

Mitteilungen des
fkks Fachverband Kathodischer
Korrosionsschutz e. V.

1/2022

deutsch

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

Übersetzung der Veröffentlichung in Materials and Corrosion:

Thorsten Eichler and Bernd Isecke, "Stray current-induced corrosion in cathodic protection installations of steel-reinforced concrete structures: FEM study of the critical parameters," Materials and Corrosion, vol. 71, no. 5, pp. 738-748, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/maco.202011620>.

Zusammenfassung

Es wurde eine Vielzahl von Parametern mittels numerischer Berechnungen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die DC-Streustromkorrosion von Stahlbetonstrukturen untersucht. Eine vereinfachte Modellgeometrie wurde verwendet, um die relevanten Parameter und ihre Interaktion im Hinblick auf streustrombeeinflusste Strukturen zu extrahieren. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf Stahlbetonkonstruktionen, die mit kathodischen Schutzanlagen ausgestattet sind. Die Ergebnisse belegen die komplexen Wechselwirkungen zwischen allen untersuchten Parametern untereinander. Die mögliche Relevanz weiterer Parameter, die nicht Gegenstand dieser Studie sind, wurde hervorgehoben.

Stichworte: Streuströme, kathodischer Schutz, Korrosion, FEM, Stahl in Beton

Dr.-Ing. Thorsten Eichler und Prof. Dr.-Ing. Bernd Isecke

CORR-LESS Isecke & Eichler Consulting GmbH & Co. KG

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

EINLEITUNG

Korrosion von Stahl in Beton ist eine der Hauptursachen für die Degradation von Konstruktionen aus Stahlbeton (RC) und verursacht weltweit Jahr für Jahr erhebliche Kosten für Instandhaltung und Reparatur [1]. Obwohl die grundlegenden Mechanismen und Instandsetzungsstrategien im Allgemeinen verstanden sind, gibt es immer noch mehrere offene Fragen bezüglich spezifischer Korrosionsarten, die zusätzlich auftreten oder sogar durch die Instandsetzungsstrategie verursacht werden können. Ein Beispiel für reparaturstrategieinduzierte Korrosion ist der bekannte Fall der Korrosion beim „Patch-Repair“. Die lokale Repassivierung von zuvor korrodierenden Stahloberflächen kann zur Bildung neuer Kathodenbereiche führen, die benachbarte Stahloberflächen, die noch in chloridhaltigem Beton eingebettet sind, über ihr spezifisches Lochkorrosionspotential hinaus polarisieren. Solch eine Instandsetzungsstrategie muss vermieden werden, wenn die in den Randbereichen der Reparaturstellen verbleibende Chloridkonzentration ausreichend hoch ist, um Lochkorrosion auszulösen.

Streustromkorrosion, die durch elektrochemische Sanierungsmaßnahmen verursacht wird, ist ein weiteres Thema, das häufiger ignoriert als in Betracht gezogen wird. Obwohl zum Thema Streustromkorrosion durch anlagenfremde Gleichstromquellen, mehrere Arbeiten und sogar Normen vorliegen, vgl. [2-9] und [10], sind streustromverursachende Gleichstromkreise normalerweise kein Bestandteil eines Betonbauwerks. Der Strompfad durch die Bewehrung ist in der Regel von Beton mit im Vergleich zum Stahl geringer Leitfähigkeit umgeben, so dass dieser eine abschirmende Wirkung auf mögliche Streuströme ausübt. Bei der Anwendung von elektrochemischen Sanierungsmaßnahmen wie dem elektrochemischen Chloridentzug (ECE), der elektrochemischen Realkalisierung (ER) oder dem kathodischen Korrosionsschutz (KKS) an Stahlbetonbauwerken hat das elektrische Feld, das durch die Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode entlang des widerstandsbehafteten Betons entsteht, keine außerhalb des Systems liegende Quelle. Daher fließt der Strom direkt durch den Beton und kann auf seinem Weg von der Anode zur Kathode in jedes Metall ein- und austreten, welches nicht Teil des Kathodenkreises ist.

Die EN ISO 12696, die den aktuellen Stand der Technik beim kathodischen Schutz von Stahl in Beton darstellt, empfiehlt Folgendes: *„Alle zusätzlichen Stähle, die an der Betonstruktur befestigt oder Teil davon sind (z. B. eingebettete Stahlträger, Lager, Entwässerungsröhre), müssen entweder wie oben beschrieben auf Kontinuität geprüft und, falls erforderlich, verbunden werden ...“*, vgl. [11]. Die Auslegung dieses Hinweises und seine Anwendung auf die

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

Praxis vor Ort scheint trivial. In Wirklichkeit ist sie es jedoch nicht. Eine elektrische Kontaktierung metallischer Einbauteile ist in vielen Fällen weder möglich noch notwendig, worin tatsächlich der Sinngehalt der o.g. Aussage liegt: Es muss nachgewiesen werden und bei Bedarf kontaktiert werden.

Im Jahr 2007 haben *Bertolini et. al.* [12] betont, dass Streuströme nur bei hohen Stromdichten Korrosion an passivem Stahl auslösen können und dass die zur Korrosionsauslösung notwendige Ladung mit abnehmender Streustromdichte zunimmt. Sie fanden auch heraus, dass Streuströme die Korrosion in Gegenwart von Chloriden verstärken können, was mit der Tatsache zusammenhängt, dass sie „*die Entstehung von Lochkorrosion fördern oder bereits korrodierende Bereiche vergrößern können*“. Bertolini et al. untersuchten den Zementstein in der Nähe des Stahls, der durch Streustrom Korrosion erfahren hat, konnten aber weder erhöhte Chloridkonzentrationen noch eine signifikante Abnahme des pH-Werts nachweisen. Der letztgenannte Befund bleibt unerklärt. Antworten auf offene Fragen, die sich aus solchen Widersprüchen ergeben, könnten lediglich durch zukünftige Untersuchungen gefunden werden. Zumindest unter chloridfreien Bedingungen scheint die Senkung des pH-Wertes eine notwendige Bedingung für den Beginn der Korrosion zu sein. Selbst wenn die transpassive Eisenauflösung, vgl. [13, 14] das Phänomen hinreichend erklären würde, wäre es unwahrscheinlich, dass dies ohne massive Sauerstoffentwicklung und damit ohne Ansäuerung des Zementleims in der Nähe der Stahloberfläche geschieht.

Duranceau et. al. [15] untersuchten die Auswirkungen von Streuströmen auf Bewehrungsstäbe in Betonzylindern. Sie kamen im Gegensatz zu Bertolini et al. zu dem Schluss, dass selbst geringe Streustromdichten im Bereich von $0,16 \text{ mA/m}^2$ bis $0,64 \text{ mA/m}^2$ signifikante Auswirkungen auf den Korrosionszustand von Bewehrungsstäben in Beton haben. Nach Duranceau et. al. führt das Überschreiten einer Ladungsdichtegrenze von 300 Ah/m^2 zu Streustromkorrosion von Stahl in Beton, wenn keine andere Chloridquelle zur Verfügung stand, als die im Zugabewasser gelösten Chloride, die in einer Konzentration von weniger als 5 mg/l Cl^- vorlagen. Trotz des Hinweises auf die Ergebnisse von Bertolini et. al. wurde keine weitere Erklärung für die widersprüchlichen Ergebnisse gegeben.

Wu et. al. [16] stellen einen numerischen Ansatz zur Analyse von Streuströmen vor, die durch kathodische Schutzsysteme für Mauerwerksbauten mit innenliegenden Stahlrahmen verursacht werden. Sie verwenden die Boundary-Elements-Methode (BEM), um die vom Streustrom betroffenen Teile des Bauwerks zu identifizieren, und verglichen die Ergebnisse mit experimentellen Daten. Wu et. al. kamen zu dem Schluss, dass in der Praxis gemessenen

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

Potentialverteilungsdaten nicht zur Ermittlung von Streustromeffekten auf diskontinuierlichem Stahl verwendet werden können. Daten über Korrosionsraten oder neue Ansätze zu den relevanten Mechanismen sind nicht Gegenstand der Veröffentlichung.

Streustromeffekte auf in Mörtel eingebettete Stahlfasern waren Gegenstand von Untersuchungen von *Solgaard et. al.* im Jahr 2013 [17]. Die Autoren betonten, dass Stahlfasern aufgrund der Tatsache, dass sie viel kürzer als herkömmliche Bewehrungsstäbe sind, weniger anfällig für Streustromkorrosion sind. Diese Schlussfolgerung wurde durch experimentelle Arbeit und theoretische Überlegungen belegt. Nach *Solgaard et. al.* ist der Potentialgradient durch den Mörtel ein wichtiger Parameter, der sich auf das Auftreten von Streuströmen auswirkt.

Eine Übersichtsarbeit von *Chen et. al.* [18] gibt einen Überblick über Streustromquellen, wobei ECE, ER oder KKS von Stahl in Beton nicht speziell berücksichtigt werden, sondern hauptsächlich elektrifizierte Bahnstrecken, Hochspannungsleitungen und KKS-Systeme für erdverlegte Bauwerke. Im Falle von Stahlbeton wird die gleichstrominduzierte Korrosion in der Nähe von Eisenbahnen behandelt. Daten über Korrosionsraten in solchen Systemen werden nicht gezeigt. Die Autoren betonen, dass insbesondere bei Beton der, im Vergleich zu anderen Korrosionssystemen, hohe spezifische Widerstand des Elektrolyten zur Überbewertung einer Gefährdung durch Streustromkorrosion führen kann.

Fast man die verfügbare Literatur zur streustrominduzierten Korrosion von Stahl in Betonkonstruktionen zusammen, lassen sich mehrere Schlussfolgerungen ziehen:

- Die experimentellen Daten stimmen nicht vollständig mit den theoretischen Überlegungen überein, insbesondere Untersuchungen zur Ansäuerung und zur streustrombedingten Korrosionsinitiierung unter chloridfreien Bedingungen liefern eine große Bandbreite an verfügbaren Ergebnissen.
- Es gibt Hinweise darauf, dass externe Quellen, wie z. B. elektrische Eisenbahnen und interne Quellen, wie z. B. KKS-Systeme für Stahl in Beton, unterschiedliche Auswirkungen auf die streustrombedingte Korrosionsinitiierung haben. Ursächlich hierfür sind wahrscheinlich die spezifischen Bedingungen zur Ausbildung von Potentialgradienten.
- Der Einfluss von Streuströmen auf den Korrosionszustand von metallischen Strukturen wird im Wesentlichen durch die Widerstandskonfiguration des Gesamtsystems bestimmt.
- Systematische Untersuchungen zum Einfluss von Parametern wie Polarisationswiderstand, Leitfähigkeit des Betons, Ausgangsspannung der Gleichstromquelle und Potentialgradient entlang der betroffenen Struktur bzw. deren Wechselwirkung auf

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

die Streustromkorrosionsanfälligkeit von bewehrten Strukturen liegen bisher nicht vor.

Unter Berücksichtigung der elektrochemischen Grundlagen ist es offensichtlich, dass die Phasengrenze Stahl | Beton einen erheblichen Einfluss darauf haben muss, wie Streuströme den Korrosionszustand der Struktur beeinflussen. Während Wechselströme durch elektrochemische Systeme fließen können, ohne eine Reaktion an den Elektrodenoberflächen hervorzurufen, ist dies bei Gleichströmen normalerweise nicht der Fall. Daher muss die Polarisationscharakteristik der Phasengrenze bei der Untersuchung von Streustromkorrosion im Fokus des Interesses liegen. Selbst unter passiven Bedingungen ist ein Ladungstransfer vom Stahl zum Elektrolyten und umgekehrt möglich. Die grundlegenden Reaktionen, die an passiven Eisen- oder Betonstahlelektroden in alkalischen Elektrolytlösungen berücksichtigt werden müssen, sind die Hydroxidoxidation (1) als anodische Teilreaktion und die Sauerstoffreduktion (1a) als kathodische Teilreaktion.



Die Eisenauflösung gemäß (2) kann zusätzlich nach der Depassivierung erfolgen, z. B. durch Chloride oder durch Verlust des passivitätserhaltenden pH-Wertes (1).



Die Stromverteilung in Stahlbetonbauwerken bei Anwendung von KKS, ECE oder ER ist aufgrund der heterogenen Beschaffenheit des Betons im Allgemeinen ungleichmäßig. Weder die Sauerstoffkonzentration noch der Feuchtigkeitsgehalt oder gar die chemische Zusammensetzung sind in jeder Richtung des Betons konstant. Daher ist es zwingend erforderlich, bei der Modellierung von Korrosionsproblemen in RC-Strukturen bekannte, ungünstige oder ein großes Spektrum von Randbedingungen zu berücksichtigen, damit kritische Punkte ermittelt werden können, die die Integrität der Struktur potenziell beeinträchtigen. Aus diesem Grund basieren die im Grunde theoretischen Überlegungen dieser Arbeit auf einer nu-

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

merischen Parameterstudie, die ein weites Spektrum von Randbedingungen abdeckt, welche in der Praxis vorkommen können. Leider fehlen derzeit noch experimentelle Daten, die jedoch im Rahmen künftiger Forschungen zur Verfügung gestellt und zur Bestätigung der in den folgenden Kapiteln gezogenen Schlussfolgerungen herangezogen werden könnten.

NUMERISCHES MODELL UND EINGANGSPARAMETER

Die numerischen Berechnungen zur Streustromkorrosion wurden mithilfe des Softwarepakets COMSOL Multiphysics im Anwendungsmodus „sekundäre Stromverteilung“ durchgeführt. Da das Ziel dieser Studie nicht darin bestand, ein allgemeingültiges Modell zur Berechnung der Korrosionsraten bei Streustromkorrosion zu erstellen, sondern die entscheidenden Parameter und ihre Wechselwirkung zu untersuchen, wurde die Modellgeometrie auf das Wesentliche reduziert, vgl. Abb. 1.

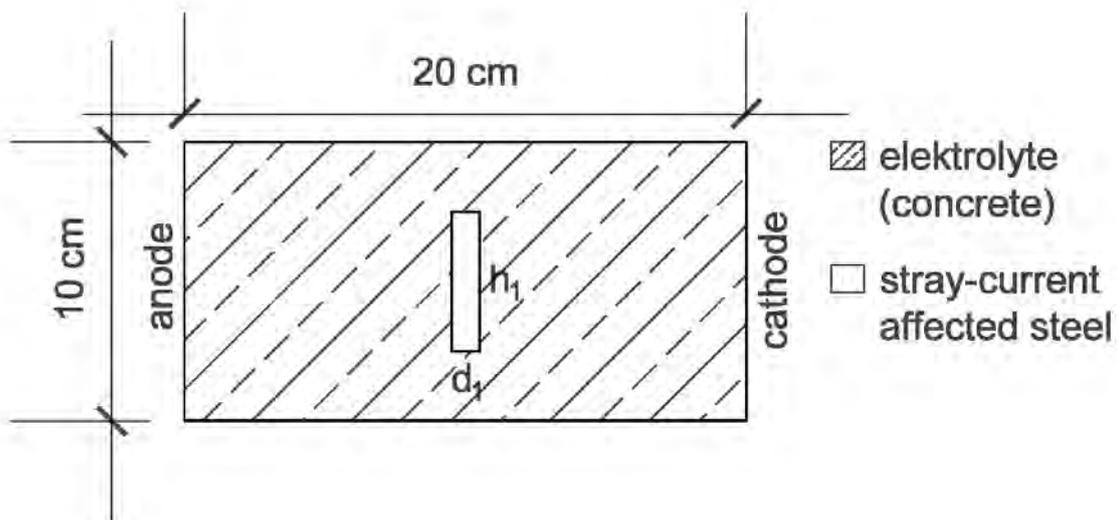


Abbildung 1: Grundgeometrie des Elektrolytkörpers und der vom Streustrom betroffenen Struktur, d_1 ist ein variabler Geometrieparameter

Tabelle 1 fasst die in den verschiedenen Modellierungsschritten verwendeten Konstanten und Parametervariationen zusammen.

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

Tabelle 1: Konstanten und Variablen, die im numerischen Ansatz verwendet werden

U_{anode}	$R_{f,a}$	$R_{f,c}$	σ_{el}	d_1	h_1
[V]	$[\Omega \cdot m^2]$	$[\Omega \cdot m^2]$	$[S \cdot m^{-1}]$	[m]	[m]
1.5	0.01 – 1,000	0.1	0.0001 – 0.1	0.01 – 0.05	0.05 – 0.1

Dabei ist U_{anode} die zwischen Anode und Kathode angelegte Spannung, $R_{f,a}$ der Schichtwiderstand des anodischen Teils der streustrombeeinflussten Struktur, $R_{f,c}$ der entsprechende Schichtwiderstand an der Kathode, σ_{el} der Leitwert der Elektrolytlösung (hier der Beton), d_1 die Dicke des streustrombeeinflussten Metalls und h_1 seine Höhe. Es ist zu betonen, dass der Schichtwiderstand $R_{f,i}$ einen dünnen Oberflächenwiderstand darstellt, der durch die Oxidschichtbildung an der Stahloberfläche entsteht. Somit bedingt $R_{f,i}$ lediglich eine Widerstandspolarisation und trägt nicht zum eigentlichen Elektrodenprozess bei, vgl. [19]. Die Unterscheidung zwischen anodischem und kathodischem Schichtwiderstand berücksichtigt, dass sowohl Sauerstoff- als auch Oxidreduktion an den kathodischen Oberflächenbereichen stattfinden, während Sauerstoffentwicklung und Eisenoxidation an den anodischen Oberflächenbereichen auftreten können. Die Oxidreduktion führt zu abnehmenden und daher deutlich niedrigeren Widerständen an den kathodischen Seiten, vgl. [20, 21] im Vergleich zu anodischen Seiten, wo die Eisenoxidation zu steigenden Oxidwiderständen führen kann.

Die Randbedingungen an der anodischen und kathodischen Seite wurden jeweils durch den anodischen bzw. kathodischen Teil der Sauerstoffelektrode definiert, wobei ein vereinfachter Butler-Volmer-Ansatz verwendet wurde (vgl. Abb. 2).

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

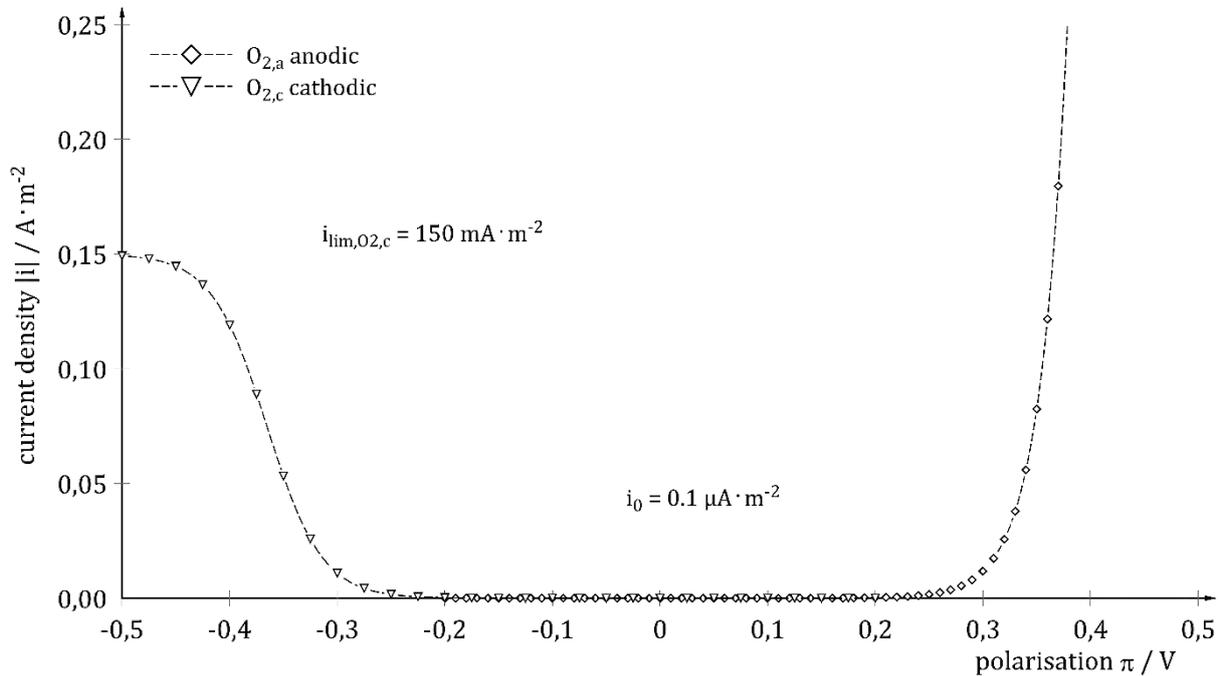


Abbildung 2: Anodische und kathodische Teilreaktionskinetik als Randbedingungen für Schritt eins der numerischen Ansätze

Die anodische und kathodische Teilstromdichte-Potential-Beziehung wurde mit Hilfe von (3) und (4) berechnet.

$$i_a = i_0 \cdot \frac{\left[\text{Exp}\left(\pi \frac{z \cdot \alpha \cdot F}{R \cdot T}\right) \right]}{\left[1 + \frac{i_{O_2}}{i_{diff,a,O_2}} \cdot \text{Exp}\left(\pi \frac{z \cdot \alpha \cdot F}{R \cdot T}\right) \right]} \quad (3)$$

$$i_c = i_0 \cdot \frac{\left[-\text{Exp}\left(-\pi \frac{z \cdot (1-\alpha) \cdot F}{R \cdot T}\right) \right]}{\left[1 - \frac{i_{O_2}}{i_{diff,c,O_2}} \cdot \text{Exp}\left(-\pi \frac{z \cdot (1-\alpha) \cdot F}{R \cdot T}\right) \right]} \quad (4)$$

Dabei bezeichnen i_a und i_c in $A \cdot m^{-2}$ die Stromdichte an der anodischen und kathodischen Oberfläche und i_0 die Austauschstromdichte in $A \cdot m^{-2}$ bei einer Polarisation von $\pi = 0$ V. Da die anodische Diffusionsgrenzstromdichte $i_{diff,a,O_2} \rightarrow \infty$ in $A \cdot m^{-2}$ im Falle der Sauerstoffentwicklung gegen unendlich konvergiert, ist der zweite Term im Nenner gleich Null. Die übrigen

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

Konstanten sind die Austauschstromdichte der Sauerstoff-Elektrode i_{O_2} in $A \cdot m^{-2}$, die gleich i_0 gesetzt wurde, der Ladungstransferkoeffizient $\alpha = 0.5$, die Faraday-Konstante $F = 96,485 A \cdot s \cdot mol^{-1}$, die Temperatur T in K und die allgemeine Gaskonstante $R = 8,314427 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$. Die Wertigkeit der Elektrodenreaktion z wurde zu 2 gesetzt.

Tatsächlich stimmt $z = 2$ nicht mit der durch die Gleichungen (1) und (1a) beschriebenen Reaktion überein. De facto ist die Reaktionskinetik der Sauerstoffelektrode komplexer als die Gleichung (1 und 1a) vermuten lässt. Da die Bildung von Peroxiden ($z = 2$) bereits bei niedriger Polarisation auftritt, kann die Einstellung $z = 2$ für die betrachteten Prozesse als angemessen angesehen werden, vgl. [22, 23].

Die limitierende Sauerstoffdiffusionsstromdichte $i_{diff,c,O_2} = 150 \cdot 10^{-3} A \cdot m^{-2}$ repräsentiert eine Lösung, die der Luft ausgesetzt und mit gelöstem Sauerstoff gesättigt ist, vgl. [23]. Tatsächlich ist i_{diff,c,O_2} ein undefinierter Parameter in RC-Strukturen, da dieser stark von der Diffusionsschichtdicke δ in m, dem Diffusionskoeffizienten für Sauerstoff D_{O_2} in $m^2 \cdot s^{-1}$ und der vorliegenden Sauerstoffkonzentration der Lösung c_{O_2} in $mol \cdot m^{-3}$ gemäß (5) abhängt.

$$i_{diff,c,O_2} = -4 \cdot F \cdot D_{O_2} \cdot \frac{c_{O_2}}{\delta} \quad (5)$$

Während in teilgesättigten Porensystemen die oben genannten Parameter nicht leicht abzuschätzen sind, kann insbesondere die Diffusionsschichtdicke von etwa $5 \cdot 10^{-3} cm$ in Lösungen auf die Betondeckungsdicke im Bereich von mehreren Zentimetern für wassergesättigten Beton anwachsen. Somit kann i_{diff,c,O_2} je nach Feuchtigkeitsgehalt des jeweiligen Betons in einem großen Wertebereich variieren. Zum Zwecke der Vereinfachung, wurde i_{diff,c,O_2} für alle in dieser Arbeit vorgestellten Berechnungen auf $150 \cdot 10^{-3} A \cdot m^{-2}$ festgelegt.

FEM-BERECHNUNGEN UND ERGEBNISSE

Der erste Berechnungsschritt zielte darauf ab, den Einfluss der Betonleitfähigkeit und des Parameters d_1 auf die Streustromdichte zu untersuchen. Die Treibspannung zwischen Anode

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

und Kathode U_{anode} wurde konstant auf 1,5 V gesetzt und es wurden keine Oberflächenwiderstände berücksichtigt, die eine zusätzliche Widerstandspolarisation an Anode und Kathode verursachen. Somit betrug der tatsächliche gesamte Potentialabfall entlang des Elektrolyten ebenfalls 1,5 V, wie in Abb. 3 und Abb. 4 beispielhaft dargestellt.

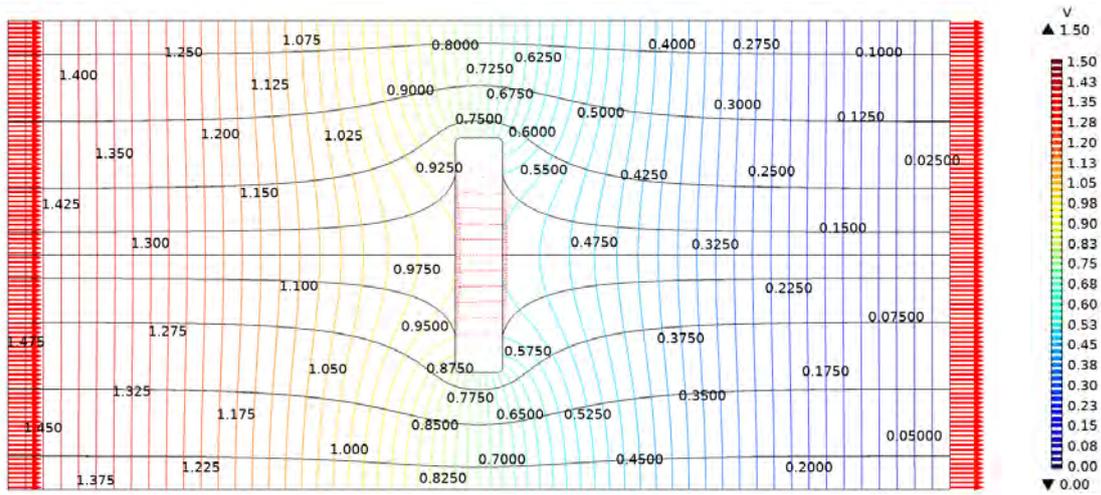


Abbildung 3: Strom- und Potentialverteilung im Elektrolyten innerhalb der Geometrie für die Randparameter $d_1 = 0,01 \text{ m}$ und $\sigma_{\text{el}} = 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, rote Pfeile stellen die Stromdichte dar

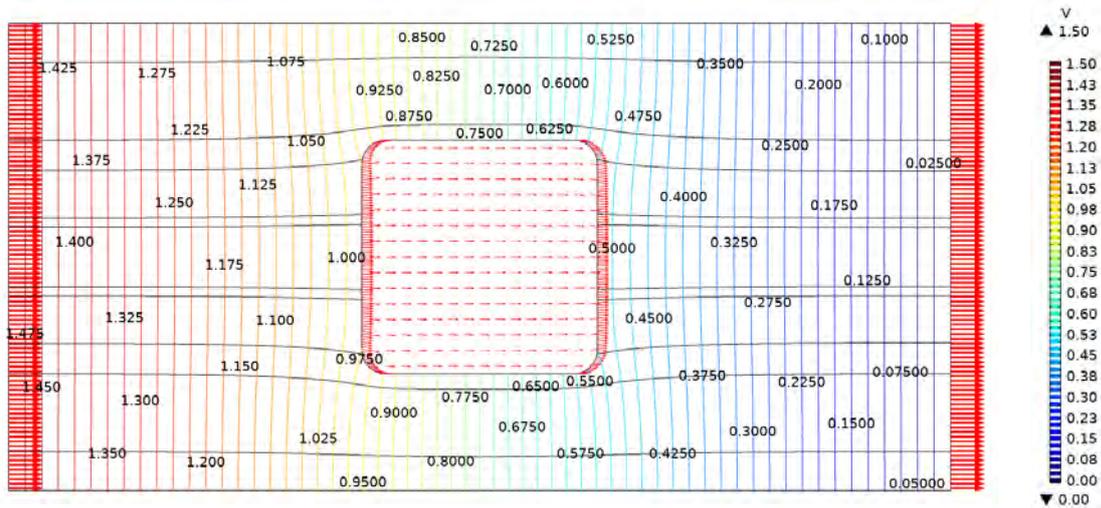


Abbildung 4: Strom- und Potentialverteilung im Elektrolyten innerhalb der Geometrie für die Randparameter $d_1 = 0,05 \text{ m}$ und $\sigma_{\text{el}} = 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, rote Pfeile stellen die Stromdichte dar

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

Der anodische Filmwiderstand $R_{f,a}$ wurde zu $10 \Omega \cdot m^2$ festgelegt, was einer Stahlelektrode entspricht, die von einer dichten und leitfähigen Passivschicht bedeckt ist, vgl. [24]. Der kathodische Schichtwiderstand repräsentiert eine elektrochemisch reduzierte Oxidschicht mit $R_{f,c}=0,01 \Omega \cdot m^2$, die keine signifikante kinetische Hemmung des kathodischen Teilprozesses nach Gleichung (1a) bewirkt. Die Berechnungen wurden mit einer sehr fein vermaschten Struktur durchgeführt. Tabelle 2 und Tabelle 3 geben einen Überblick über die statistischen Vernetzungs- und Elementdimensionsparameter.

Tabelle 2: Netzstatistik

Anzahl der Eckpunkte	Minimale Elementqualität	Mittlere Elementqualität	Element-Flächenverhältnis	Elementtyp	Netzfläche [m ²]
10604	0.5466	0.9164	0.002143	triangle	0.02

Tabelle 3: Elementparameter

Maximale Elementgröße [m]	Minimale Elementgröße [m]	Faktor der Krümmung	Element-Flächenverhältnis	Vordefinierte Größe
0.002	$4 \cdot 10^{-6}$	0.2	0.002143	Sehr fein

Typische Schutzstromdichten für Stahlbetonkonstruktionen liegen im Bereich von $2 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2} \leq i_p \leq 20 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ bezogen auf die geschützte Stahlfläche. Betrachtet man Abb. 5, so wird deutlich, dass der näher zu betrachtende Leitfähigkeitsbereich $3.1 \cdot 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1} \leq \sigma_{el} \leq 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ beträgt. Die entsprechenden spezifischen Betonwiderstände, welche die Kehrwerte der Leitfähigkeiten sind, liegen ungefähr im Bereich von $300 \Omega \cdot \text{m}^2$ und $3250 \Omega \cdot \text{m}^2$. Dies deckt gemäß [25] einen weiten Bereich der elektrischen Widerstände von Beton, mit dichter Gesteinskörnung, bestehender Bauwerke (Alter > 10 Jahre) bei 20 °C und verschiedenen Luftfeuchtigkeiten ab.

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

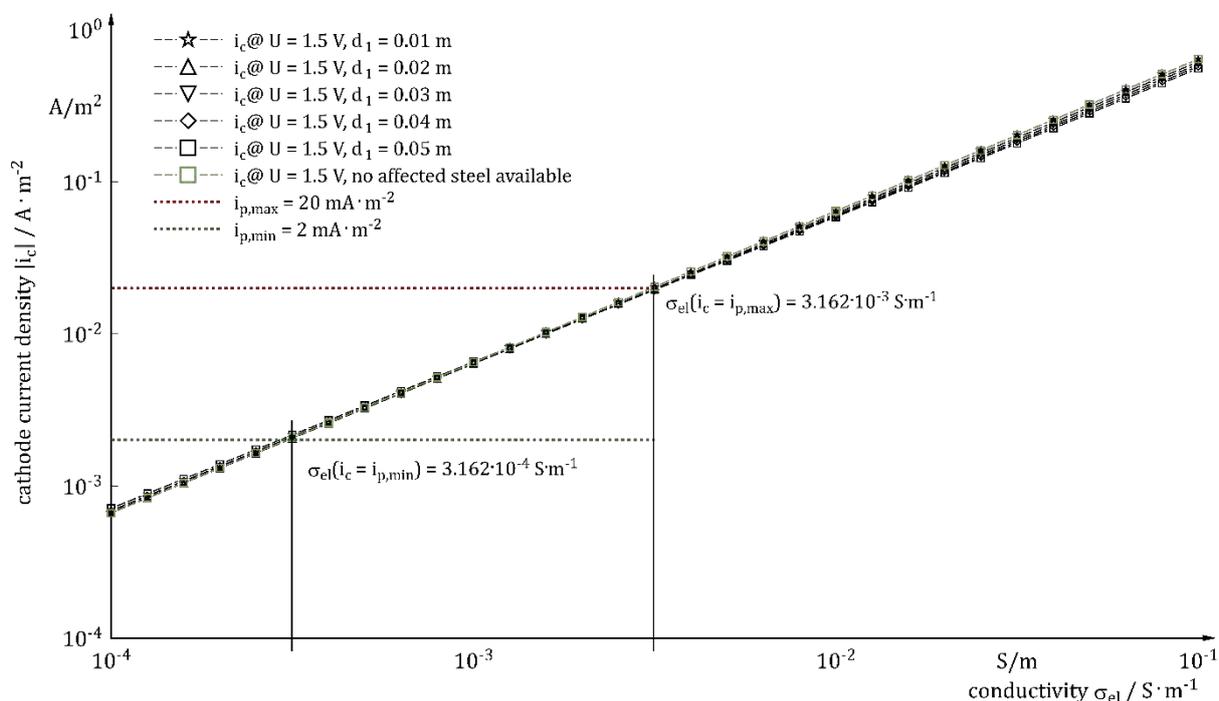


Abbildung 5: Größe der Kathodenstromdichte $|i_c|$ als Funktion der Elektrolytleitfähigkeit σ_{el}

Die resultierenden anodischen Streustromdichten an der kathodenseitigen Oberfläche der betroffenen Metallstruktur sind in Abb. 6 dargestellt.

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

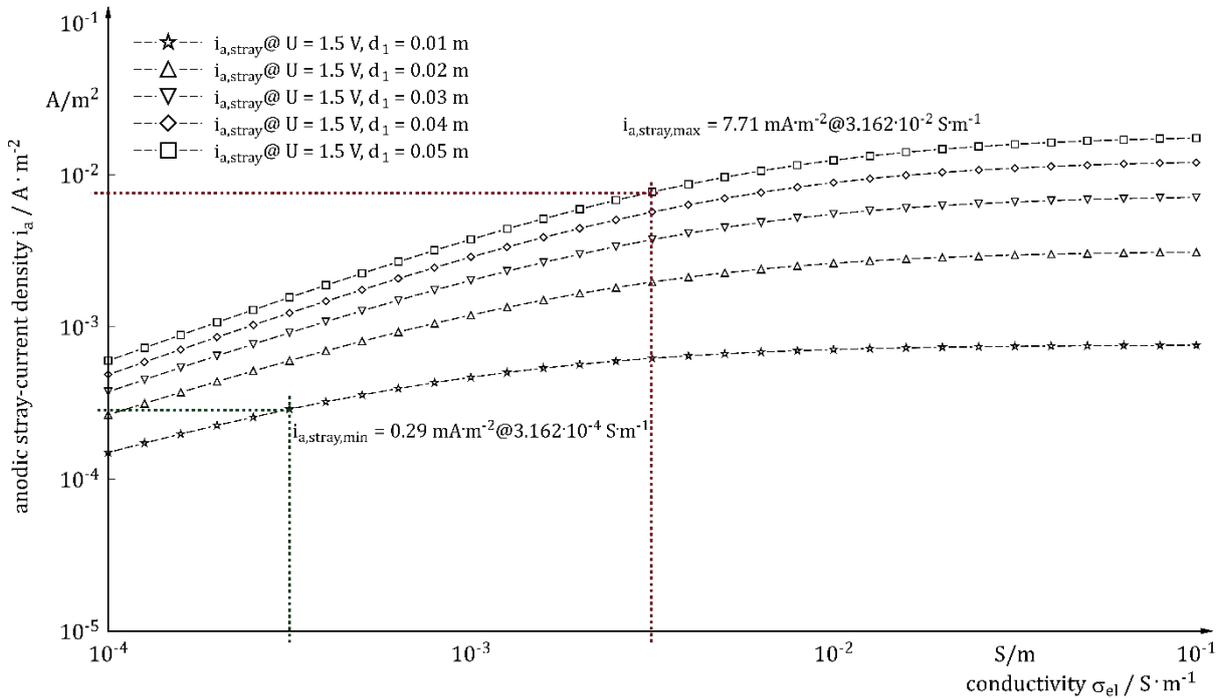


Abbildung 6 Anodische Streustromdichte als Funktion des Parameters d_1 und der Elektrolytleitfähigkeit σ_{el}

Bei der Betrachtung des Streustromdichte-Leitfähigkeits-Diagramms werden im Wesentlichen zwei grundlegende Tatsachen deutlich. Die Dicke d_1 der streustrombehafteten metallischen Struktur ist signifikant für die zu erwartende Streustromdichte und die Leitfähigkeit σ_{el} ist offensichtlich ein maßgebender Parameter. Während die kathodische Stromdichte i_c eine lineare Funktion der Leitfähigkeit ist, ist dies bei der Streustromdichte nicht der Fall. Je höher also die Leitfähigkeit ist, desto geringer ist die Streustromdichte im Vergleich zur kathodischen Stromdichte, vgl. Abb. 7. Es ist evident, dass der Teil der Gesamtstromdichte, der durch die Kathodenstromdichte ausgedrückt werden kann, eine Funktion der Strukturdicke d_1 ist. Obwohl die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen dargestellten Parametern komplex sind, sind sie intuitiv zugänglich.

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

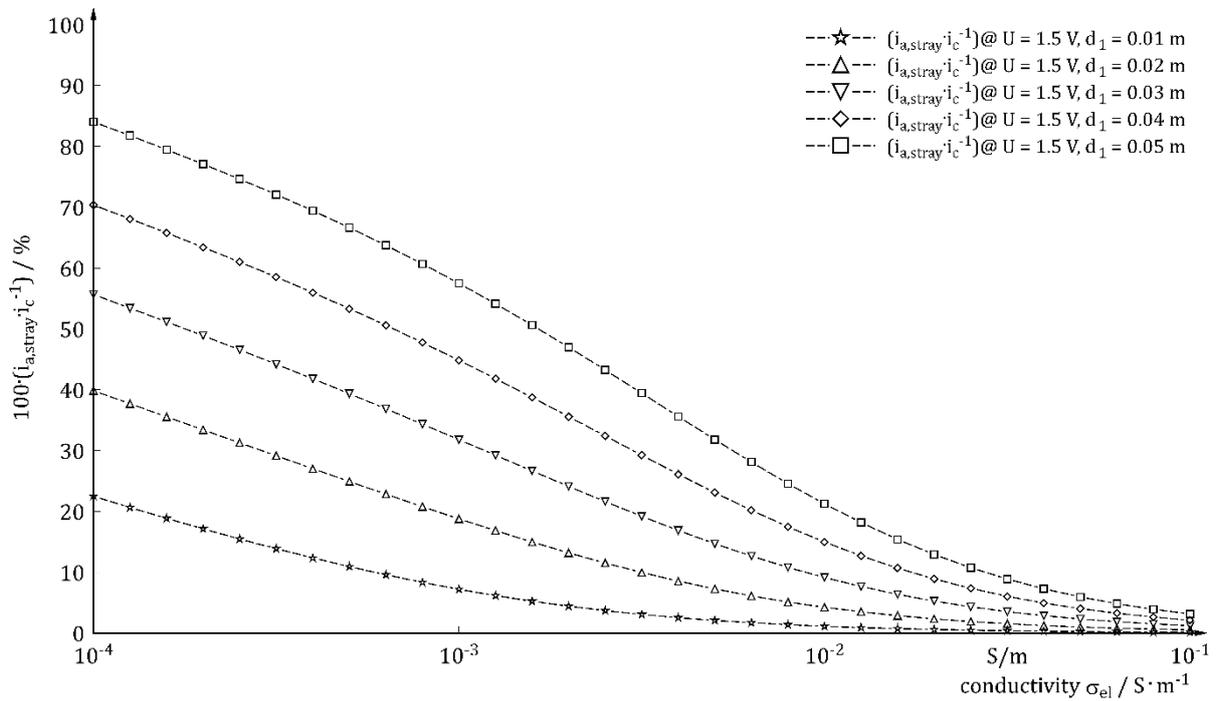


Abbildung 7: Streustromdichte und Kathodenstromdichteverhältnis ($i_{a, \text{stray}} / i_c$) als Funktion der Elektrolytleitfähigkeit σ_{el}

Die treibende Kraft, die dazu führt, dass der Strom in die metallische Struktur eintritt, die weder mit der Anode noch mit der Kathode elektrisch verbunden ist, ist die Potentialdifferenz zwischen der anodischen und der kathodischen Seite der Struktur. Es handelt sich also um den Potentialabfall entlang des Elektrolyten von Phasengrenze zu Phasengrenze. Abb. 8 zeigt beispielhaft die Änderung des Elektrodenpotentials bzw. der Polarisation als Funktion der Leitfähigkeit für den anodischen Teil der Struktur.

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

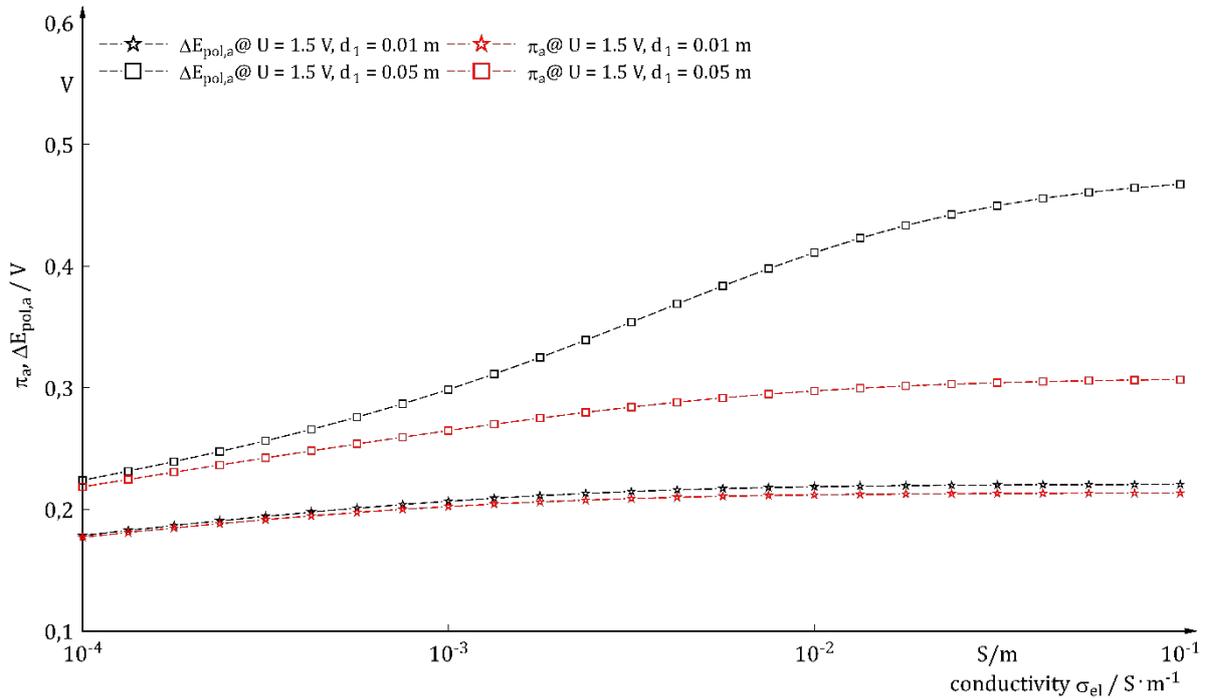


Abbildung 8: Änderung des elektrochemischen Potentials $\Delta E_{pol,a}$ bzw. π_a in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit σ_{el}

Es ist zu betonen, dass die Differenz zwischen $\Delta E_{pol,a}$ und π_a auf den Schichtwiderstand $R_{f,a}$ zurückzuführen ist. Daher kann die Änderung des Stahl-/Betonpotentials $\Delta E_{pol,a}$ wie folgt in zwei verschiedene Teile aufgeteilt werden:

$$\Delta E_{pol,a} = \pi_a + \pi_{\Omega} \tag{6}$$

wobei π_{Ω} die Widerstandspolarisation bezeichnet. Um die Bedeutung der Streustromkorrosion für eine bestimmte Struktur zu bewerten, ist es wichtig zu verstehen, dass π_{Ω} nicht zum Elektrodenprozess beiträgt. Um den Einfluss von $R_{f,a}$ auf das Verhalten des Systems zu beurteilen, wurde eine zweite Studie durchgeführt, die darauf abzielte, die Wechselwirkung von $R_{f,a}$ und $\Delta E_{pol,a}$ für das betreffende System zu untersuchen.

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

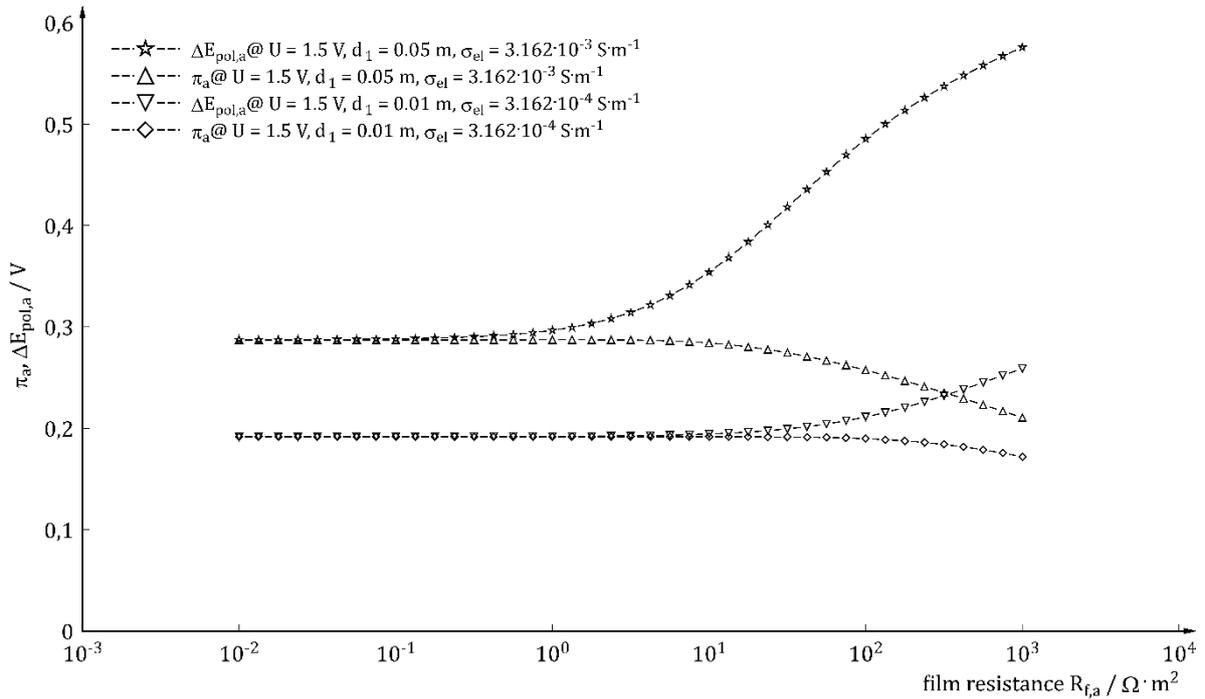


Abbildung 9: Summenpolarisation $\Delta E_{pol,a}$ und Aktivierungspolarisation π_a in Abhängigkeit vom Schichtwiderstand $R_{f,a}$

Abb. 9 zeigt $\Delta E_{pol,a}$ und π_a als Funktion des Schichtwiderstands $R_{f,a}$. Es ist ersichtlich, dass die Widerstandspolarisation π_Ω umso dominanter wird, je höher $R_{f,a}$ ist, während die tatsächliche Polarisation π_a abnimmt.

Die anodischen Streustromdichten in Abhängigkeit vom Schichtwiderstand sind in Abb. 10 dargestellt. Wie erwartet, folgen die Streustromdichten dem abnehmenden Trend der Polarisation π_a , was die Relevanz der Widerstandspolarisation für die Bewertung der Streustromkorrosionsaktivität belegt.

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

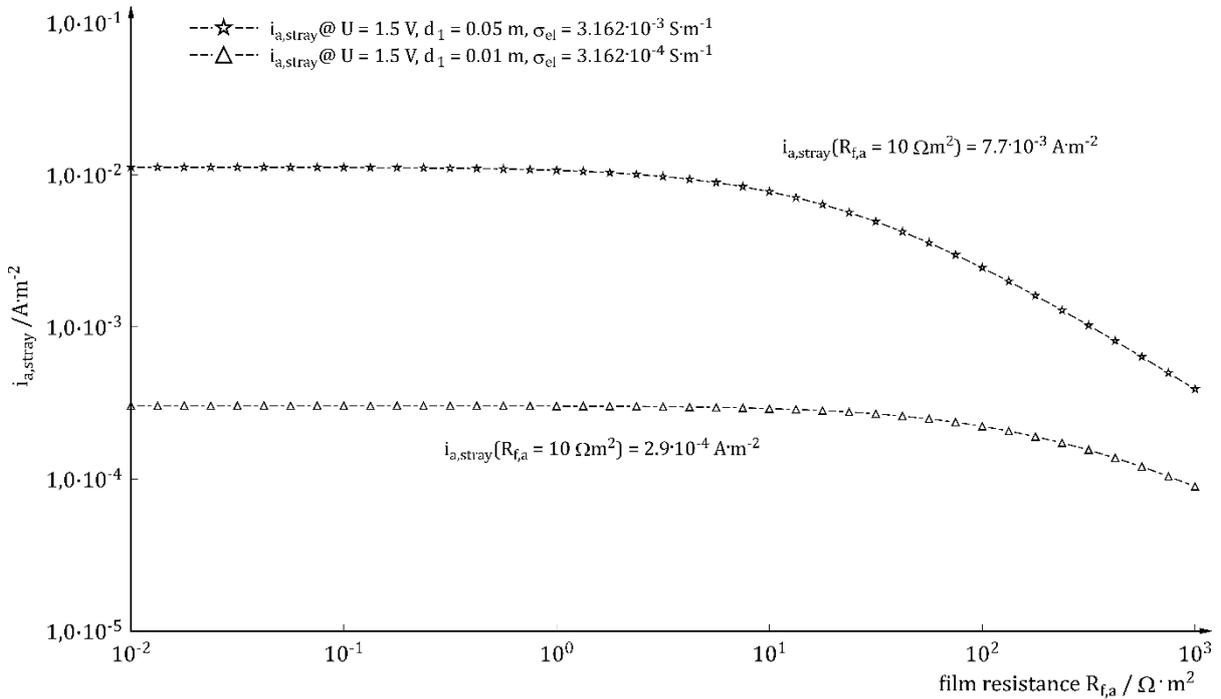


Abbildung 10: Streustromdichte $i_{a, \text{stray}}$ in Abhängigkeit vom Schichtwiderstand $R_{f,a}$

Die in Abb. 3 bis Abb. 10 dargestellten Ergebnisse stellen den ungünstigsten Fall einer sehr hohen Elektrolytleitfähigkeit und kathodischen Stromdichte von $i_c = 20 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ dar. Solche Bedingungen führen zu einer anodischen Streustromdichte $i_{a, \text{stray}} = 7,7 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$. Die vorgestellten Berechnungen und ihre Relevanz für die Praxis werden im folgenden Kapitel diskutiert.

DISKUSSION

Die Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode, die die treibende Kraft für jeden Strom ist, der von der Anode zur Kathode fließt, wurde in jedem Teil der vorliegenden Parameterstudie auf 1,5 V festgelegt. Potentialabfälle über der elektrolytischen Doppelschicht wurden nicht berücksichtigt. Daher entsprechen die vorgelegten Daten nicht ganz den praktischen Bedingungen. Unter gleichen Bedingungen ist ein geringerer Potentialabfall entlang des Elektrolyten zu erwarten, da ein erheblicher Teil des gesamten Potentialabfalls direkt an der Phasengrenze entlang der Doppelschicht auftritt. In diesem Zusammenhang können die weiteren Ergebnisse, insbesondere die Polarisation der streustrombeeinflussten Struktur

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

und die daraus resultierenden Streuströme, als konservativ angesehen werden. Dennoch konnte das komplexe Zusammenspiel der untersuchten Parameter herausgearbeitet werden. Die Ergebnisse sind in sich konsistent und das FEM-Modell weist vergleichsweise geringe Fehler auf. Aufgrund der Elektroneutralitätsbedingung, welche für alle elektrochemischen Systeme erfüllt werden muss, können keine Verlustströme auftreten, wenn Streuströme in die betrachtete Struktur ein- bzw. austreten. Die Summe der in die Struktur ein- und austretenden Ströme muss bei korrekter Anwendung der Vorzeichenkonvention gemäß (7) gleich Null sein.

$$\int i_{a, stray} \cdot dA + \int i_{c, stray} \cdot dA \equiv 0 \tag{7}$$

Für die 2d-Ebene kann Gleichung (7) als Linienintegral ohne Berücksichtigung der dritten Dimension angewendet werden. Die mathematische Auswertung von $I_{a, stray} + I_{c, stray}$ ist in Abb. 11 dargestellt.

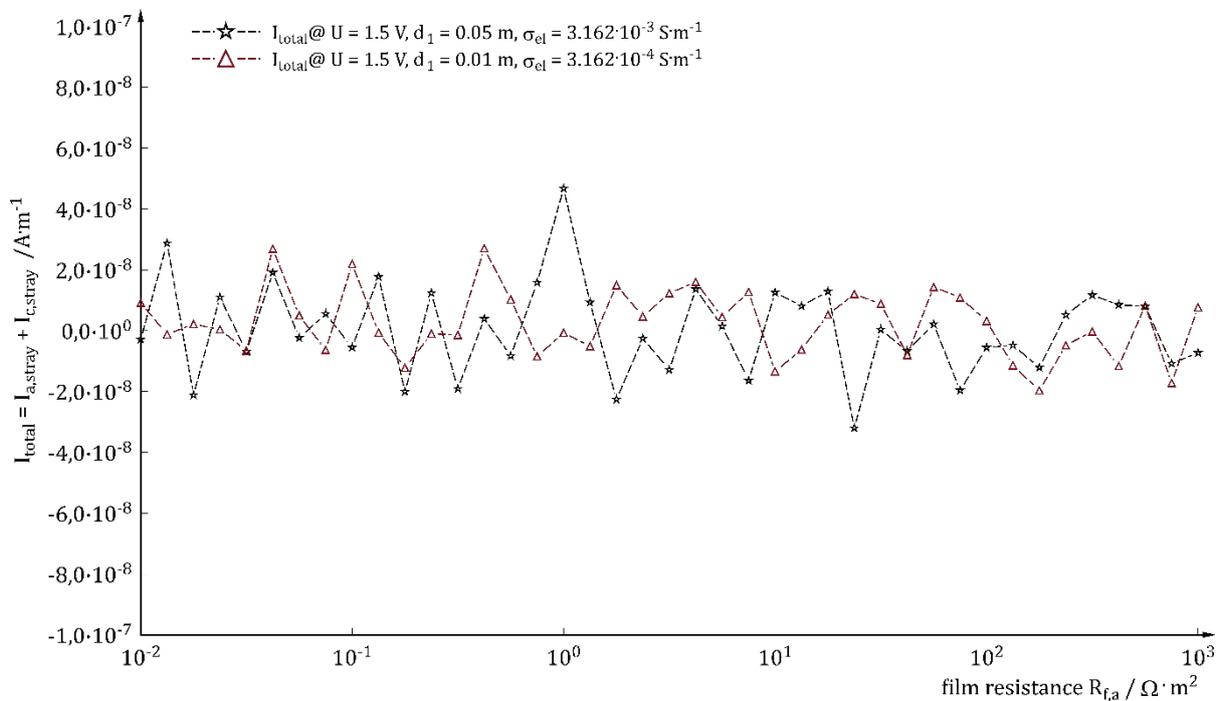


Abbildung 11: Nettostrom von $I_{a, stray} + I_{c, stray}$ in Abhängigkeit vom Schichtwiderstand $R_{f,a}$

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

Der Verluststrom, der als absoluter Fehler der Streustromberechnung angesehen werden kann, liegt in der Größenordnung von $\pm 2 \cdot 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. Die gesamten anodischen und kathodischen Streuströme sind in Abb. 12 beispielhaft dargestellt. Sie liegen in einem Bereich von $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \leq |I_{\text{stray}}| \leq 6 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. Der relative Fehler liegt also zwischen 0,1 % und 0,4 %, was auf zuverlässige Ergebnisse schließen lässt.

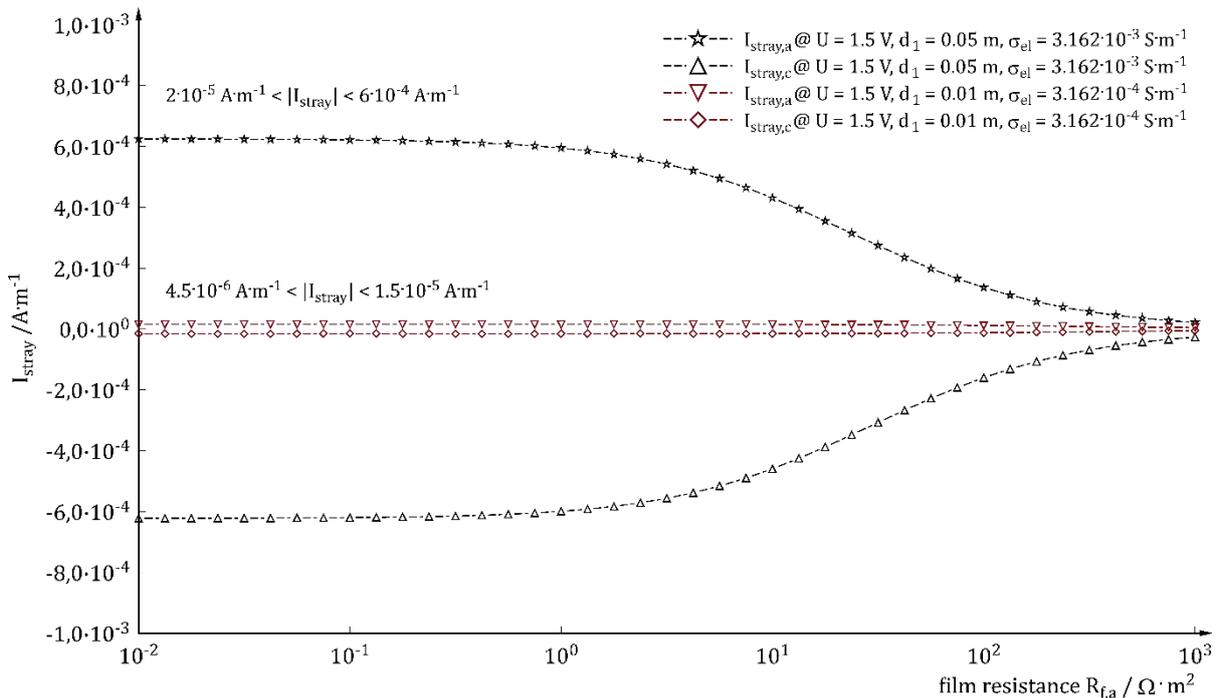


Abbildung 12: Gesamte anodische und kathodische Streuströme $I_{a,\text{stray}}$, $I_{c,\text{stray}}$ in Abhängigkeit vom Schichtwiderstand $R_{f,a}$

Die Bedeutung des Parameters d_1 ist plausibel und intuitiv zugänglich, da er im Wesentlichen die treibende Kraft für den durch die Struktur fließenden Streustrom definiert. Daher steht dieses Ergebnis in sehr guter Übereinstimmung mit der Arbeit von Solgaard et. al. [17], die herausfanden, dass kurze Stahlfasern in einem gegebenen elektrischen Feld weniger anfällig für Streustromkorrosion sind als deutlich längere Betonstähle.

Bei der Betrachtung der Elektrolytleitfähigkeit ist die Interpretation der vorgestellten Ergebnisse etwas komplizierter. Obwohl eine höhere Elektrolytleitfähigkeit zu einer höheren Streustromdichte führt, bedeutet das wesentliche Ergebnis, dass der Prozentsatz des

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

Streustroms im Verhältnis zum Gesamtstrom, der von der Anode zur Kathode fließt, mit einem niedrigeren Elektrolytwiderstand zunimmt. Auch dies erschließt sich intuitiv, wenn man die Theorie der Streuströme betrachtet und annimmt, dass Ströme immer „den Weg des geringsten Widerstandes“ nehmen. Die Wechselwirkung zwischen den beiden Parametern σ_{el} und d_1 ist für die Auswirkungen von Streuströmen in metallischen Strukturen wesentlich. Beeinflussung durch Streuströme bedeutet nicht zwangsläufig, dass ein Korrosionsschaden an der Struktur auftritt. Das Verständnis der komplexen Wechselwirkung ist wesentlich, wenn Strukturen hinsichtlich ihrer Gefährdung durch Streuströme bewertet werden sollen, zumindest wenn es sich um Stahlbeton handelt.

Die verschiedenen Komponenten der Gesamtpolarisation und die Bedeutung der Widerstandspolarisation als Teil der Potentialänderung $\Delta E_{pol,a} = \pi_a + \pi_\Omega$ müssen deutlich betont werden. Die Erkenntnis, dass die Widerstandspolarisation nicht zum Elektrodenprozess beiträgt, da keine elektrochemische Reaktion damit verbunden ist, ist für das Verständnis des Mechanismus der Streustromkorrosion unerlässlich. Sie ist sogar noch wichtiger, um Fragen zu spezifischen Streustromkorrosionsproblemen beurteilen zu können. In der Tat ist die Gesamtpolarisation des Systems die Summe mehrerer verschiedener Polarisationsarten. Davon sind zur Klärung von Fragen zu Streustromkorrosion die wichtigsten die Aktivierungspolarisation π_{ct} , die hier gleich π_a ist, und die Widerstandspolarisation π_Ω . Ein weiterer, essenzieller Teil der Gesamtpolarisation ist die Konzentrationspolarisation π_{diff} , die z. B. bei der Sauerstoffdiffusionskontrolle auftritt. Für das hier betrachtete System ist π_{diff} nicht relevant, da die berechneten Streustromdichten deutlich geringer sind als die Diffusionsgrenzstromdichte der Sauerstoffreduktion.

Fasst man die Ergebnisse der in dieser Arbeit vorgestellten FEM-Berechnungen zusammen, so ist die Streustromdichte des betrachteten Systems offensichtlich eine Funktion jedes untersuchten Parameters und hat die folgende Form:

$$i_{stray} = f(d_1, \sigma_{el}, R_{f,a}, i_c) \quad (8)$$

Die Parametermatrix ist sicherlich unvollständig, da nur passive Bedingungen berücksichtigt wurden. Die Phasengrenzkinetik sowie weitere geometrische Aspekte können für die Streustromkorrosion ebenso wichtig sein wie die in der vorliegenden Studie behandelten Parameter. Ansäuerung und Alkalitätspuffer der Betonporenlösung werden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Sie müssen Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

Schließlich kann die Bedeutung von Streuströmen für die Entstehung und Ausbreitung von Lochkorrosion in Gegenwart von Chlorid oder anderen Halogeniden anhand der in Abb. 9 dargestellten Polarisationsdaten leicht abgeleitet werden. Es ist offensichtlich, dass passive Systeme um mehrere hundert Millivolt in anodischer Richtung polarisiert werden können. Somit können die streustrombeeinflussten Strukturen über ihr spezifisches Lochkorrosionspotential hinaus polarisiert werden, selbst wenn in der Nähe der betroffenen Stahloberflächen geringe Chloridkonzentrationen vorherrschen. Ähnliche Überlegungen gelten für Systeme mit aktiver Lochkorrosion. Es liegt auf der Hand, dass aufgrund des geringen Polarisationswiderstands der aktiven Stellen im Vergleich zu den angrenzenden kathodischen Oberflächen der größte Teil des in die Struktur eintretenden Streustroms durch die aktiven Bereiche austritt. Daher wird die Korrosionsrate an solchen Stellen aufgrund des sehr hohen Verhältnisses zwischen kathodischer und anodischer Oberfläche erheblich gesteigert.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die vorliegende Studie hat gezeigt, wie komplex das Problem der Streustromkorrosion in Stahlbetonbauwerken ist. Bei passiven Systemen ohne Chloride oder andere Halogenide scheint die Gefahr durch Streuströme vernachlässigbar zu sein, da die Stromdichten vergleichsweise gering sind. Dennoch ist die Beurteilung, ob eine durch Streuströme beeinflusste Struktur auch durch Streustromkorrosion geschädigt werden kann, ein komplexer Prozess, der alle verfügbaren Informationen über das betroffene System berücksichtigen muss. Sowohl die Geometrie als auch die chemische Zusammensetzung und die allgemeine Korrosivität sind wichtige Parameter. Künftige Studien könnten die übrigen Parameter und insbesondere Fragen zur Ansäuerung und zu den Auswirkungen der Ansäuerung auf den Übergang von Streustrombeeinflussung zu Streustromkorrosion untersuchen.

LITERATUR

- [1] John P. Broomfield, *Corrosion of Steel in Concrete - Understanding, investigation and repair*, 2nd Edition ed. London and New York: Taylor & Francis, 2007.
- [2] Thomas J. Barlo and Alan D. Zdunek, "Stray Current Corrosion in Electrified Rail Systems - Final Report," (in English), Research Paper 1995.
- [3] K. Darowicki and K. Zakowski, "A new time–frequency detection method of stray current field interference on metal structures," *Corrosion Science*, vol. 46, no. 5, pp. 1061-1070, 2004/05/01/ 2004.
- [4] S. A. Memon and P. Fromme, "Stray Current Corrosion and Mitigation: A synopsis of the technical methods used in dc transit systems," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 22-31, 2014.
- [5] Chuang Wen, Jingbo Li, Shuli Wang, and Yan Yang, "Experimental study on stray current corrosion of coated pipeline steel," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 27, pp. 1555-1561, 2015/11/01/ 2015.
- [6] Shucai Yang and Xu Yang, "Evaluation of stray current corrosion resistance of concrete in metro construction," *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, vol. 2, no. 3, pp. 246-252, 2008/09/01 2008.
- [7] K. Zakowski and W. Sokólski, "24-hour characteristic of interaction on pipelines of stray currents leaking from tram tractions," *Corrosion Science*, vol. 41, no. 11, pp. 2099-2111, 1999/11/01/ 1999.
- [8] K. Zakowski and W. Sokólski, "Numeric method of IR elimination from measurement results of potential of underground pipelines in the zone of interaction of stray currents," *Corrosion Science*, vol. 41, no. 11, pp. 2213-2222, 1999/11/01/ 1999.
- [9] Qingjun Zhu, "Stray current corrosion in buried pipeline," *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol. 58, no. 5, pp. 234-237, 2011.
- [10] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 50162 Schutz gegen Korrosion durch Streuströme aus Gleichstromanlagen; Deutsche Fassung EN 50162:2004*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2005.
- [11] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 12696 Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton (ISO 12696:2017); Deutsche Fassung EN ISO 12696:2017*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2017.
- [12] Luca Bertolini, Maddalena Carsana, and Pietro Pedeferri, "Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current," *Corrosion Science*, vol. 49, no. 3, pp. 1056-1068, 2007/03/01/ 2007.
- [13] A. Avillera, M. Cid, and M. C. Petit, "Anodic reaction of iron in transpassive range," *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, vol. 105, no. 1, pp. 149-160, 1979/12/10/ 1979.
- [14] F. Beck, R. Kaus, and M. Oberst, "Transpassive dissolution of iron to ferrate(VI) in concentrated alkali hydroxide solutions," *Electrochimica Acta*, vol. 30, no. 2, pp. 173-183, 1985/02/01/ 1985.
- [15] S. J. Duranceau, W. J. Johnson, and R. J. Pfeiffer-Wilder, "A STUDY EXAMINING THE EFFECT OF STRAY CURRENT ON THE INTEGRITY OF CONTINUOUS

Streustromkorrosion beim kathodischen Korrosionsschutz im Stahlbetonbau

- FEM-Studie zu den kritischen Parametern -

- AND DISCONTINUOUS REINFORCING BARS," *Experimental Techniques*, vol. 35, no. 5, pp. 53-58, 2011.
- [16] Y.-Y. Wu, P. Lambert, P. Mangat, and F.J. O'Flaherty, "Analysis of Stray Current Induced by Cathodic Protection on SteelFramed Masonry Structures," *Open Corrosion Journal*, vol. 4, pp. 34-39, 2011.
- [17] A. O. S. Solgaard, M. Carsana, M. R. Geiker, A. Küter, and L. Bertolini, "Experimental observations of stray current effects on steel fibres embedded in mortar," *Corrosion Science*, vol. 74, no. Supplement C, pp. 1-12, 2013/09/01/ 2013.
- [18] Zhipei Chen, Dessi Koleva, and Klaas van Breugel, "A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure," in *Corrosion Reviews* vol. 35, ed, 2017, p. 397.
- [19] DR. KLAUS J. VETTER, *Elektrochemische Kinetik*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1961.
- [20] Thorsten Eichler, "Zu den sekundären Schutzmechanismen beim kathodischen Korrosionsschutz von Stahl in alkalischen Medien," Dr.-Ing. Doctoral Thesis, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, RWTH Aachen, <http://publications.rwth-aachen.de/record/82879>, 2012.
- [21] T. Eichler, B. Isecke, and R. Bassler, "Investigations on the re-passivation of carbon steel in chloride containing concrete in consequence of cathodic polarisation," *Materials and Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion*, vol. 60, no. 2, pp. 119-129, Feb 2009.
- [22] Carl H. Hamann and Wolf Vielstich, *Elektrochemie*. Weinheim; New York; Chichester; Brisbane; Singapore; Toronto: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2003.
- [23] Helmut Kaesche, *Die Korrosion der Metalle - Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme*. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [24] R. V. MOSHTEV, "ELECTRONIC CONDUCTION OF THE OXIDE FILM ON PASSIVE IRON IN NEUTRAL SOLUTIONS," *Electrochimica Acta*, vol. 16, pp. 2039-2048, 1971.
- [25] R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert, and M. Raupach, "RILEM TC 154-EMC: ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES FOR MEASURING METALLIC CORROSION: "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete", " *Materials and Structures / Matériaux et Construction*, vol. 33, pp. 603-611, 2000.