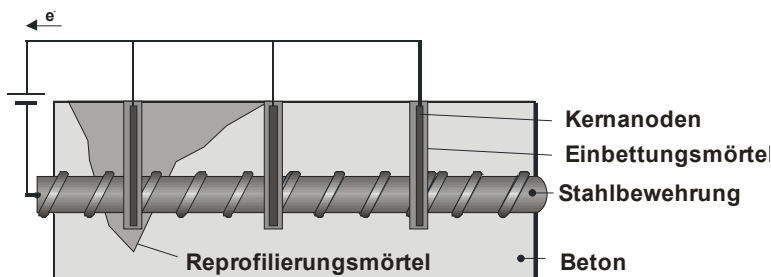


Abbildung 2: Systemaufbau [7]

2.2 Vor- und Nachteile des vorgestellten Systems mit eingeschlitzten Bandanoden

Der größte Vorteil des Systems besteht darin, dass durch den Einbettungsmörtel, der ausschließlich in die zuvor erstellten Schlitzte einzubringen ist, keine Zusatzlast aufgebracht wird, was vor allem bei statisch ausgelasteten Bauwerken und Bauteilen oft als Entscheidungskriterium gilt. Ferner kann in vielen instand zu setzende Tiefgaragen und Parkhäuser aufgrund der einzuhaltenden Durchgangshöhen bzw. -breiten keine zusätzliche Mörtelschicht auf die Bauteiloberflächen aufgetragen werden, da ansonsten die Gefahr besteht, dass Fahrzeuge möglicherweise beim Einfahren in das Bauwerk beschädigt werden. Auch kann hinsichtlich des Bauablaufs bei Einsatz von eingeschlitzten Bandanoden bzw. Stabanoden flexibler auf die Nutzung während der Instandsetzung eingegangen werden: da keine vollflächige Mörtelschicht aufgebracht wird, kann der gerade instand gesetzte Bereich zumindest zeitweise noch befahren werden.

Für die Anwendbarkeit dieses Systems ist jedoch eine ausreichende Betondeckung erforderlich. Gemäß DIN EN 12696 [2] muss für alle Anodensysteme aus Titan zwischen Anode und Bewehrung ein Mindestabstand von 15 mm zur Vermeidung von Kurzschlüssen und zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Schutzstromverteilung eingehalten werden. D.h., bei der Verwendung einer 10 mm breiten Anode ist mindestens eine Betondeckung von 25 mm erforderlich, um das System einsetzen zu können. In Einzelfällen kann die Bewehrung auch mittels zerstörungsfreier Messverfahren eingemessen und die Anoden zwischen die einzelnen Stäbe gelegt werden.

2.3 Arbeitsschritte zur Installation des Systems

Zur Installation eines KKS-Systems mit eingeschlitzten Bandanoden sind in der Regel folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Ist-Zustandserfassung (visuelle Aufnahme augenscheinlicher Schädigungen, Potentialfeldmessung, Betondeckungsmessung, Chloridgehaltsbestimmung, Elektrolytwiderstandsmessungen am Untergrund, Messung der durchleitende Verbindung der Bewehrung, Bestimmung der Haftzugfestigkeit)
- Vorbereiten der Betonoberfläche (z.B. Kugelstrahlen) zur Erzielung eines tragfähigen, sauberen und ölfreien Untergrunds
- Auf Grundlage der Betondeckungsmessung müssen ev. vorhandene Bereiche mit Minderbetondeckungen auf der Betonoberfläche markiert und im Anschluss die Mindestbetondeckung durch Aufbringen einer Mörtelschicht hergestellt werden. Handelt es sich um kleine Bereiche, kann die Bewehrung mit Hilfe eines zerstörungsfreien Messgeräts eingemessen und die Schlitzführung so gewählt werden, dass die Anodenbänder zwischen den Bewehrungsstäben verlaufen.
- Im Bereich von Hohlstellen und Abplatzungen infolge Bewehrungskorrosion muss der schadhafte Beton abgetragen, und korrodierte Bewehrung ergänzt werden. Im Anschluss an die Untergrundvorbereitung ist ein Reprofilierungsmörtel in die Schadstellen einzubringen, dessen Eignung für die Anwendung von KKS nachzuweisen bzw. durch eine Systemprüfung bereits nachgewiesen ist.
- Herstellung von Schlitzten für die Verlegung der Primäranoden (Stromzuleitung) und der Bandanoden (Schlitztiefe = Anodenbreite + 5 mm. Dieser 5 mm-Zuschlag bei der Erstellung der Schlitzte ist erforderlich, um ein Freilegen der Bandanode bei einer weiteren Untergrundvorbereitung zu verhindern.
- Einbau der Überwachungssensoren sowie Herstellen von Anoden und Kathodenanschlüssen.
- Komplettverkabelung.
- Vor der Anodeneinbettung müssen zur Sicherstellung des Verbunds zwischen Altbeton und Vergussmörtel die Schlitzte gründlich gereinigt und vor der Anodeneinbettung vorgeätzt werden.
- Verlegung der Primäranoden und der Bandanden sowie Einbettung mit Hilfe eines Vergussmörtels. Auch die Eignung des Vergussmörtels in Kombination mit einem Reprofilierungsmörtel sollte durch eine Systemprüfung nachgewiesen sein.
- Installation der Gleichrichter und Datenaufzeichnungseinheit.
- Kontrollmessungen, Funktionsprüfungen, Performancekontrolle und Inbetriebnahme.
- Empfohlen wird die anschließende Applikation eines Oberflächenschutzsystems.

3. Anforderungen an die eingesetzten Materialien

3.1 Allgemeines

Das Verfahren des KKS für Stahlbeton ist, wie in zahlreichen Veröffentlichungen erläutert, z.B.[4], mittlerweile allgemein 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 [5] hinsichtlich der bautechnischen Eignung und Dauerhaftigkeit des Anodensystems einschließlich Einbettungs- und Reprofilierungsmörtel 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. Es sei 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. Nachfolgend werden die Anforderungen an die einzelnen Materialien zusammengefasst.

3.2 Anodenmaterial [5]

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. Andere Anodensysteme, zu denen bis dato noch ein geringerer Erfahrungsschatz (z.B. leitfähige Beschichtung) vorhanden ist, können unter der Voraussetzung eingesetzt werden, dass der Bauherr sowie die Oberste Baubehörde im Zuge der Zustimmung im Einzelfall darauf hingewiesen werden, dass die Lebensdauer des Anodenmaterials womöglich geringer ist als die der ausreichend erprobten Systeme.

3.3 Anforderungen an das Einbettungs- und Reprofilierungsmaterial [5]

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 oder um einen Einbettungsmörtel. Damit eine gleichmäßige Stromverteilung gewährleistet ist, sollte der Betonersatz einen ähnlichen elektrolytischen Widerstand haben wie der Altbeton. Weist nämlich der Altbeton einen zu geringen Elektrolytwiderstand auf, so kommt es im Bereich der Reparaturstellen zu einem Überschutz. Ist der Elektrolytwiderstand im Bereich der Reprofilierungsstelle hingegen größer als der des umgebenden Altbetons, wird die Bewehrung unterhalb der Reprofilierung womöglich nicht mit ausreichend Schutzstrom „versorgt“. Der Einbettungsmörtel sollte möglichst elektrolytisch leitend 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 ...“

Der elektrolytische Widerstand von Beton (und auch des Reparatur- sowie des Einbettungsmaterials) ist von zahlreichen baustoffspezifischen Randbedingungen abhängig, die nachfolgend kurz aufgeführt sind:

- Feuchtigkeit (dominierender Faktor)
- Zementart
- Betonzusatzstoffe wie Hüttensand, Flugasche- und Silicastaub
- Betonzusatzmittel wie Fließmittelart und -menge
- Wasserzementwert
- Karbonatisierung
- Temperatur.

Da in DIN EN 12696 die Umgebungsbedingungen, bei denen die genannten Relativwiderstände zum Altbeton einzuhalten sind, nicht genauer definiert sind, ist eine zielgerichtete Prüfung der oben genannten Kriterien sowie die Anpassung des Reparaturmaterials über das gesamte Feuchtigkeitsspektrum nicht ohne weiteres möglich. Zusätzlich dazu sind die elektrolytischen Widerstände unter Praxisbedingungen gewöhnlich erheblichen Schwankungen unterworfen.

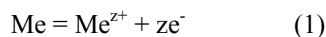
Um der Forderung nach einem möglichst gleichen Elektrolytwiderstand nachzukommen und damit eine möglichst gleichmäßige Schutzstromverteilung zu gewährleisten, werden folgende Nachweise empfohlen:

- 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.

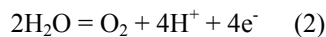
Die KKS-Funktionsprüfung sollte so angelegt sein, dass ein möglichst großer Bereich der in der Praxis auftretenden Fälle abgedeckt wird. Als Ergebnis dieser Prüfung kann der Anwendungsbereich des Systems für verschiedene projektspezifische Fälle festgelegt werden.

3.3 Säurepufferkapazität

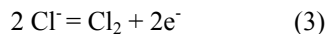
Während des Betriebs eines KKS-Systems laufen an den Anoden und im „Anodenraum“ chemische Reaktionen ab, vgl. Abbildung 3. Stromtransport durch die Anodenoberfläche ist nur möglich, wenn an der Anode eine elektrochemische Reaktion stattfindet. Im einfachsten Fall wird das Anodenmaterial selbst anodisch aufgelöst; bei unedelen Metallen etwa nach



Der Verbrauch an der Anode ergäbe sich direkt aus der Stromdichte, wenn neben der Auflösung keine weiteren Reaktionen ablaufen würden. Als weitere anodische Reaktion kann die Sauerstoffentwicklung und die Wasserzersetzung nach



oder bei Anwesenheit von Chlorid Chlorentwicklung nach



ablaufen. Für KKS in Stahlbeton sind es, da zumeist nur inerte Anodensysteme wie Titan zum Einsatz kommen, hauptsächlich die Reaktionen (2) und (3), die von Belang sind. Beide haben eine Ansäuerung der Anodenumgebung zur Folge; die Sauerstoffentwicklung läuft unter Abgabe von H^+ -Ionen ab, Chlorgas reagiert mit Wasser unter Bildung von Salzsäure und Hypochlorgas. Diese Ansäuerung im Bereich der Anode mit Entstehung von sehr niedrigen pH-Werten kann zu Betonkorrosion bzw. Mörtelkorrosion führen, bei der sich die Mörtelmatrix unter Bildung von Calcium-, Aluminium- und Eisensalzen sowie Kieselgel auflöst. Somit kann eine Ansäuerung an der Anode zu einer elektrolytischen Entkoppelung zwischen Anode und Ankopplungsmörtel führen, mit dem Ergebnis, dass kein Schutzstromfluss mehr möglich ist. Die Wirksamkeit des kathodischen Schutzes hängt somit in der Langzeitbetrachtung davon ab, ob das System gegenüber Säuren und eventuell Chlorgas ausreichend beständig ist.

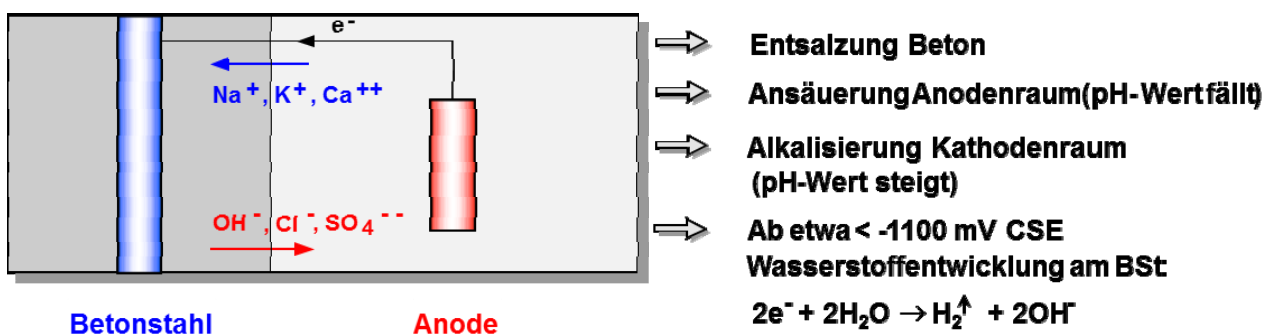


Abbildung 3: chemische Vorgänge beim KKS

Die Fähigkeit von zementgebundenen Materialien eine Ansäuerung im Anodenraum über die Reaktion mit Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) „abzupuffern“ kann bei gegebener Schutzstromdichte gemäß [8] abgeschätzt werden: Bei einem

Calciumhydroxidanteil des erhärteten Zementes von rd. 25 % ergibt sich für einen Zementanteil von 300 kg/m³ Beton bei einer Dichte des Betons von 2,4 g/cm³ ein OH⁻ Gehalt von 20,3 mol pro m³ Beton, der eine äquivalente Menge H⁺-Ionen neutralisieren kann. Zur Produktion von 1 mol H⁺-Ionen ist eine Ladungsmenge von 965500 As erforderlich, wenn man Reaktion 2 zugrunde legt. Der Alkalivorrat einer 20 mm starken Schicht Beton wäre unter obigen Annahmen bei einem Schutzstrom von 40 mA/m² Beton innerhalb von 0,3 Jahren, bei einem Schutzstrom von 0,4 mA/m² innerhalb von 309 Jahren verbraucht. Die Bewehrung wird von dieser Neutralisationsfront nicht erreicht, da durch das Anlegen eines Kathodischen Korrosionsschutzes Hydroxidionen an der Bewehrung ständig „nachproduziert“ werden. Übliche Schutzstromdichten betragen rd. 2 bis 20 mA/m²

Eine weitere Möglichkeit zur qualitativen Prüfung dieser sog. Säurepufferkapazität bei neuartigen Einbettungsmörteln ist ein Vergleich der Hydroxidionenkonzentrationen mit einem langjährig erprobten Einbettungsmörtel, dessen Eignung in der Praxis nachgewiesen ist.

4. Laboruntersuchungen an Probekörpern mit eingeschlitzten Anodenbändern

4.1 Allgemeines

Im Rahmen einer Diplomarbeit [9] wurden an der Hochschule München an insgesamt drei Stahlbeton-Probekörpern mit eingeschlitzten Bandanoden Laboruntersuchungen durchgeführt. In diesem Kapitel werden der Aufbau der Probekörper, die einzelnen Versuchsschritte sowie die ersten Ergebnisse vorgestellt. Ziel der Untersuchungen ist die Überprüfung der Eignung eines neuartigen Einbettungsmörtels.

4.2 Probekörperaufbau

Im Zuge der Untersuchung für die Eignung eines Einbettungsmörtels für den Kathodischen Korrosionsschutz von Stahlbeton wurden drei unterschiedliche Probekörper (Abmessungen L/B/H = 55 cm/37,5 cm/ 12 cm) mit je einer simulierten Reparaturstelle sowie einer Altbetonstelle entworfen, vgl. Abbildung 4. Der Probekörperaufbau erfolgt in enger Abstimmung und mit Teilvorgaben des Herstellers des Einbettungsmörtels. Zur Simulation verschiedener in der Praxis vorhandener Bauwerksbetone wurde je ein Probekörper mit folgender Betonmischung erstellt:

- Probekörper A: CEM I 52,5 R, w/z = 0,45
- Probekörper B: CEM III B 32,5, w/z = 0,45
- Probekörper C: CEM I 32,5 R, w/z = 0,65

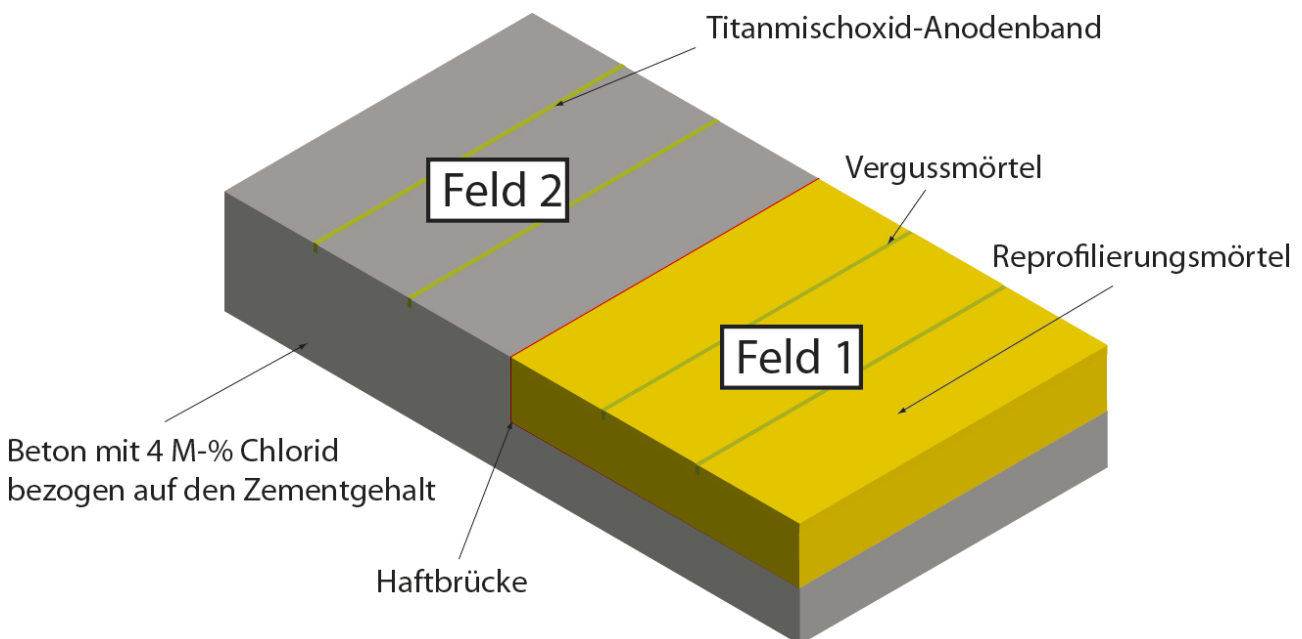


Abbildung 4: prinzipieller Aufbau der Probekörper

Bei der Herstellung der Betone wurde 4 M-% Chlorid in Form von im Zugabewasser gelösten NaCl bezogen auf den Zementgehalt (4 M-%/z) beigegeben, um eine sichere Depassivierung zu erzeugen und den Korrosionsprozess der Bewehrung in Gang zu setzen. Die Betondeckung wurde einheitlich zu 50 mm, sowie die Sieblinie der verwendeten Gesteinskörnung zu A/B16 gewählt. Zur Erfassung der erforderlichen Messwerte, fand eine Unterteilung in ein Bestandsfeld und ein reprofiliertes Feld mit je einem Q 524 A Stahlmattensegment statt, vgl. Abbildung 5. Die Segmente wurden elektrisch getrennt in der Schalung eingebaut, um die erforderlichen Stromwerte zur Ermittlung der Stromdichte bezogen auf jeweilige Stahloberfläche erfassen zu können. Weiterhin erfolgte an jedem Mattensegment der Einbau einer Silber/Silberchlorid-Referenzelektrode (Ag/AgCl-Elektrode), um das Potential des jeweiligen Segments zu erfassen.

Zur Reprofilierung bzw. für das Betonersatzsystem wurde eine Kombination aus der Haftbrücke, Reprofilierungsmörtel und Vergussmörtel eingesetzt, vgl. Abbildung 6. Beim Auftrag des Betonersatzsystems wurde die Haftbrücke „Frisch in Frisch“ mit dem Reprofilierungsmörtel auf die angefeuchtete und entsprechend vorbereitete Betonoberfläche aufgetragen. Nach Fertigstellung des Materialauftrags wurde die Reparaturstelle nachbehandelt, um ein zu schnelles Austrocknen des Mörtels zu verhindern.

Für die Stromeinleitung kamen MMO-beschichtete Titanbandanoden mit einer Breite von 85 mm zum Einsatz, die Hochkant in die zuvor erstellten Schlitze eingebracht wurden. Die gefrästen Schlitze, in denen die Anoden mittig eingelegt und anschließend in Vergussmörtel eingebettet wurden, sind mit einer Schnitttiefe von rd. 20 mm und einer Breite von 5 - 8 mm ausgeführt.

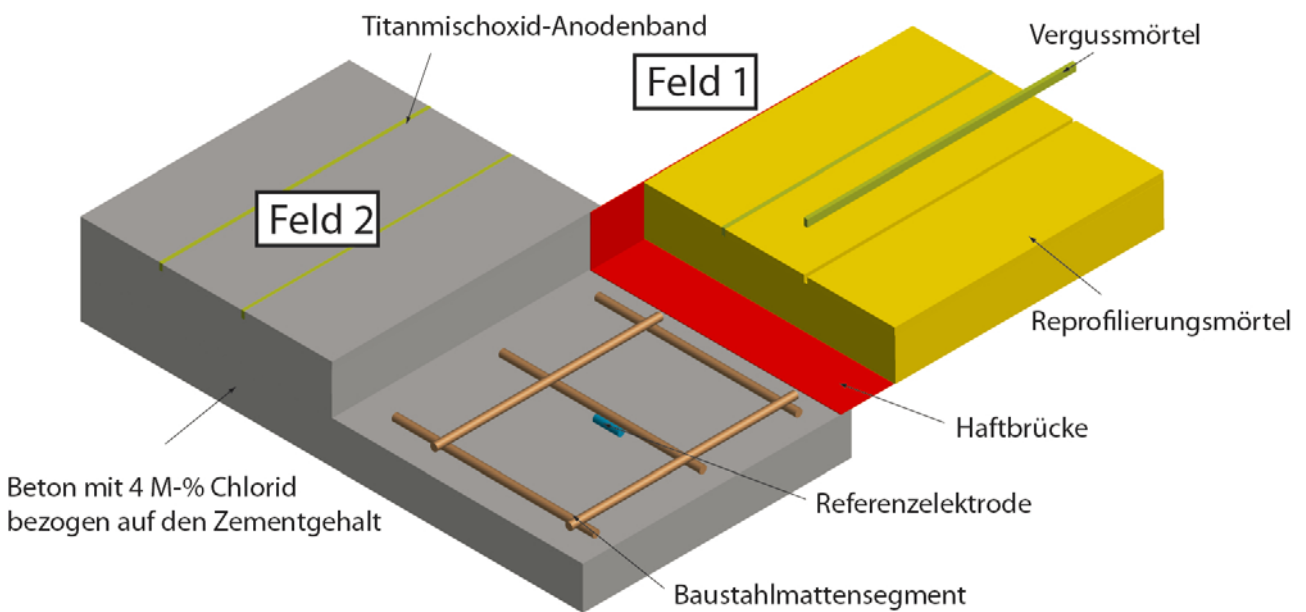


Abbildung 5: Aufbau Reprofilierungsstelle

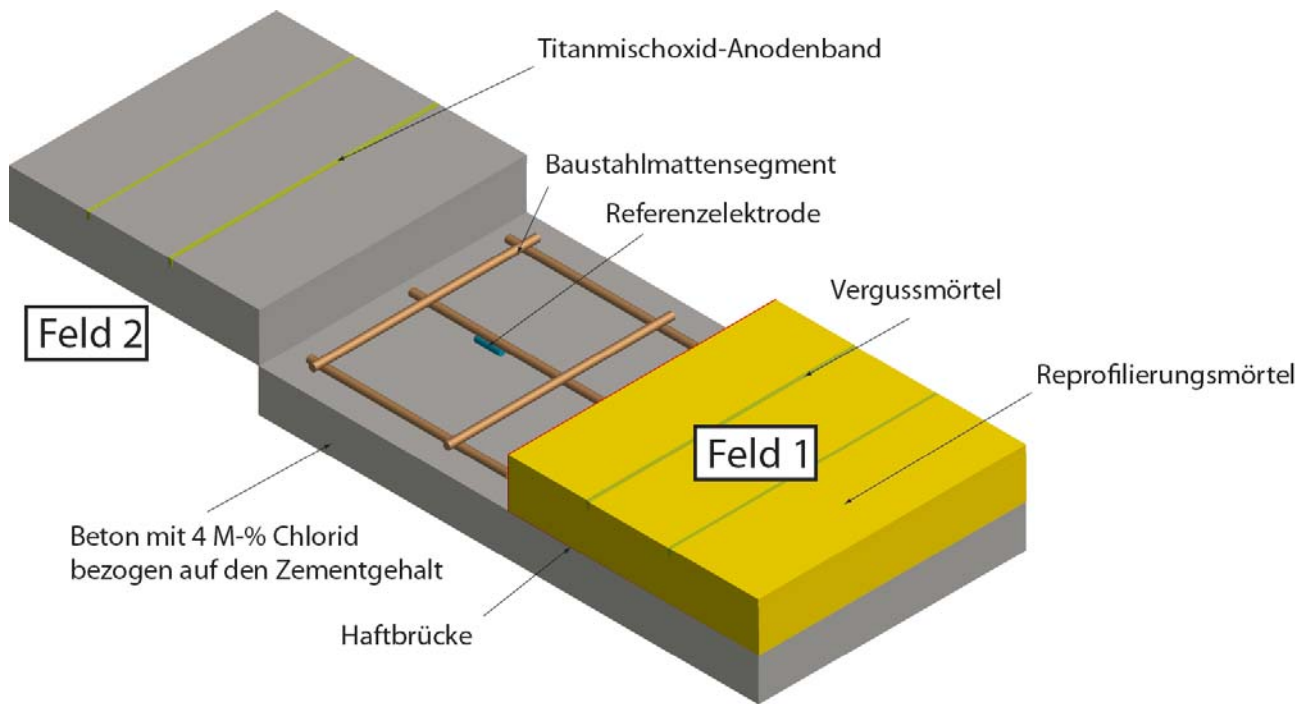


Abbildung 6: Aufbau Bereich Bestand

Zusätzlich dazu wurden die spezifischen Elektrolytwiderstände der verschiedenen Betone, des Reprofilierungsmörtels sowie des Vergussmörtels in verschiedenen Feuchtezuständen an Rechteck- bzw. Zylinderproben mit Hilfe des Zweielektrodenverfahrens ermittelt [6], vgl. hierzu auch **Abbildung 7**. Dabei befindet sich der zu untersuchende Probekörper zwischen den beiden Elektroden. Mit Hilfe der Elektroden wird auf den jeweiligen Probekörper eine Wechselspannung aufgebracht, wodurch sich ein korrespondierender Strom einstellt, mit dem sich über das Ohm'sche Gesetz sowie eines Geometriefaktors der spezifische Elektrolytwiderstand errechnen lässt.

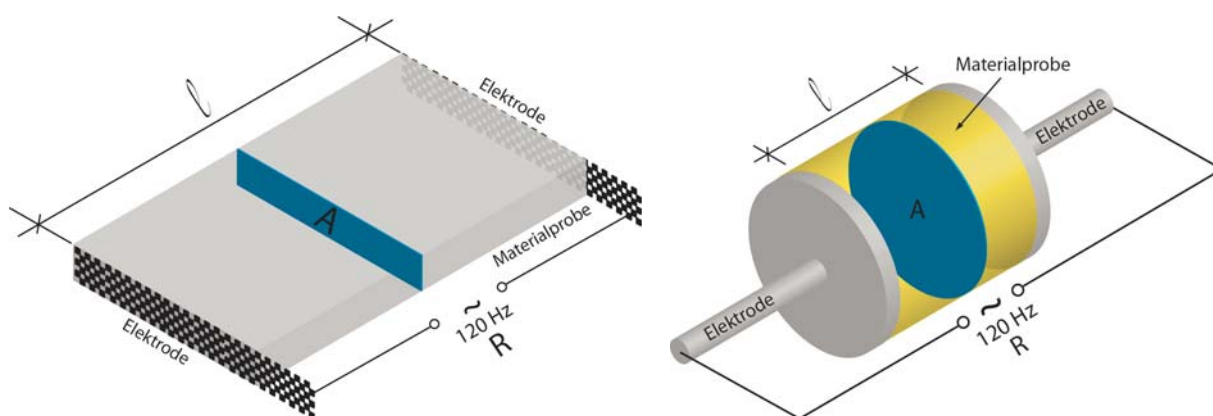


Abbildung 7: Zweielektrodenmessung am Rechteck (links) und am Zylinder(rechts)

4.3 Versuchsprogramm an den KKS-Probekörpern

Zur Simulation von verschiedenen Feuchtegehalten wurde das Untersuchungsprogramm an den drei KKS-Prüfkörpern in den nachfolgend beschriebenen vier Trocknungsstufen durchgeführt:

- Exposition 1: 10 Tage nach Betonage der Prüfkörper (Lagerung bei 20° und 75 % relative Luftfeuchte)
- Exposition 2: Wassersättigung,
- Exposition 3: nach 1. Trocknungsphase (5 Tage Trocknung bei 60°C), vgl. Abbildung 8
- Exposition 4: nach 2. Trocknungsphase (weitere 5 Tage Trocknung bei 60°C), vgl. Abbildung 8

Die drei Probekörper wurden zur Simulation eines wassergesättigten Zustands in Wannen unter Wasser gesetzt und so lange gelagert, bis sich ein Gleichgewicht hinsichtlich ihrer Massen eingestellt hatte, womit von einer homogenen und vollständigen Wassersättigung der Poren sowohl des Betons sowie der Reprofilierungsstelle auszugehen ist, vgl. Abbildung 8. Zur Simulation für die Expositionen 3 und 4 lagerten die Probekörper jeweils für einen festgelegten Zeitraum bei 60°C in einem Trockenschrank.



Abbildung 8: Wasserlagerung (Zustand 2) links, Trocknung (Zustand 3 und 4) rechts

In jeder Versuchsphase wurde das System hinsichtlich seiner Funktionalität und Wirksamkeit des Kathodischen Korrosionsschutzes geprüft. Die Funktionalität wurde durch Aufbringen unterschiedlich hoher Polarisationsströme überprüft, wohingegen die Beurteilung der Wirksamkeit durch die gemessenen Stromdichten, der Elektrolytwiderstände und der 24 h-Depolarisation erfolgt.

Im Rahmen der oben dargestellten vier Versuchsstufen wurden zur Untersuchung der Stromverteilung im jeweiligen Probekörper folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Polarisierung mit 2 V und 5 V (jeweils drei Tage), Beispiel eines Polarisationszyklus siehe Abbildung 9
- Messung der resultierenden Schutzströme (getrennt nach Beton und Reparaturstelle)
- Bestimmung der Elektrolytwiderstände (Wechselstrom bei 120 Hz) zwischen Anode und Bewehrung bzw. zwischen den Anoden selbst
- Bestimmung der 24 h Depolarisation nach Ende der genannten Polarisierungsdauer jeder Polarisierungsstufe sowie das Ausschaltpotential selbst (IR-frei)

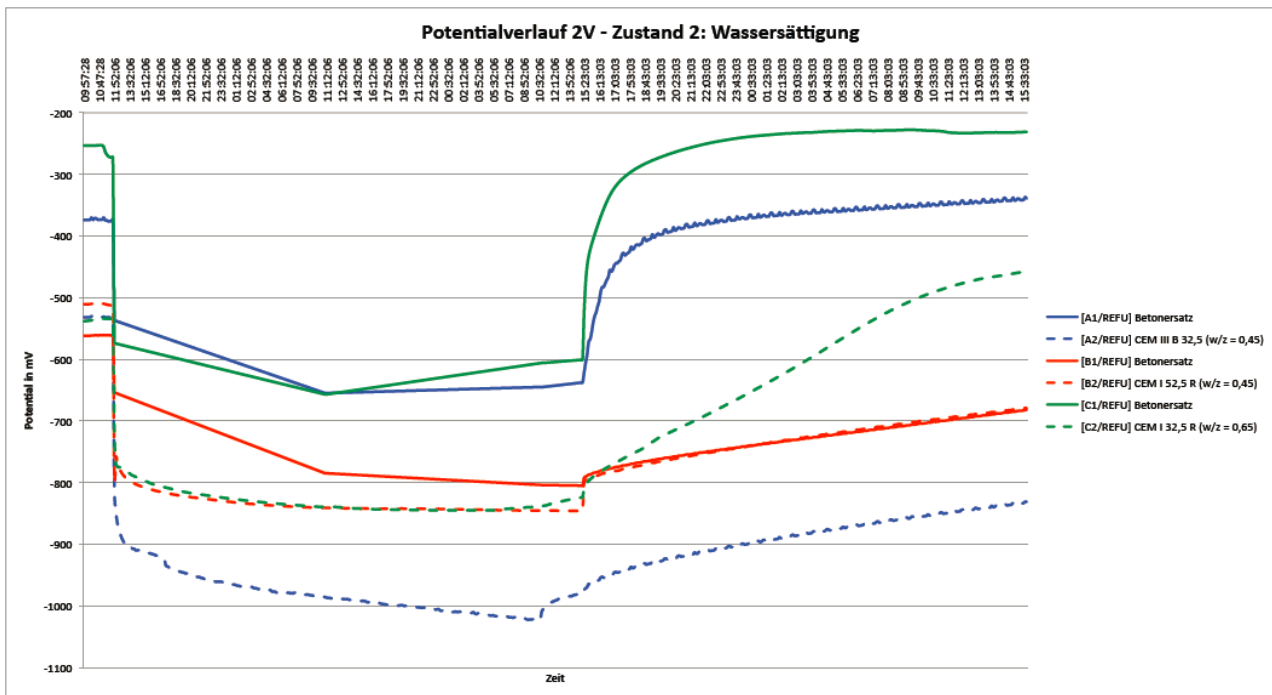


Abbildung 9: Beispiel eines Polarisationszyklus

4.4 Erste Untersuchungsergebnisse

In diesem Kapitel erfolgt eine kurze Vorstellung der ersten Versuchsergebnisse auf Grundlage des zuvor beschriebenen Versuchskörperaufbaus und des Untersuchungsprogramms. Nachfolgend sind die Messergebnisse der Stromdichten (Abbildung 10), der Absolutwiderstände (Ausbreitungswiderstand) zwischen Anodenband und Bewehrung (Abbildung 11) sowie die Depolarisationswerte (iR -frei) nach 24 h (Abbildung 12) für die einzelnen Zustände und der Polarisationsstufe 2 V dargestellt. Zur Verdeutlichung der Effekte im wassergesättigten Zustand sind jeweils die Stromdichten am Anfang und am Ende der Polarisation dargestellt.

Erwartungsgemäß zeigt sich eine Korrelation zwischen den einzelnen Stromdichten und den Absolutwiderständen in den einzelnen Bereichen. D.h., mit steigendem Elektrolytwiderstand, hervorgerufen durch den Feuchteentzug infolge der Trocknungsstufen, verringern sich auch die gemessenen Stromdichten. Die beste Leitfähigkeit und somit auch die höchsten Stromdichte zeigen sich, unabhängig der einzelnen Trocknungszustände, bei Prüfkörper C im Bereich des Betons (C2). Bei dem genannten Prüfkörper C (CEM I mit hohem w/z -Wert) ergeben sich daher auch die größten Unterschiede zwischen den Stromdichten des Originalbetons und des Betonersatzes. In den Prüfkörpern A und B sind diese Unterschiede weitaus geringer.

Die in Abbildung 12 dargestellten 24 h-Depolarisationswerte zeigen, dass das gemäß DIN EN 12696 geforderte 100 mV-Kriterium vor allem in den trockeneren Zuständen zum Teil nicht eingehalten werden konnte. Dies resultiert einerseits aus den sehr korrosiven Versuchsbedingungen (sehr hoher Chloridgehalte) und der andererseits jeweils nur kurzen Polarisationsdauer von nur 3 Tagen, in der sekundären Schutzkriterien des Kathodischen Korrosionsschutzes nahezu keinen Einfluss nehmen. Diese sekundären Schutzeffekte, die erst nach längerer Zeit der Polarisation zum Tragen kommen, rufen einen Anstieg des pH-Wertes an der Stahloberfläche (stabilisierende Auswirkung auf die Passivschicht) sowie einer Absenkung des Chloridgehalts an der Stahloberfläche (infolge Migration der negativ geladenen Chloridionen im elektrischen Feld in Richtung Anode) hervor. Bei einer Polarisation von 5 V konnten die geforderten Depolarisationswerte für den trockenen Zustand 3 bei allen Prüfkörpern erreicht werden.

Eine abschließende Bewertung der Eignung des Einbettungsmörtels kann erst unter Berücksichtigung des Depolarisationsverhaltens nach Exposition 4 sowie der Veränderung der Elektrolytwiderstände nach vollständiger Trocknung erfolgen.

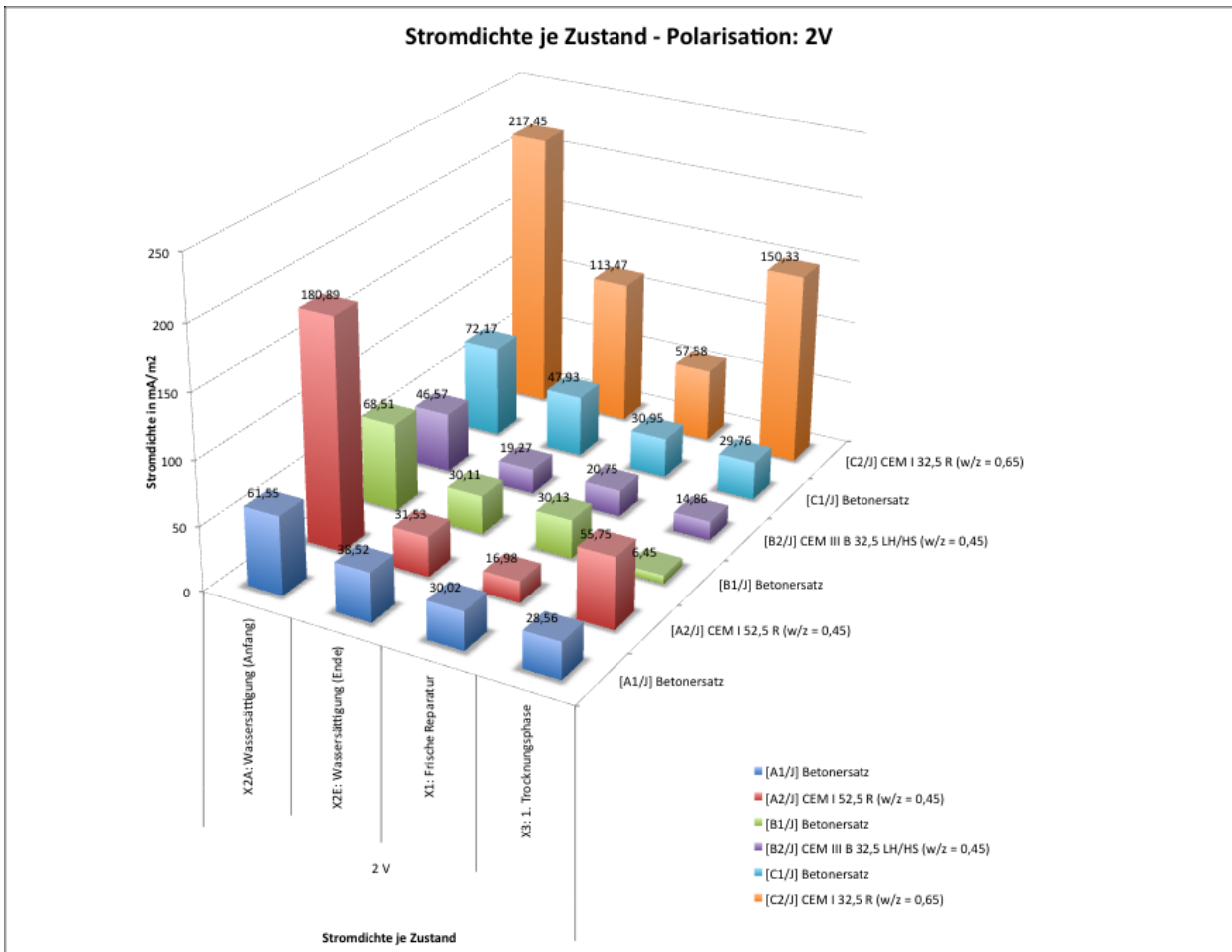


Abbildung 10: Stromdichten für die Polarisation bei 2 V in den Expositionen 1 bis 3

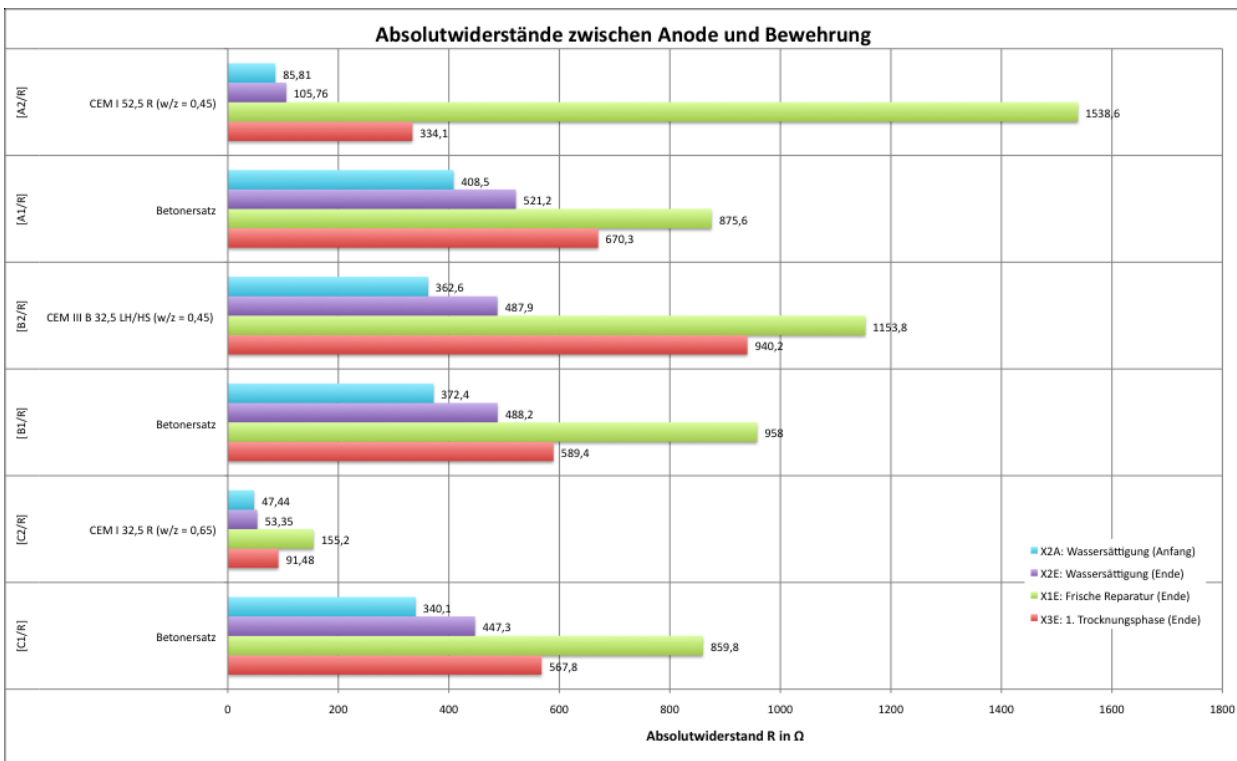


Abbildung 11: Absolutwiderstände zwischen Anode und Bewehrung für die einzelnen Expositionen

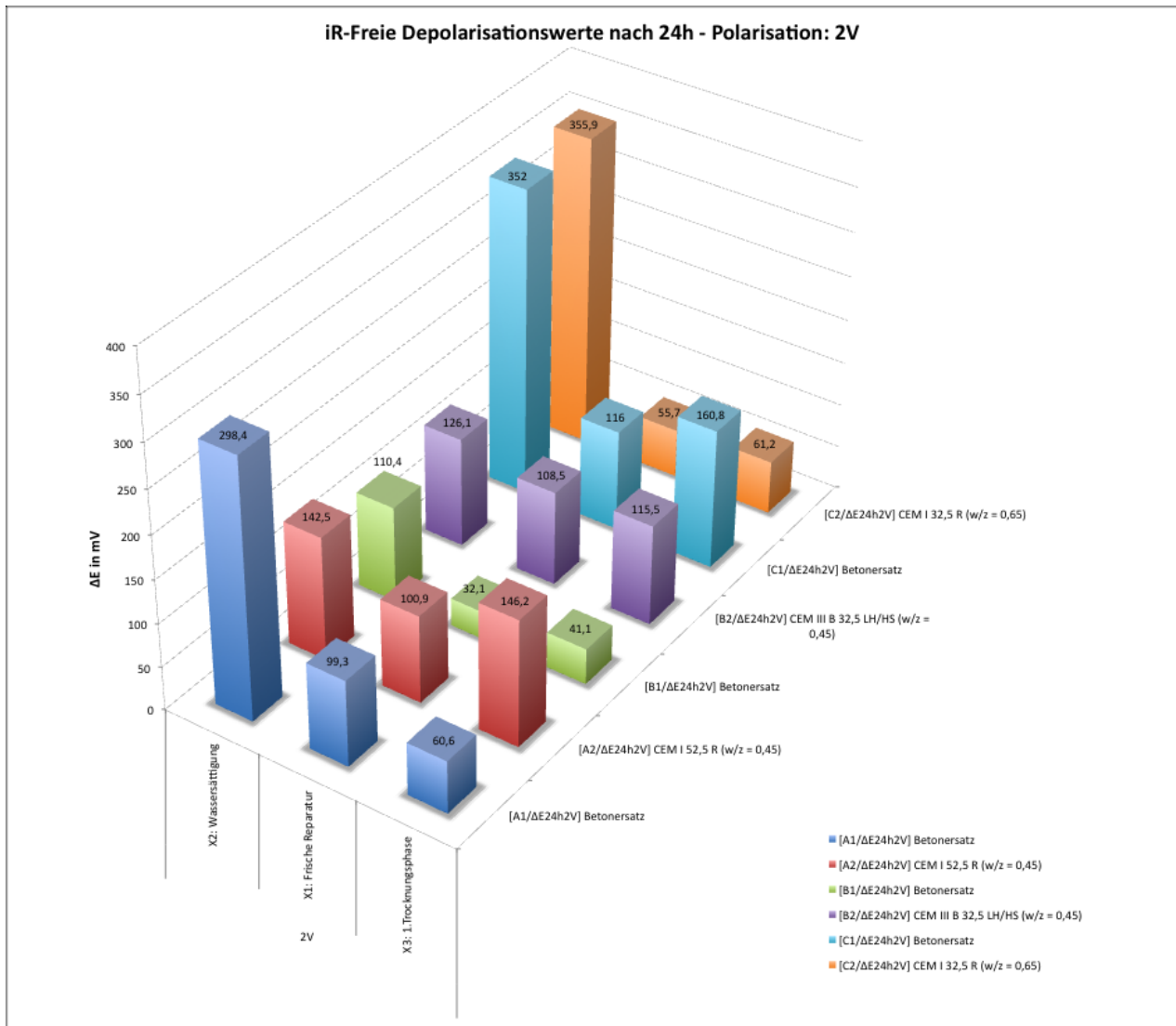


Abbildung 12: 24 h – Depolarisation nach Polarisation bei 2 V in den einzelnen Expositionen

Literatur

1. Eichler, T.: Grundlagen des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahl in Beton. Symposium Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken, Esslingen, 20. und 21. November 2008.
2. DIN EN 12696; 2000-06: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton; Deutsche Fassung EN 12696:2000
3. Dauberschmidt, C.; Sodeikat, Ch.; Vestner, S.: Instandsetzung einer Betonbrücke mit Walzträgern nach dem Prinzip des Kathodischen Korrosionsschutzes. Beton- und Stahlbetonbau 11/2009
4. 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.
5. 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)
6. RILEM TC _E7-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring metallic Corrosion, Materials and Structures, Vol. 99, December 2000, pp 603 – 611
7. Dauberschmidt, C.: Grundlagen des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahl in Beton. Symposium Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken, Esslingen, 18. und 19. November 2009.
8. Müller, R.; Holtzhauer, K.: Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstählen – Langzeitbeständigkeit von Anodenmaterialien und Mörtel, Forschungsbericht Nr. 503, August 1992
9. Scholz, M.: Untersuchung der Eignung von Vergussmörtel für den kathodischen Korrosionsschutz von Stahlbeton, Diplomarbeit Hochschule München, Oktober 2010