

Schlussbericht vom 30.11.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 20408 N

1 Thema

Leistungsfähigkeit von galvanischen und hybriden Anodensystemen für Stahlbetonbauwerke

2 Berichtszeitraum

01.11.2018 bis 31.07.2022

3 Forschungsvereinigung

Gesellschaft für Korrosionsschutz, GfKORR e.V.

4 Forschungseinrichtungen

Forschungsstelle 1: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Forschungsstelle 2: ibac - Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen

Gefördert durch:

Schlussbericht

für den Zeitraum 01.11.2018 bis 31.07.2022
zum AiF Forschungsvorhaben 20408 N

mit dem Thema:

"Leistungsfähigkeit von galvanischen und hybriden Anodensystemen für Stahlbetonbauwerke"

Forschungsstellen: 1) Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin

2) ibac - Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen
Schinkelstr. 3
52062 Aachen

Fachbereich: 1) 7.6 „Korrosion und Korrosionsschutz“

Arbeitsgruppe: 2) Stahl und Korrosion

Projektleiter: 1) Gino Ebell M. Eng.

2) Univ. -Prof. Dr.-Ing. M. Raupach

Bearbeiter: Shivasarati Sankaran M. Sc.1)
Gino Ebell M. Eng. 1)
Carla Driessen M. Sc. 2)
Dr.-Ing. Christian Helm 2)

Zusammenfassung

Die in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Anodensysteme sind für die Anwendung als diskrete Anoden im Rahmen einer Installation unter klassischen Aspekten des KKS-B nicht zu verwenden.

Alle untersuchten Systeme unterliegen mit der Zeit einer zunehmenden anodischen Hemmung infolge der Bildung von Korrosionsprodukten. Diese erhöhen den Diffusionswiderstand im Phasengrenzbereich und haben dort einen signifikanten Einfluss auf die thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen, infolge derer die Eigenkorrosion über die Zeit ebenfalls abnimmt.

Die Installation der Systeme A1, A2 sowie C bei höheren Bauteilfeuchten kann zur Vermeidung des sogenannten Anodenringeffektes verwendet werden.

Eine Modellbildung für eine effektive Nutzungsdauer kann unter Hinzuziehung der ermittelten elektrochemischen Parameter nicht zielführend erfolgen. Nutzungsdauern von 1 bis 2 Jahren können grundlegend mit den Anodensystemen A1, A2 und C erreicht werden, hierzu müssen aber ausreichend hohe Bauteilfeuchten gewährleistet werden.

Die theoretischen Lebensdauern aus der numerischen Simulation der galvanischen Elemente berücksichtigen eine Änderung der anodischen Teilstromdichte über die Zeit nicht und gehen von ungehemmten, aktiv korrodierenden Anoden aus. Eine Reduktion der Korrosionsaktivität wird äquivalent durch den Anstieg des Polarisationswiderstandes gespiegelt und zeigt, dass die Systeme in ihrer Lebensdauer auf Basis einer zunehmenden, deckschichtbasierten, anodischen Hemmung limitiert sind. Die Bauteilfeuchten haben grundlegend einen signifikanten Einfluss auf die Korrosionsaktivität und die daraus resultierende Effektivität der verbauten Anoden. Der höhere Ladungsumsatz führt jedoch auch zwangsläufig zu einer beschleunigten Deckschichtbildung, was im Umkehrschluss zu einem vorzeitigen Versagen der Anodensystem gegenüber dem Einsatz unter geringeren Bauteilfeuchten führen kann.

Auf Basis der Ergebnisse aus den Arbeitspaketen muss festgehalten werden, dass das Ziel des Forschungsvorhabens nur teilweise erreicht wurde. Hybride Anodensysteme, die unter Fremdstrombetrieb agieren, konnten mangels Verfügbarkeit nicht untersucht werden. Einbettmörtel der Hersteller konnten nicht untersucht werden, die pastösen Einbettmittel haben aufgrund der schlechten Performance in Wechselwirkung mit den Anoden keinen Anlass gegeben, diese weitergehenden Untersuchungen zu unterziehen.

Das Ziel des Vorhabens wurde teilweise erreicht.

Zusammenfassung.....	3
1 Einleitung.....	6
2 Stand des Wissens	6
2.1 Der Kathodische Korrosionsschutz von Stahlbeton	6
2.2 Klassifizierung von Anodensystemen	8
2.3 Anwendung galvanischer und hybrider Anodensysteme.....	8
2.4 Verwendete Anodensysteme	10
3 Arbeitspakete 1 bis 7.....	12
3.1 Arbeitspaket 1a (BAM)	12
3.1.1 Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes	12
3.1.2 Probekörperdesign, Herstellung und Lagerung.....	13
3.1.3 Ergebnisse aus AP1a.....	15
3.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP1a	15
3.2 Arbeitspaket 1b (ibac)	16
3.2.1 Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes	16
3.2.2 Prüfkörperdesign, Herstellung und Lagerung	16
3.2.3 Ergebnisse aus AP1b.....	19
3.3 Arbeitspaket 2a (BAM)	31
3.3.1 Aufgaben und Ziel des Arbeitspaketes	31
3.3.2 Prüfkörperdesign, Herstellung und Lagerung	31
3.3.3 Ergebnisse und Zusammenfassung des AP2a.....	34
3.4 Arbeitspaket 2b (ibac)	40
3.4.1 Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes	40
3.4.2 Versuchsdurchführung	40
3.4.3 Ergebnisse und Zusammenfassung des AP2b	41
3.5 Arbeitspaket 3 (ibac)	45
3.5.1 Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes	45
3.5.2 Durchführung der numerischen Untersuchungen	45
3.5.2.1 Polarisationsseigenschaften	45
3.5.2.2 Elektrolytwiderstände	46
3.5.2.3 Geometrie.....	49
3.5.3 Ergebnisse der numerischen Simulation	50
3.6 Arbeitspaket 4a (BAM)	58
3.6.1 Aufgaben und Ziel des Arbeitspaketes	58
3.6.2 Probekörperdesign, Herstellung und Lagerung.....	58
3.6.3 Ergebnisse und Zusammenfassung des AP4a.....	58

3.7	Arbeitspaket 4b (ibac)	62
3.8	Arbeitspaket 5a (BAM)	62
3.8.1	Aufgaben und Ziel des Arbeitspaketes	62
3.8.2	Probekörperdesign, Herstellung und Lagerung.....	63
3.8.3	Ergebnisse und Zusammenfassung des AP5a.....	65
3.9	Arbeitspaket 5b (ibac)	69
3.10	Arbeitspaket 5c (ibac).....	69
3.10.1	Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes	69
3.10.2	Umsetzung eines Demonstrators	69
3.10.3	Ergebnisse.....	74
3.11	Arbeitspaket 6 (ibac)	76
3.11.1	Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes	76
3.12	Arbeitspaket 7 (BAM, ibac).....	77
3.12.1	Aufgaben und Ziele des Arbeitspaketes	77
3.12.2	Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich eines Modellbildungsansatzes.....	77
4	Ergebnistransfer	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen in die Wirtschaft.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.2	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5	Literaturverzeichnis.....	83

1 Einleitung

Schäden an Stahlbetonbauwerken, die durch Korrosion von Bewehrungsstahl verursacht wurden, erfordern zusätzliche Korrosionsschutzmaßnahmen und dadurch weltweit steigenden finanziellen Aufwand. Die häufigsten Ursachen für die Korrosion des Bewehrungsstahles sind die Karbonatisierung der Betonüberdeckung und die daraus resultierende Depassivierung des Betonstahls, sowie das Eindringen von Chloriden bis zur Bewehrung durch Beaufschlagung des Betonbauteils mit Tausalzen oder Meerwasser. Neben Meerwasserbauwerken sind Straßen- und Autobahnbrücken, Parkhäuser und Garagen, die winterlichen Streusalzeinflüssen ausgesetzt sind besonders gefährdet. Sieht man von dem grundsätzlich bestehenden Risiko einer fehlerhaften Bauausführung ab, kann die Dauerhaftigkeit insbesondere in gerissenen Bereichen beeinträchtigt sein, da hier entlang der Rissflanken eine beschleunigte Karbonatisierung erfolgt und der Riss den Eintrag von Wasser und Schadstoffen bis an die Stahloberfläche erleichtert. Diese Gefahr besteht insbesondere in exponierten Lagen, z. B. in Küstennähe oder bei Tausalz beaufschlagten Bauteilen, in denen Chlorideinwirkung vorliegt.

Für die Instandsetzung solcher Bauwerksschäden gibt es vielfältige Möglichkeiten, im Fokus dieser Arbeit steht die Methode des kathodischen Korrosionsschutzes.

2 Stand des Wissens

2.1 Der Kathodische Korrosionsschutz von Stahlbeton

Der Stahl ist im alkalischen Milieu des Betons zunächst durch eine fest anhaftende, submikroskopisch dünne Oxidschicht, der so genannten Passivschicht, vor Korrosion geschützt. Erst nach einer lokalen Zerstörung der Passivschicht (Depassivierung) kann es zu Korrosion von Stahl in Beton kommen. Die Depassivierung kann durch Karbonatisierung (Reduktion der Alkalität im Beton) oder das Eindringen von Chloriden erfolgen. Zwischen den depassivierten und passiven Bereichen an einer Stahloberfläche besteht eine Potentialdifferenz. Diese Potentialdifferenz wird auch als Treibspannung bezeichnet. Da beide Bereiche sowohl elektrisch über die verbundene Bewehrung sowie elektrolytisch über den umgebenden Beton verbunden sind, kommt es zur Ausbildung eines galvanischen Elementes. Der Korrosionsprozess lässt sich in zwei Teilreaktionen aufteilen, die anodische und die kathodische Teilreaktion (Abb. 1). Dabei erfolgt die anodische Teilreaktion im depassivierten Bereich nach Gleichung 1.

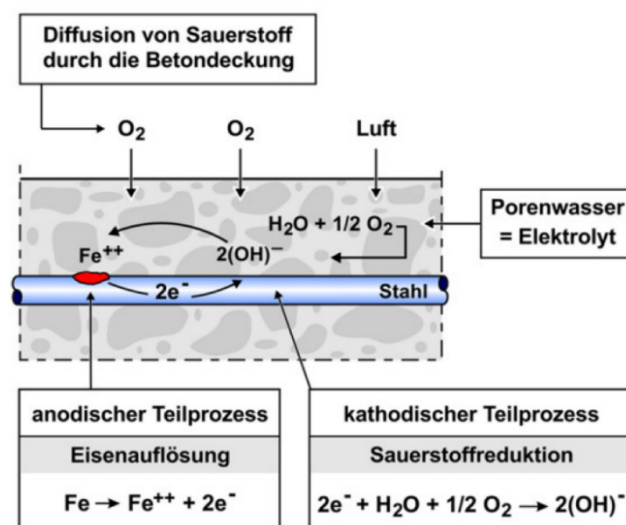


Abb. 1: Korrosionsmodell von Stahl im Beton

Bei der kathodischen Teilreaktion werden die freien Elektronen aus der anodischen Teilreaktion unter Reduktion von Sauerstoff verbraucht. Die kathodische Teilreaktion kann räumlich nahe der Anode liegen oder, wie bei Makroelementkorrosion, auch bis zu einigen Metern entfernt sein. Abhängig von dem an der Kathode vorherrschenden pH-Wert kann die Teilreaktion, wie in Gleichung (2) bzw. (3) beschrieben, stattfinden. Bei den in Beton üblichen hohen pH-Werten wird in der Regel Luftsauerstoff nach Gl. (2) reduziert.



Die Oxidation der in Lösung gegangenen Eisenionen erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst reagieren die Eisenionen mit den Hydroxidionen zu Eisen(II)-hydroxid (Gl. (4)) nachfolgend kann das Eisen(II)-hydroxid, je nach Sauerstoffangebot, weiter zu Eisen(III)-oxid-hydroxid oxidieren (Gl. (5)).



Die Korrosionsprodukte nehmen, je nach Sauerstoffanteil, ein um bis zu sechsfach größeres Volumen als das Eisen /N1/ ein und es kommt zu erheblichen Sprengdrücken im Beton, die in der Folge Risse, Delamination und Abplatzungen der Betondeckung bewirken.

Ziel jeder Instandsetzungsmaßnahme korrosionsgeschädigter Stahlbetonbauteile ist es, die zuvor beschriebene Bildung von galvanischen Elementen zu hemmen oder zu verhindern, um den Korrosionsstrom und damit den Verlust an Querschnittsfläche auf ein tolerierbares Maß zu reduzieren. Beim KKS von Stahlbeton geschieht dies durch einen kathodischen Schutzstrom, der über zusätzlich angebrachte Elektroden (KKS-Anodensystem) in das Bauteil eingebracht wird. Dadurch kommt es zu verschiedenen elektrochemischen Effekten, die die anodische Eisenauflösung hemmen. Man spricht in diesem Zusammenhang von Schutzeffekten und unterscheidet die primären und sekundären Schutzeffekte. Bei den primären Schutzeffekten wird das elektrochemische Potential des Stahls zu negativen Werten hin verschoben (polarisiert), sodass der Prozess der anodischen Eisenauflösung gehemmt oder sogar vollständig unterbunden wird. Dieser Effekt ist das vorrangige Ziel des kathodischen Korrosionsschutzes. Zweitens werden durch die kathodische Polarisation der Bewehrung die passiven Bereiche (mit positiveren Potentialen) in kathodische Richtung (negativ) polarisiert, wodurch die Potentialdifferenz zu den aktiven Oberflächen verringert und die treibende Kraft aus dem Korrosionsprozess genommen wird, was ebenfalls zu einer erheblichen Reduktion der Korrosionsgeschwindigkeit führt.

Langfristig führt die kathodische Polarisation der Bewehrung zu veränderten Umgebungsbedingungen nahe der Stahloberfläche, die zu einer Reduktion der Korrosionsaktivität oder sogar einer Repassivierung der Bewehrung führen können. Dabei spricht man von sekundären Effekten. Alle negativ geladenen Ionen, also auch Chloridionen, wandern im elektrischen Feld in Richtung Anode und damit weg von der Bewehrung. Dieser zeitabhängige Prozess kann langfristig zu einer signifikanten Reduktion des Chloridgehaltes nahe der Bewehrungsoberfläche führen. Entsprechend den elektrochemischen Reaktionen werden an der kathodisch polarisierten Bewehrung Hydroxylionen gebildet. Diese Hydroxylionen führen zu einem Anstieg des pH-Wertes. Dieser wird durch die Migration von Alkalien (Na⁺, K⁺, Ca²⁺) in Richtung der Bewehrung langfristig unterstützt.

Beim kathodischen Korrosionsschutz handelt es sich um das Prinzip 10 nach TR Instandhaltung /N3/, mit dem die anodische Eisenauflösung auf ein technisch tolerierbares Maß reduziert oder sogar

vollständig unterbunden werden soll. In Deutschland wird seine Anwendung in DIN EN ISO 12696 /N2/ geregelt.

2.2 Klassifizierung von Anodensystemen

Man unterscheidet beim KKS Anodensysteme mit galvanischen Anoden und solche mit Fremdstromanoden. Galvanische Anoden bestehen aus unedlen Metallen wie Zink und Zinklegierungen. Wird die Anode mit der Bewehrung kurzgeschlossen, entsteht ein galvanisches Element, bei dem sich das unedlere Metall, also das Zink auflöst und die Bewehrung als Kathode geschützt ist. Bei Fremdstromsystemen werden dagegen inerte, dimensionsstabile Materialien verwendet. Der zur kathodischen Polarisation benötigte Schutzstrom wird über einen Gleichrichter aufgebracht. Neben diesen verfahrenstechnischen Unterschieden werden Anodensysteme hinsichtlich ihrer Anordnung klassifiziert. Bei Stahlbauteilen werden meist punktuell angeordnete Anoden eingesetzt, beim Stahlbetonbau dahingegen auch oft flächige Anodensysteme, um eine gleichmäßige Schutzstromverteilung trotz hohen Elektrolytwiderstandes des Betons zu erreichen /R1/.

2.3 Anwendung galvanischer und hybrider Anodensysteme

Eine der ersten Anwendungen von galvanischen Anoden im Stahlbetonbau waren Spritzverzinkungen der Betonoberfläche, welche über einen Bewehrungsanschluss einen Schutzstrom bereitgestellt haben. Es kam aber bei dieser Art von Anoden oft zu Problemen, da die elektrolytische Ankopplung auf Grund einer Austrocknung unter dieser Verzinkung nicht dauerhaft gegeben war. Daher hat sich seit den 1970er Jahren der kathodische Korrosionsschutz vorwiegend in der Fremdstromvariante bei korrodierendem Stahl in Beton als Instandsetzungsmaßnahme durchgesetzt. Diese Methode weist aber einige Nachteile auf: Es wird immer eine Stromquelle benötigt und damit einhergehend Anschlüsse an die Stromquelle und eine aufwendige Kabelführung. So ist der Installationsaufwand für viele Anwendungen relativ hoch und unwirtschaftlich. In solchen Fällen wird oft ein Betonausbruch nach dem Instandsetzungsprinzip R-Cl durchgeführt. Der Beton wird dabei unabhängig von den Korrosionserscheinungen an der Bewehrung überall dort abgetragen, wo der korrosionsauslösende Chloridgehalt im Bereich der Bewehrung überschritten ist, was einen starken Eingriff in das Tragwerk bedeutet und eine Belastung der Umwelt zur Folge hat, z.B. durch Schallemissionen und Material, welches als Abfall entsorgt werden muss. Erst seit Mitte der Neunziger Jahre werden, bisher fast ausschließlich im Ausland, diskrete galvanische Anoden zum Schutz der Bewehrung in Reparaturstellen eingesetzt. Kommt es auf Grund des größeren Volumens der Korrosionsprodukte zu Sprengdrücken im Beton, die zusätzlich zu den Schäden am Stahl auch zu einer Schädigung des Betons führen, wird der Beton normalerweise nur in diesen Bereichen mit einem Reparaturmörtel ersetzt. Dadurch liegen dann korrosionsaktive Bereiche mit vergleichsweise hohen Chloridgehalten (aber ohne sichtbare Schäden) und Reparaturbereiche mit niedrigen Chloridgehalten direkt nebeneinander, was zu hohen Treibspannungen zwischen den Bewehrungsstählen der zwei Bereiche und damit zu einer Verstärkung des Korrosionsprozesses in Bereichen mit nicht erneuertem Beton führt. Diese Entwicklung wird als „Anodenring-Effekt“ bezeichnet. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, werden galvanische Anoden aus Zink im Umkreis der Reparaturstelle eingesetzt und mit dem Stahl elektrisch verbunden. Entsteht dadurch ein ausreichend hoher galvanischer Schutzstrom, kann der Stahl in der Umgebung der Reparaturstelle durch die kathodische Polarisation geschützt werden. Zinkanoden bilden im alkalischen Milieu des Betons allerdings ebenso wie der Bewehrungsstahl eine Passivschicht aus, die das Fließen eines galvanischen Schutzstroms verhindert. Um diesem Problem zu begegnen, werden chemische Wirkstoffe verwendet, die in der Lage sind, das Zink in einem aktiven Zustand zu halten. Am geeignetsten haben sich dabei Lithiumhydroxid und Lithiumbromid herausgestellt /B1/. Diese Aktivator befinden sich in einem speziellen, porösen Mörtel, der die Zinkanoden umgibt. Die Abb. 2: Prinzipskizze der diskreten galvanischen Anode zeigt eine Prinzipskizze der diskreten galvanischen Anode.

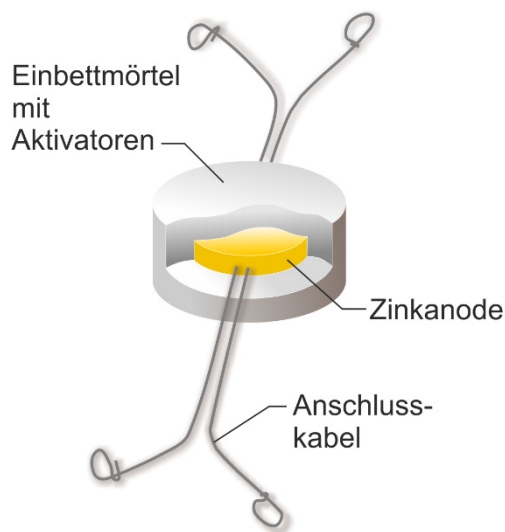


Abb. 2: Prinzipskizze der diskreten galvanischen Anode

Neben diesen diskreten Anodensystemen gibt es seit Kurzem auch sogenannte hybride Anodensysteme. Unter einem hybriden Anodensystem versteht man ein galvanisches Anodensystem, das über kurze Zeit, beispielsweise etwa eine Woche, mit einem hohen Strom durch eine Batterie oder temporäre Stromquelle im Fremdstrombetrieb unterhalten wird. Anschließend wird die Anode mit dem Stahl direkt und nicht mehr über einen Gleichrichter verbunden und liefert ab dann einen galvanischen Schutzstrom $/G1/$. Dieses Verfahren eignet sich für solche Bereiche, in denen bereits aktive Korrosion an der Bewehrung vorliegt und man die entsprechenden elektrochemischen Reaktionen unmittelbar unterbinden will. Der Vorteil beider Verfahren liegt in dem geringen Unterhaltungsaufwand und den damit einhergehenden günstigen Unterhaltungskosten. Könnten Unsicherheiten dieser Verfahren durch systematische Untersuchungen beseitigt werden, würde daraus für viele Instandsetzungsarbeiten in Deutschland ein Vorteil entstehen. Auf Grund der Kostenersparnis im Vergleich zur Fremdstromvariante würde häufiger der kathodische Korrosionsschutz eingesetzt, wo heute noch der Betonausbruch gewählt wird, welcher höhere Umweltbelastungen und einen größeren Eingriff in die Tragstruktur zur Folge hat.

2.4 Verwendete Anodensysteme

Für die Untersuchungen wurden 7 kommerziell erhältliche Anodensysteme verwendet. Alle verwendeten Anodenmaterialien basieren auf einer Zinklegierung, deren Zusammensetzung nicht weiter untersucht wurde, da eine Veröffentlichung der Zusammensetzung des Einbettmörtels und der Zusammensetzung der Zinklegierung seitens der Hersteller nicht gewünscht ist.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die verwendeten Anodensysteme mit den für diese Untersuchungen relevanten Parametern aufgeführt. Die angegebenen Anodenoberflächen wurden durch Herausarbeiten und anschließend vermessen der Zinkeinlage ermittelt.

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Anodensysteme mit Anodenoberfläche und Angaben zur Einbauvariante

Anodensystem	Anodenoberfläche in cm ²	Einbettmörtel	Farbe Einbettmörtel	Bohrlochapplikation mit Ankoppelmittel
A1	35,2	X	Grau	
A2	35,1	X	Grau	
B1	132,0	X	Gelb	
B2	28,4			X
B3	26,2			X
C	272,9	X	Weiss	
D	131,4	X	Grün	
CT	10		Weiß	

Nachfolgend werden die verschiedenen Anoden sind mit den jeweiligen von Einbettmörtel befreiten Anoden dargestellt.

Die Anodensysteme A1 und A2 sind mit Ausnahme der Geometrie identisch, Einbettmörtel und Anodenmaterial unterscheiden sich gemäß Hersteller nicht. Das System A1 beinhaltet eine zylindrische Anode, während das System A2 eine stabförmige Anode mit einem hexagonalen Querschnitt dargestellt. Die Anodensysteme A1 und A2 sind in Abb. 3 dargestellt.

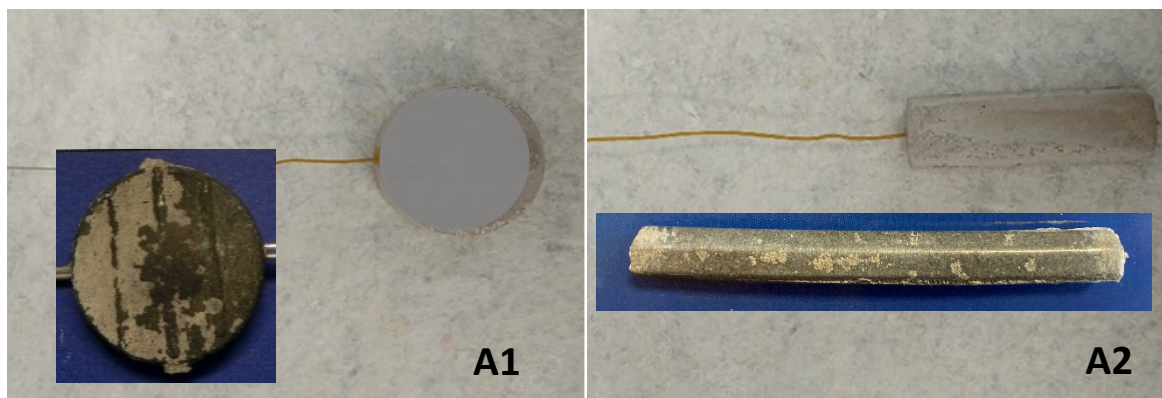


Abb. 3: Anodensysteme A1 und A2

In Abb. 4 sind die Anodensystem B1, B2 und B3 dargestellt. Das Anodensystem B1 wird mittels Ankoppelmörtel im Probekörper eingebettet. Die Anodensysteme B2 und B3 werden in einem

befeuchteten Bohrloch, das in einem erhärteten Ankoppelmörtel eingebracht wurde, unter Verwendung einer dafür vom Hersteller bereitgestellten Ankoppelpaste appliziert. Im Nachgang wird der Bereich oberhalb der Anode und der Ankoppelpaste mit einem Mörtel verschlossen. Das Anodensystem B1 beinhaltet ein Blech, das durch Stanzen eingebrachte Vertiefungen bzw. Erhebungen beinhaltet. Die Anodensysteme B2 und B3 bestehen aus zylindrischen Zinkstäben, die mit Abstandshaltern zur zentrischen Lagesicherung im Bohrloch versehen sind.

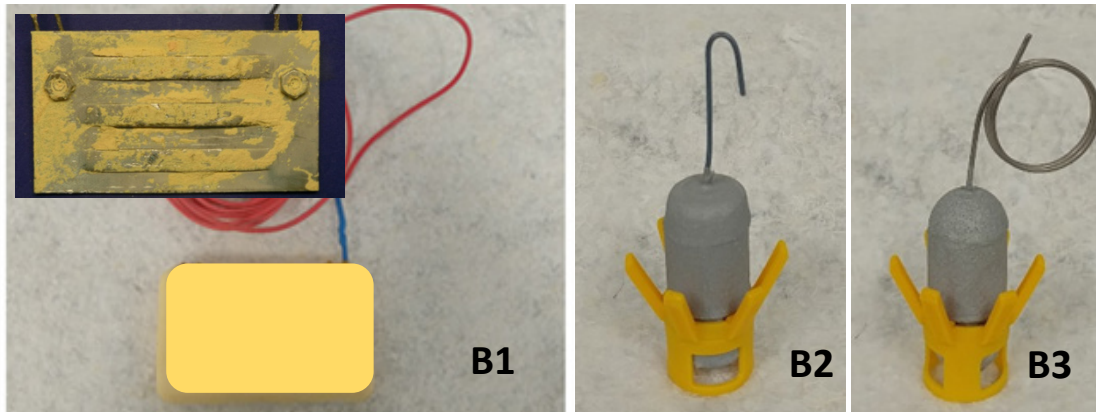


Abb. 4: Anodensysteme B1 mit Zinkblech und eingebrachten Stanzvertiefungen, B2 und B3 als zylindrischer Zinkstab

Die Anodensysteme C und D werden wie auch die Anodensystem A1 und A2 und B1 in die Probekörper mittels Ankoppelmörtel vom TYP ES 104 eingebettet. Das Anodensystem C besteht aus einer Art Zinkstreckmetallgitter, das in einem mehrfach gefalteten Zustand eingebettet ist. Das Anodenmaterial des Anodensystems D ist bezogen auf die Geometrie identisch zu dem des Anodensystems B1.

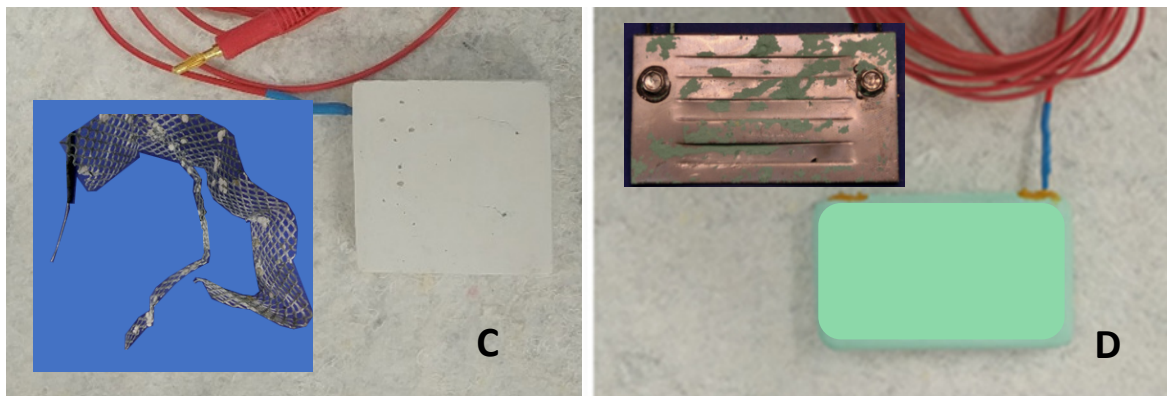


Abb. 5: Anodensystem C1 mit Zinkstreckmetallgitter und D1 mit Zinkblech und eingebrachten Stanzvertiefungen

Für die CT- Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Hersteller des Anodensystems C1 eigens für diese Untersuchung benötigte Anoden entwickelt und hergestellt. Die zylindrischen Anoden wurden an der BAM aus 99 % Reinzink hergestellt. Im Anschluss daran wurden diese an den Hersteller übergeben und dort in den Einbettmörtel eingebunden. Die elektronenleitende Verbindung aus dem Einbettmörtel heraus wurde mit einem 2 mm Edelstahlschweißdraht aus 1.4571 realisiert. Hierzu wurde ein Sackloch an der Oberseite der Zinkanode gebohrt und ein M2 Maschinengewinde geschnitten, auf einer Länge von 5 mm wurde ein M2-Gewinde auf den Schweißdraht geschnitten. Die Überprüfung der Leitfähigkeit ergab einen Übergangswiderstand kleiner $0,2 \Omega$. Der Hersteller hat den Übergang Schweißdraht-Anode mit Epoxidharz und Schrumpfschlauch abgedeckt, um eine elektrolytische Verbindung im Ankoppelmörtel zu unterbinden. Dies dient der Vermeidung einer Elementbildung und daraus resultierender elementbasierter Korrosionsraten am Anodenmaterial. In Abb. 6 sind die Anoden ohne Schrumpfschlauch links dargestellt, mit Schrumpfschlauch in der Mitte und die fertigen Anoden im Einbettmörtel rechts.



Abb. 6: Links, Zinkanoden mit elektronenleitender Verbindung aus 1.4571, Mitte für die Einbettung in Einbettmörtel vorbereitete Zinkanoden und rechts Zinkanoden für die CT-Untersuchungen in Einbettmörtel des Herstellers C

3 Arbeitspakete 1 bis 7

3.1 Arbeitspaket 1a (BAM)

3.1.1 Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes

Im ersten Arbeitspaket wurden an der BAM Referenzprobekörper hergestellt, an denen der spezifische Elektrolytwiderstand des Ankoppelmörtels und des Betons über die Zeit bei 65 % rel. Luftfeuchte mittels Impedanzmessung ermittelt wird. Die Klimalagerungsparameter wurden, gemäß Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss, Protokoll vom 03.07.2019, auf die zuvor genannten Werte festgelegt. Als Ankoppelmörtel wird gemäß Absprache mit dem PA nur das Produkt SikaTop ES 104 verwendet. Durch das Angleichen der Probekörpergeometrie von IBAC und BAM für die Arbeitspakete 1b und 2a konnten die relevanten spezifischen Elektrolytwiderstände für den Beton der Probekörper als auch für den Ankoppelmörtel ermittelt werden. Die Betonrezeptur wird in Kapitel 1b vorgestellt. Gemäß der Definitionen im Protokoll der 2. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses vom 03.07.2019 ist der Einbettmörtel, „Material, das im direkten Kontakt zum Zink steht“ und der Ankoppelmörtel, „Material, welches zum Einbau der im Einbettmörtel befindlichen Anoden verwendet wird“.

3.1.2 Probekörperdesign, Herstellung und Lagerung

Die Probengeometrie für die Ermittlung des spezifischen Elektrolytwiderstandes ist schematisch in Abb. 7 dargestellt. Es sind Mörtelprismen verwendet worden, in die vier Elektroden aus mischoxidüberzogenen Titangittern eingebettet wurden. An den äußeren Elektroden wird ein Strom angelegt, während über die beiden Inneren Elektroden ein Spannungsabfall bestimmt wird.

Die Messung des Wechselfeldwiderstands erfolgte mit einem Hand LZR-Meter vom Typ Sourcetronic ST2822E. Für die durchgeführten Messungen beträgt die Messspannung 1 V und die Messfrequenz 1 kHz.

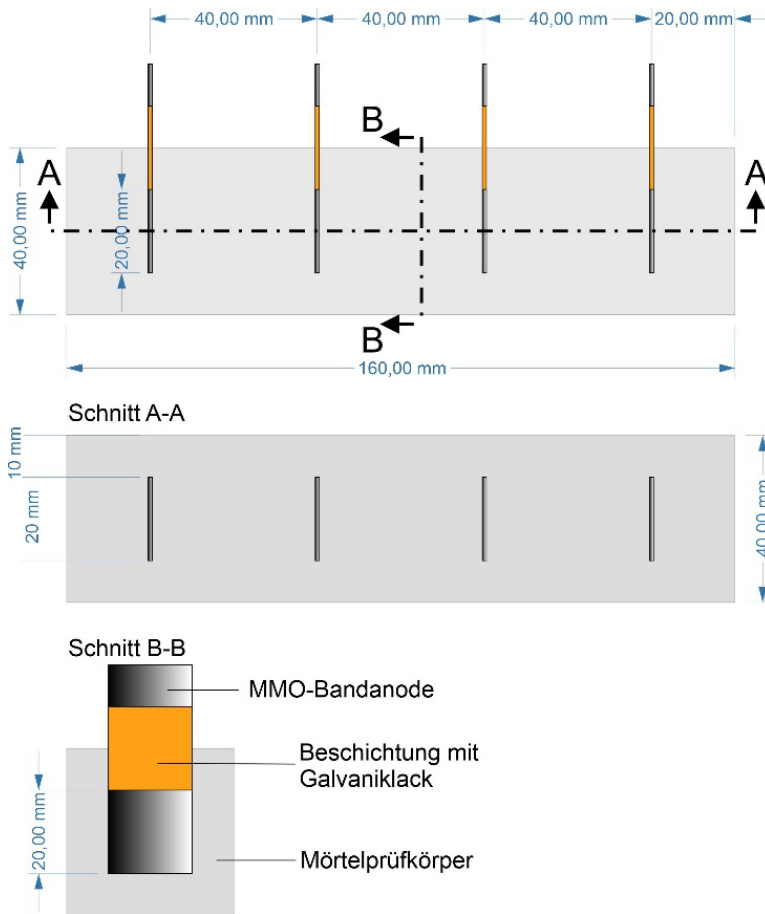


Abb. 7: Schematische Darstellung des Probekörperaufbaus für die Ermittlung des spezifischen Elektrolytwiderstandes

Dabei lässt sich der spezifische Widerstand ρ [Ω cm] aufgrund der Geometrie und dem gemessenen Widerstand R bei einer Frequenz von 1 kHz wie nach Formel 6 berechnen.

$$\rho_{El} = R_{El} * \frac{A}{l} * v \quad (6)$$

mit:

l	=	Abstand zwischen den mittleren Elektroden der VELA	[m]
A	=	Fläche einer Seite einer Elektrode aus der VELA	[m ²]
ρ_{El}	=	spezifische elektrischer Widerstand aus der VELA	[Ω m]
R_{El}	=	Widerstand der Vierelektrodenanordnung	[Ω]
v	=	Geometriekonstante (3,57)	[-]

Für die Herstellung der Probekörper wurde eine Prismenschalung verwendet, der Beton eingebracht und im Anschluss daran ein Edelstahlrahmen mit den daran befestigten Elektroden aufgesetzt und mittels Schrauben fixiert, siehe Abb. 8.



Abb. 8: Prismenschalung mit Elektroden zur Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstands links, rechts, fertige Probekörper in der Schalung

Die Proben wurden 24 h nach der Betonage ausgeschalt, im Anschluss daran wurden die Ausgangsmasse und der Widerstand R bestimmt.

Dieser Vorgang wurde sowohl für den Beton des Probekörpers aus AP 1b bzw. 2a als auch für den hier verwendeten Ankoppelmörtel durchgeführt. Für die Bestimmung der Masse wurden je Betonagetermin 6 Prismen hergestellt und für die Widerstandsermittlung ebenfalls 6. Für die Herstellung der Probekörper für AP2a wurden drei Betonagetermine benötigt, für das Einbetten der Anoden mit dem Ankoppelmörtel ein Termin. In Summe wurden 24 Proben für die Widerstandsermittlung (Abb. 9 links) verwendet, und 24 für die Ermittlung der Masseänderung (Abb. 9 rechts).

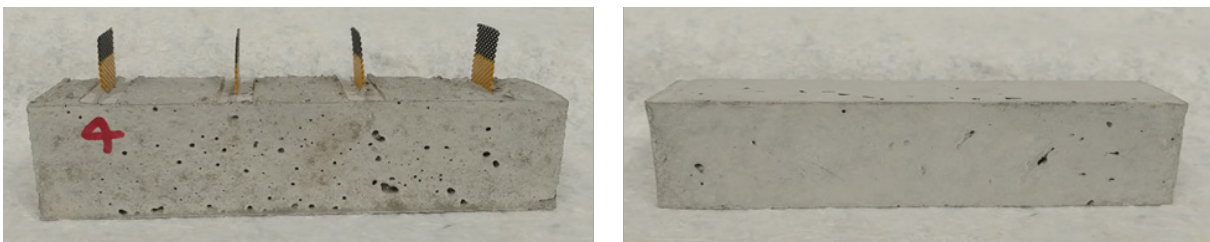


Abb. 9: links, Prismen zur Bestimmung des Elektrolytwiderstands und rechts zur Bestimmung des Masseverlustes

Die Proben sind bei einer für die Praxis relevanten Luftfeuchte von 65 % (± 2 %) und einer Temperatur in Höhe von 20 °C (± 2 °) ausgelagert worden.

3.1.3 Ergebnisse aus AP1a

Die Widerstandsentwicklung und der relative Masseverlust sind in Abb. 10 dargestellt. Der Beton nimmt nach anfänglich schnellem Masseverlust nach etwa 14 Tagen wieder Feuchtigkeit auf. Der Ankoppelmörtel weist eine signifikant höhere Feuchteabgabe und daraus resultierenden Masseverlust auf. Die Widerstandsentwicklung beider Systeme ist jedoch ähnlich. Bei der Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstandes kam es bei den Betonproben zwischen Woche 102 und 107 zu Fehlmessungen, die nicht bewertet werden konnten.

Der Widerstand nimmt über den gesamten Untersuchungszeitraum von 111 Wochen zu, was bei den Proben nicht auf den zunehmenden Masseverlust zurückzuführen ist. Es muss davon ausgegangen werden, dass Wasser über die Dauer durch Nachhydratation im Mörtel gebunden wird, und der Widerstand infolge Änderung des Porengefüges und Reduktion der Porensättigung mit Elektrolytlösung reduziert wird.

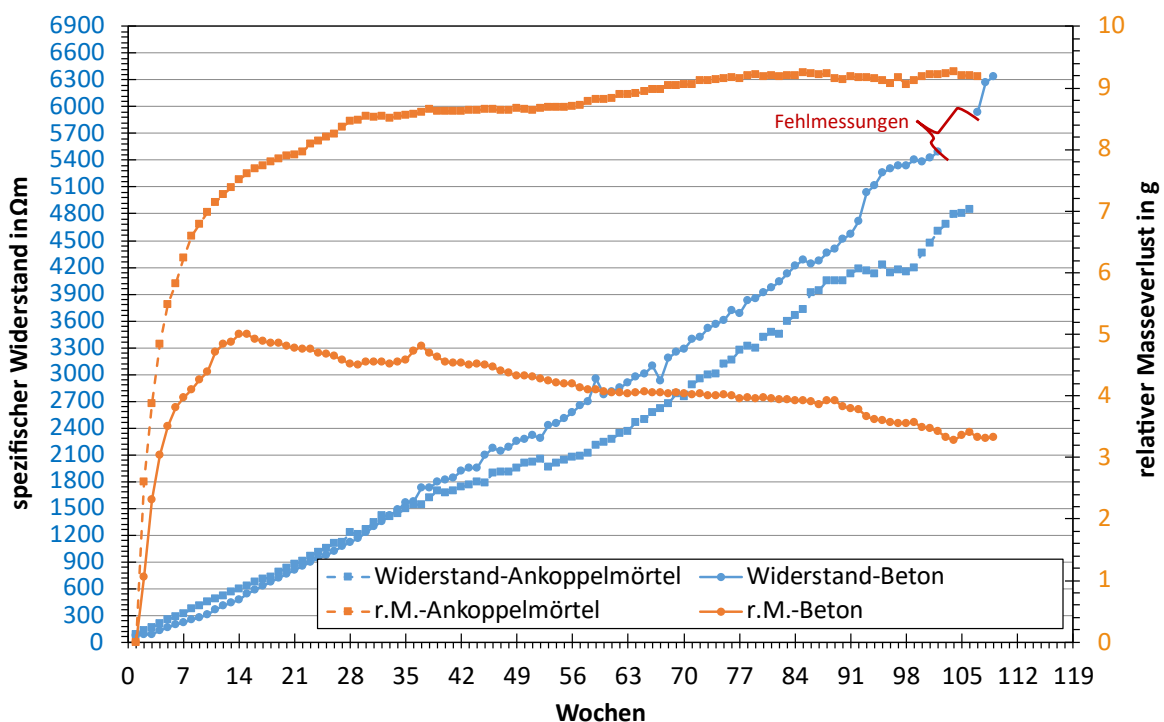


Abb. 10: Spezifischer Widerstand und relativer Masseverlust des verwendeten Betons und des Ankoppelmörtels über die Auslagerungszeit bei 65 % r.F. und 20 °C, bestimmt an Mörtelprismen mit 4-Elektrodenanordnung

3.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP1a

Die Widerstandsentwicklung von Ankoppelmörtel und Beton sind über den betrachteten Zeitraum nahezu identisch. Die Kombination der beiden Werkstoffe in einem Probekörper, der zur Beschreibung der elektrochemischen Parameter der Anodensysteme dienen soll, sollte somit nicht durch verschiedenartige Widerstandsentwicklungen der einzelnen Partner beeinflusst werden.

3.2 Arbeitspaket 1b (ibac)

3.2.1 Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden am ibac die Potentiale der verschiedenen Anodensysteme im Einbettmörtel untersucht, miteinander verglichen und mit den Herstellerangaben abgeglichen. Dabei wurden drei Prüfkörper desselben Anodensystems hergestellt. Zur Anwendung kamen die in Tabelle 1 aufgeführten Anodentypen A1, B1, B2, B3, C und D. Zum Zeitpunkt der Prüfkörperherstellung stand der Typ A2 noch nicht in ausreichender Menge zur Verfügung. Da die Typen A1 und A2 sich nach Angabe des Herstellers nur in der Geometrie der Zinkeinlage und somit der spezifischen Elektrodenoberfläche unterscheiden, wurde auf eine nachträgliche Berücksichtigung des Typs A2 verzichtet. Typ CT wurde speziell für die Untersuchungen in Abschnitt 0 entwickelt und kam hier ebenfalls nicht zur Anwendung.

3.2.2 Prüfkörperdesign, Herstellung und Lagerung

Das Prüfkörperdesign der Hauptversuchsreihen wurde bereits in der Antragsphase zwischen den Forschungsstellen abgestimmt, um eine Übertragbarkeit der jeweiligen Ergebnisse sicherzustellen. Einen Überblick über den geplanten Aufbau gibt Abb. 11.

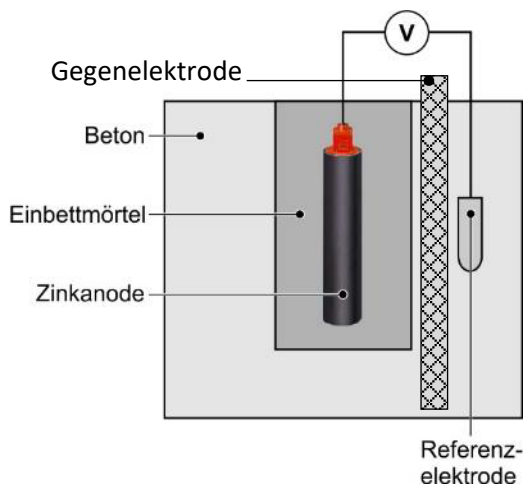


Abb. 11: Prüfkörperaufbau für Arbeitspaket 1 gemäß Antrag

Für den Betonkörper wurde eine Portlandzementmischung unter Verwendung eines CEM I 42,5 R, w/z-Wert 0,48, Bindemittelgehalt 340 kg/m^3 und einer Sieblinie AB gewählt. Um die Aussparung für die spätere Anodeneinbettung zu erzeugen, wurden Füllkörper aus XPS ($12 \times 12 \times 16 \text{ cm}^3$ b x l x t) in einer Würfelschalung mit 20 cm Kantenlänge mittels Jochen befestigt. Zusätzlich wurde in den Randbereich ein MMO-Netz als Gegenelektrode eingelegt, um eine spätere Polarisation der Anodensysteme zu ermöglichen, vergleiche Abb. 12.



Abb. 12: Prüfkörperschalung mit Füllkörper und MMO-Netz

In Abwandlung zu Abb. 11 wurden die MnO_2 -Referenzelektroden vom Typ Force ERE 20 bei den Versuchen des ibac erst bei der Anodeneinbettung in den Ankopplungsmörtel vom Typ SikaTop ES 104 eingebracht.

Die Betongrundprüfkörper wurden nach der Betonage 28 Tage feucht gelagert, bevor die galvanischen Anoden eingebracht wurden. Der Einbau der Systeme erfolgte entsprechend der Herstellerangaben durch Mitarbeiter des ibac. Abweichend wurden lediglich die Haltedrähte, die gleichzeitig den elektrischen Anschluss darstellten, bis zur Anodenoberfläche mit Schrumpfschläuchen überzogen, um die Ergebnisse der späteren Polarisationsversuche nicht zu verfälschen.

Bei den Anodentypen B2 und B3 handelt es sich um Anoden für den Einbau in Bohrlöcher. Hier wurde eine andere Vorgehensweise gewählt. Die Betongrundprüfkörper wurden hier jeweils mit einer Referenzelektrode versehen und die Aussparung vollständig mit SikaTop ES 104 gefüllt. Der Anodeneinbau erfolgte durch Vertreter der Herstellerfirma in den Räumlichkeiten des ibac.

Alle Prüfkörper wurden nach der Füllung mit SikaTop ES 104 erneut nachbehandelt, bevor die Einlagerung in den Klimaten stattfand. Bilder des Herstellprozesses zeigen Abb. 13 bis Abb. 15.



Abb. 13: Fertiggestellter Prüfkörper der Hauptversuchsreihe (links), Prüfkörper der Serie Klima-OS nach Auftrag Grundierharz(rechts)



Abb. 14: Einbau der Serien B2 und B3, Grundprüfkörper vor (links) und nach Bohrung (rechts)



Abb. 15: Einbau der Serien B2 und B3, Einbringung Einbettmaterial (links) und nach Verschluss (rechts)

Seitens des PA wurden Lagerungen bei 65 % und 100 % rF vorgeschlagen. Diese ließen sich aus technischen und logistischen Gründen nicht vollständig umsetzen. Um das trockene Klima umzusetzen, wurde eine Laborlagerung (L) vorgesehen. Die erreichten Klimabedingungen über den Versuchszeitraum zeigt Abb. 16. Die Feuchtlagerung erfolgte in einer Klimakammer (Klima). Die dort erreichten Klimadaten stellt Abb. 17 dar. Die zwischenzeitlichen Schwankungen sind dabei neben technischen Störungen, bzw. Wartungsarbeiten auch auf die zwischenzeitlichen Entnahmen zum Zwecke der Erstellung der Stromdichtepotentialkurven innerhalb der folgenden AP zurückzuführen. Innerhalb einer dritten Serie (Klima-OS) wurden PK mittels eines Grundierharzes beschichtet, um die Austrocknung über die Ober- und Seitenflächen zu minimieren, lediglich die PK Unterseite blieb unbeschichtet, um die Situation innerhalb z.B. eines nach Instandsetzung beschichteten Zwischendecks einer Tiefgarage nachzustellen.

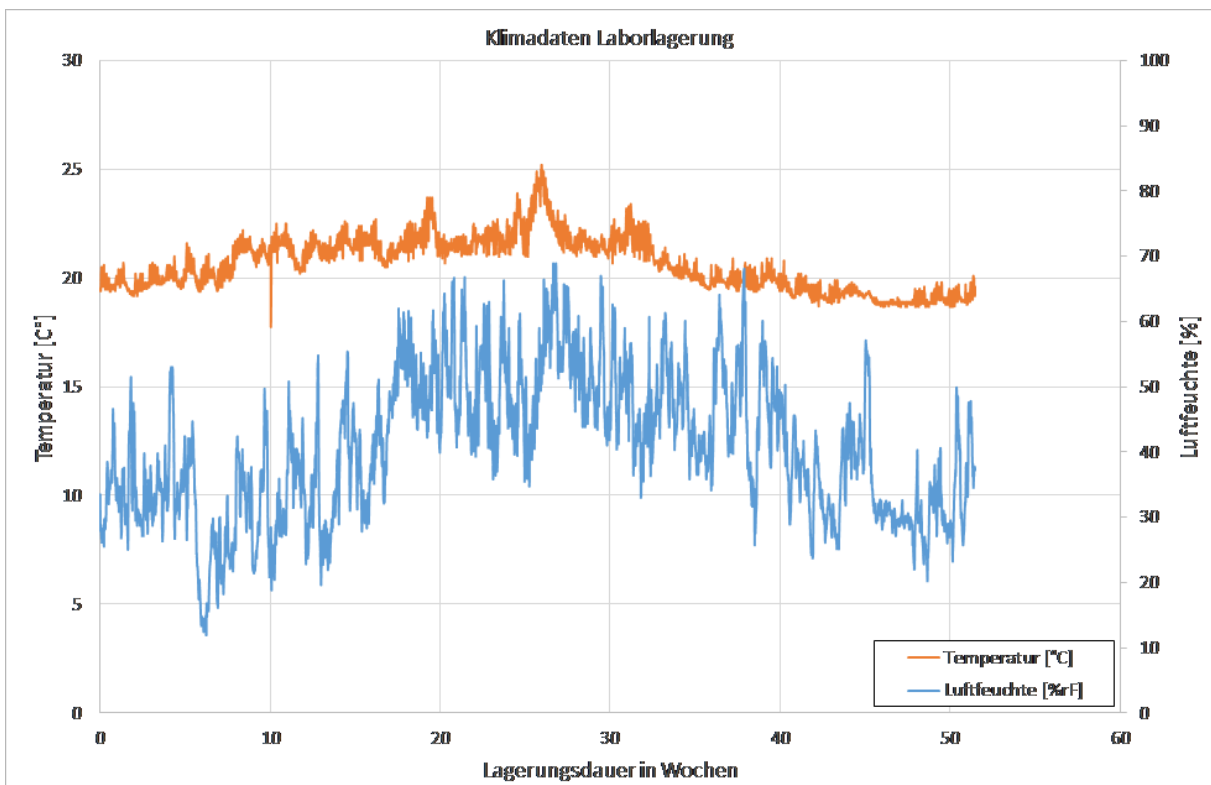


Abb. 16: Klimadaten Laborlagerung

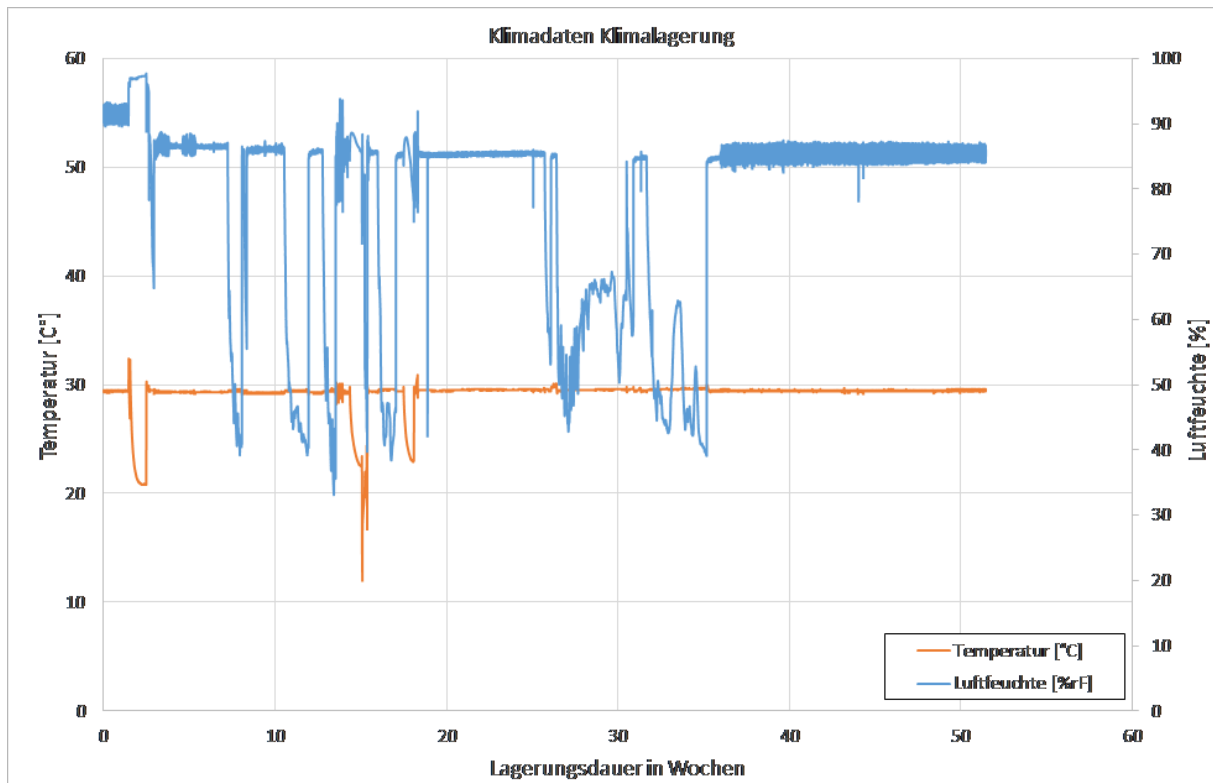


Abb. 17: Daten Klimalagerung

3.2.3 Ergebnisse aus AP1b

Unmittelbar nach Einlagerung der Prüfkörper in den jeweiligen Klimaten wurde mit der Aufzeichnung der Ruhepotentiale der galvanischen Anoden gegen die eingebauten Referenzelektroden begonnen. Im Folgenden werden die Potentialverläufe der einzelnen drei Anoden je System und Lagerung, dargestellt, vgl. Abb. 18-bis Abb. 35 eine Gegenüberstellung der Potentiale zu Versuchsbeginn und der werte nach einem Jahr sind in Tabelle 2.

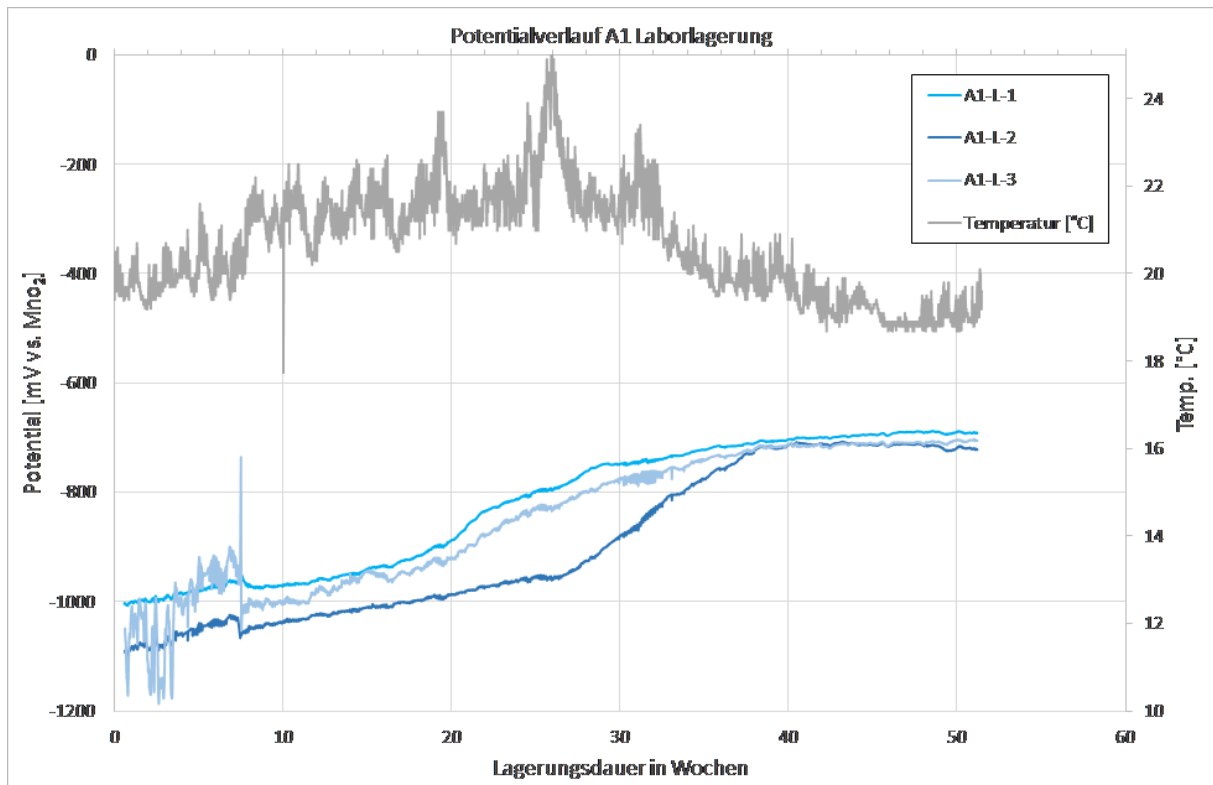


Abb. 18: Potentialverlauf Anodensystem A1, Laborlagerung

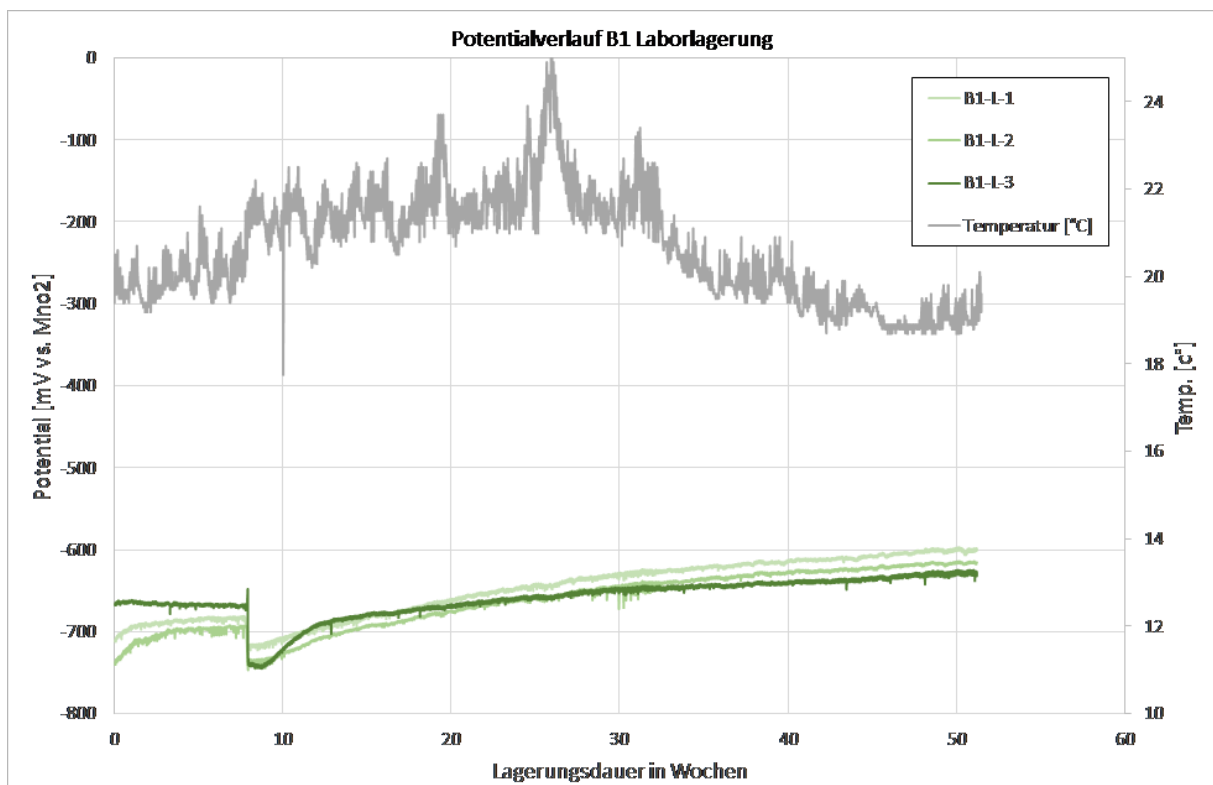


Abb. 19: Potentialverlauf Anodensystem B1, Laborlagerung

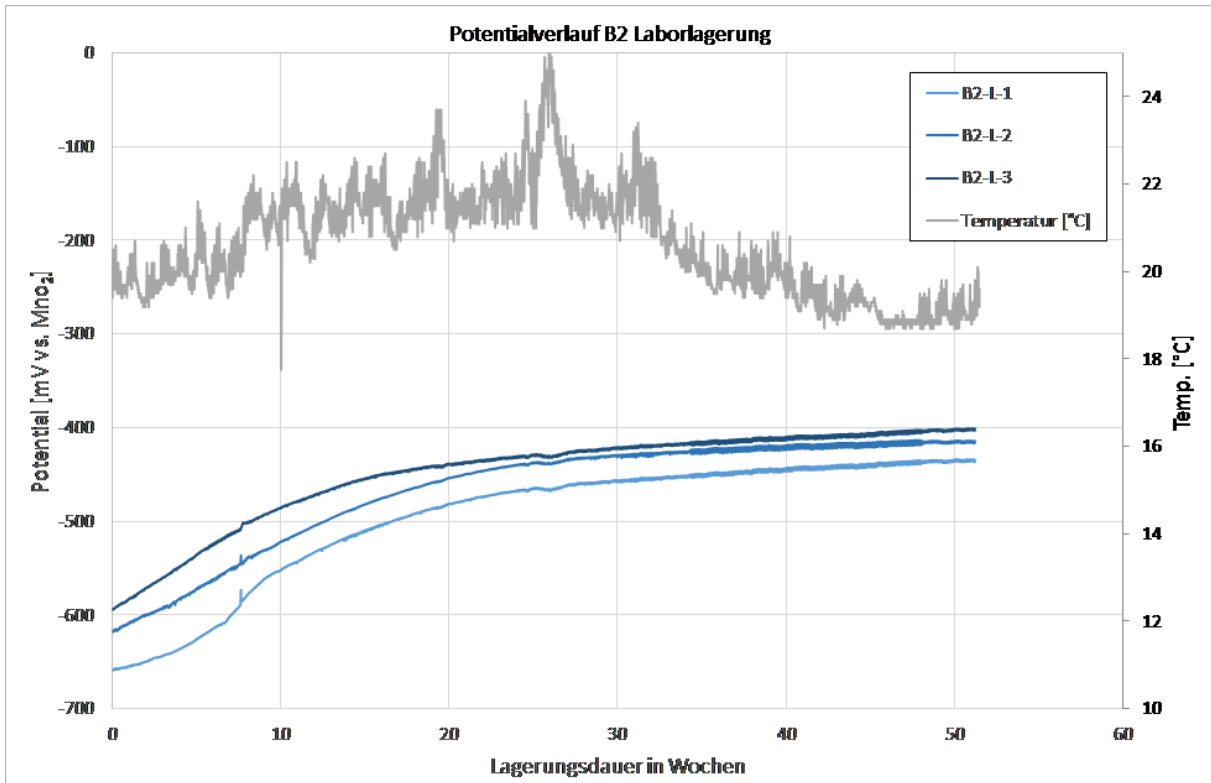


Abb. 20: Potentialverlauf Anodensystem B2, Laborlagerung

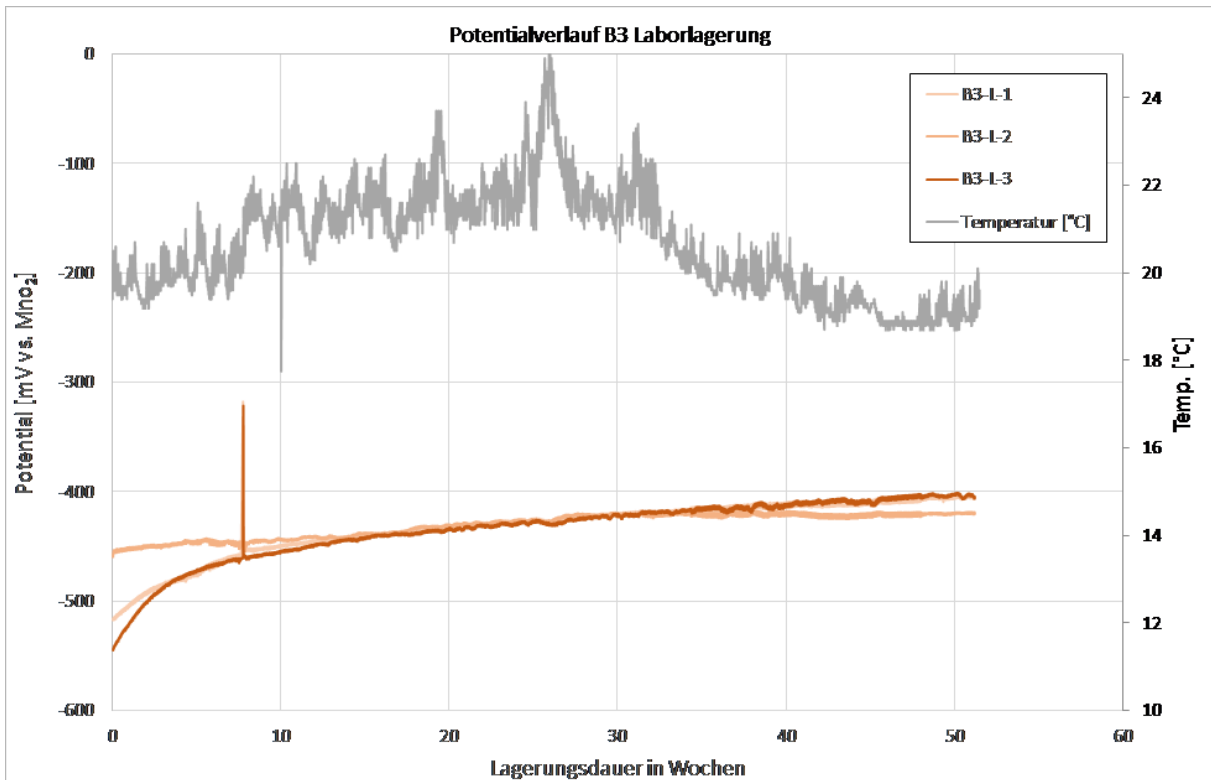


Abb. 21: Potentialverlauf Anodensystem B3, Laborlagerung

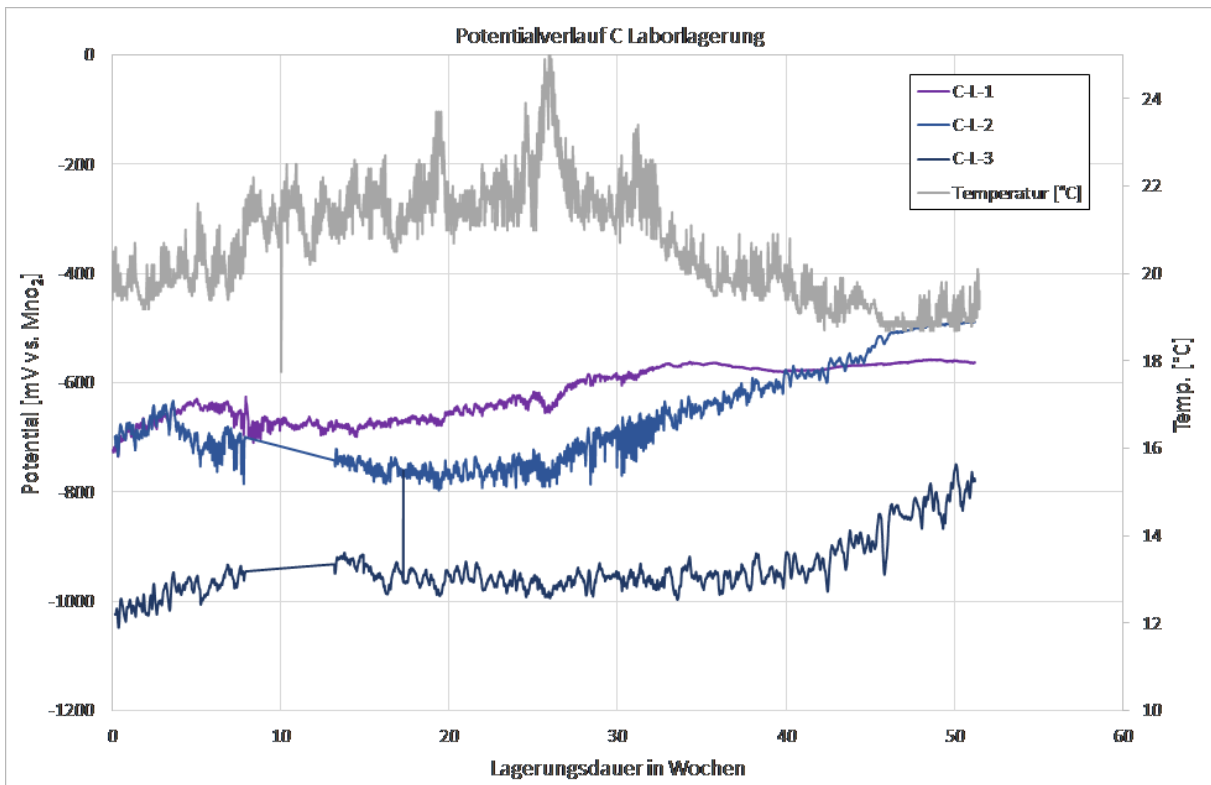


Abb. 22: Potentialverlauf Anodensystem C, Laborlagerung

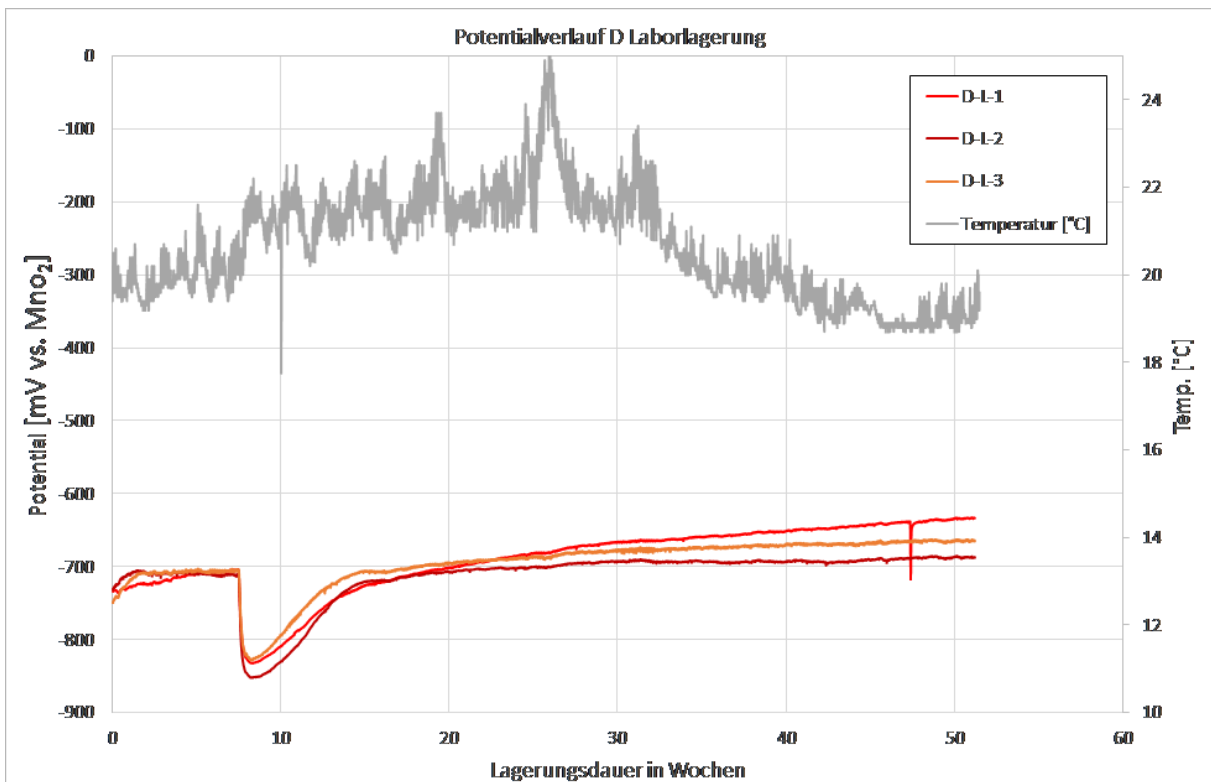


Abb. 23: Potentialverlauf Anodensystem D, Laborlagerung

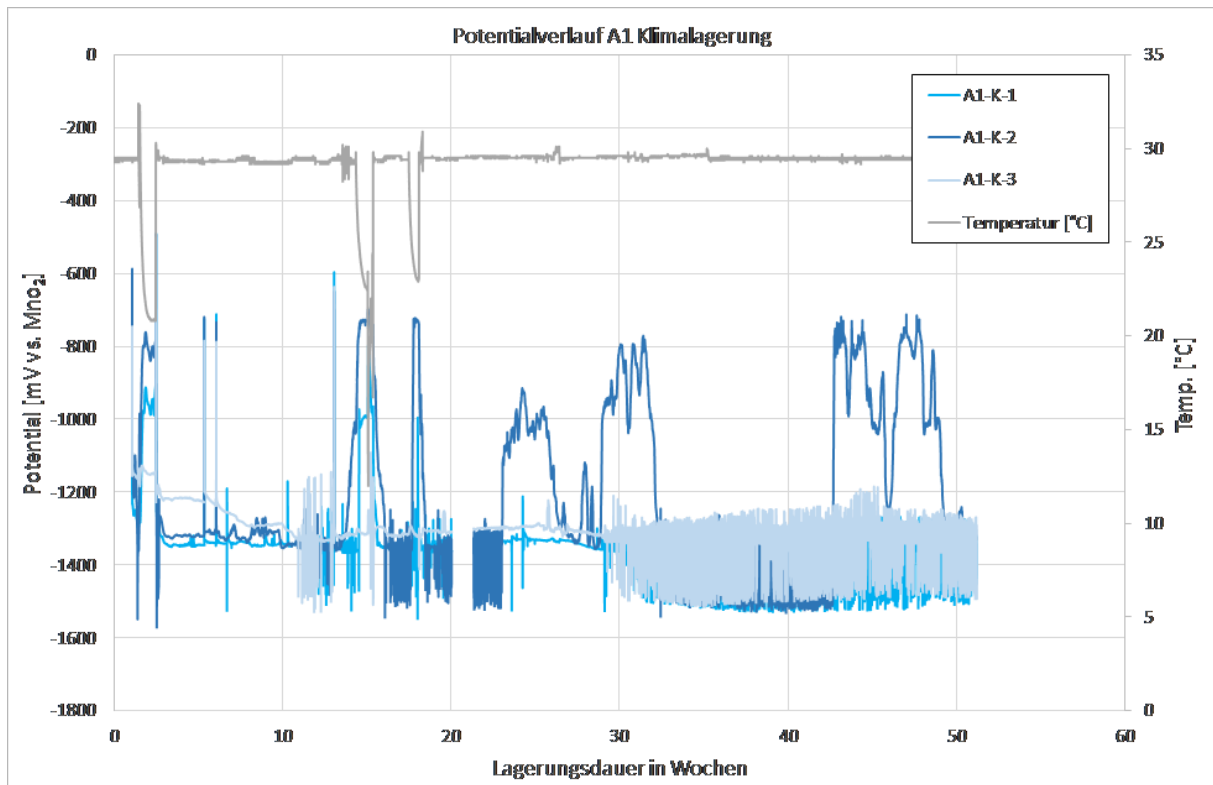


Abb. 24: Potentialverlauf Anodensystem A1, Klimalagerung

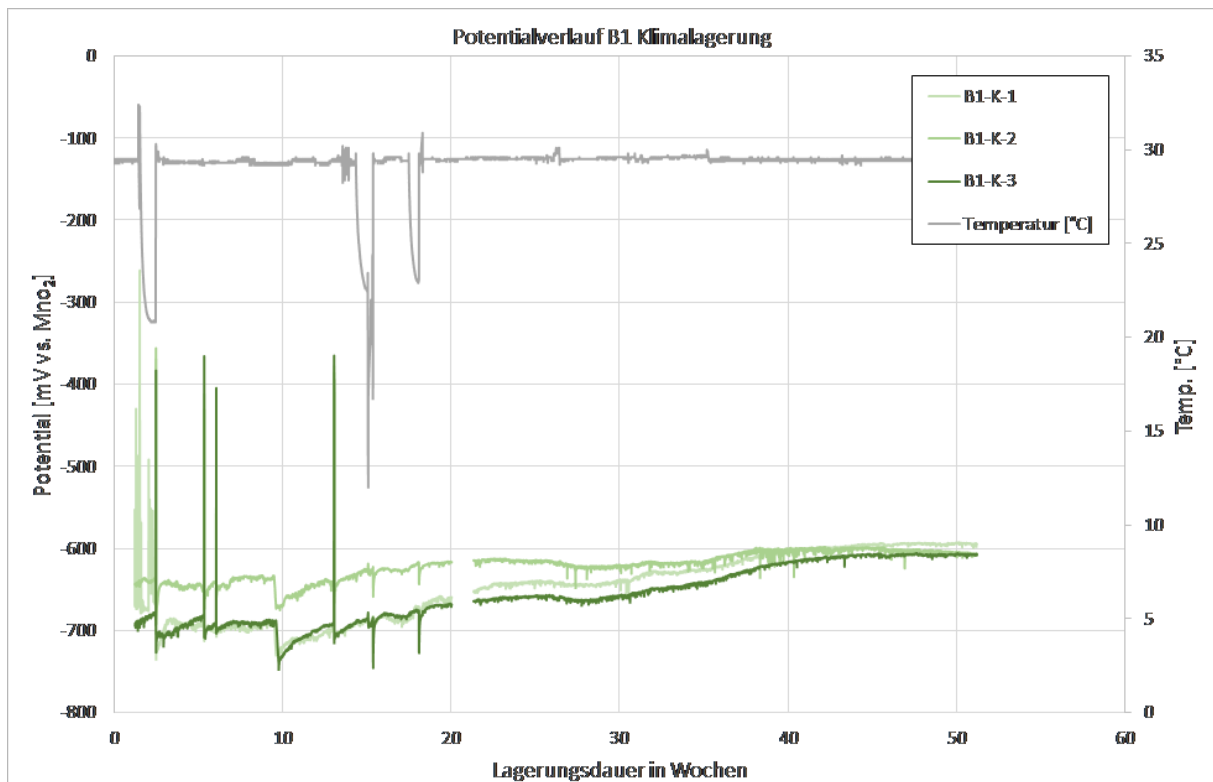


Abb. 25: Potentialverlauf Anodensystem B1, Klimalagerung

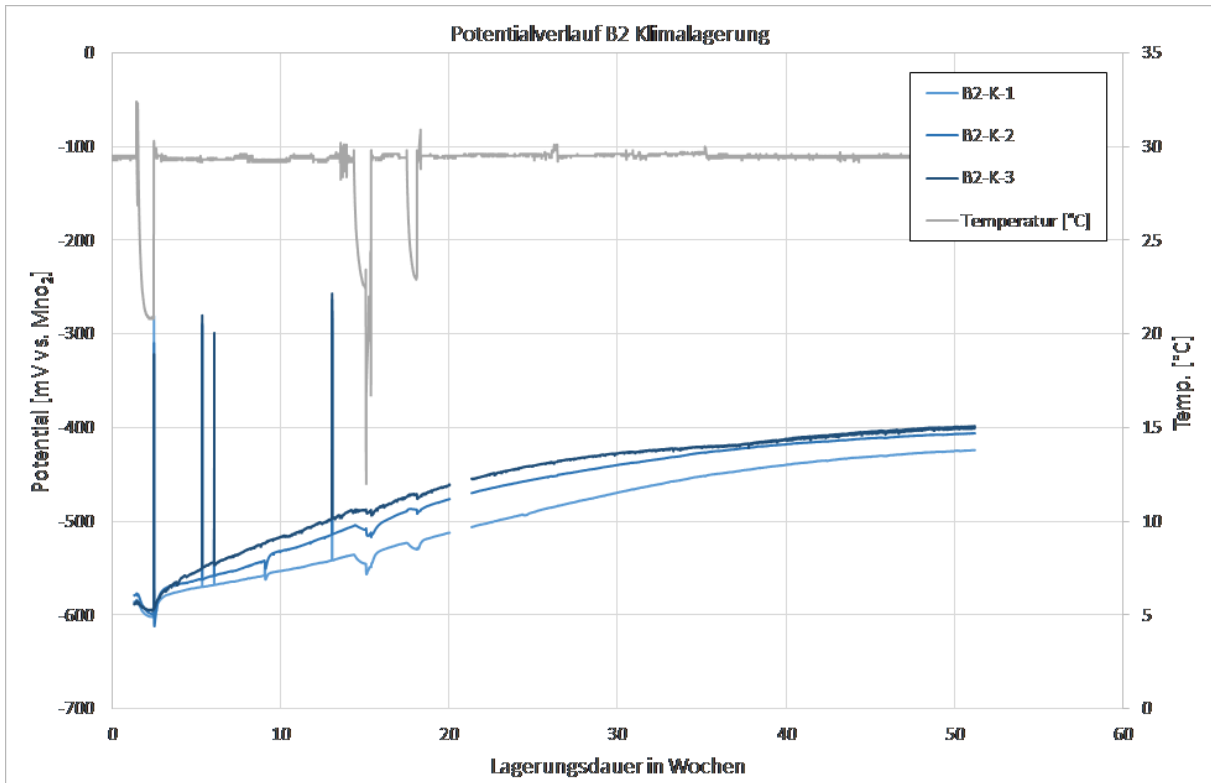


Abb. 26: Potentialverlauf Anodensystem B2, Klimalagerung

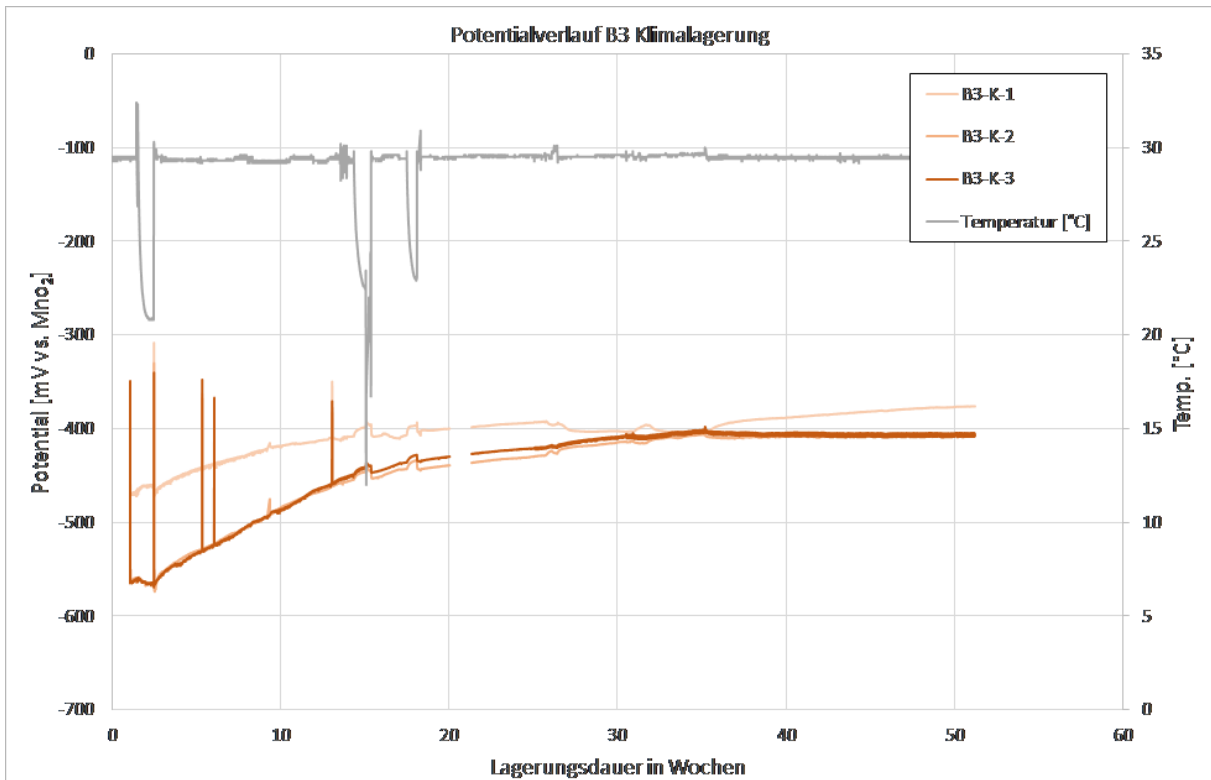


Abb. 27: Potentialverlauf Anodensystem B3, Klimalagerung

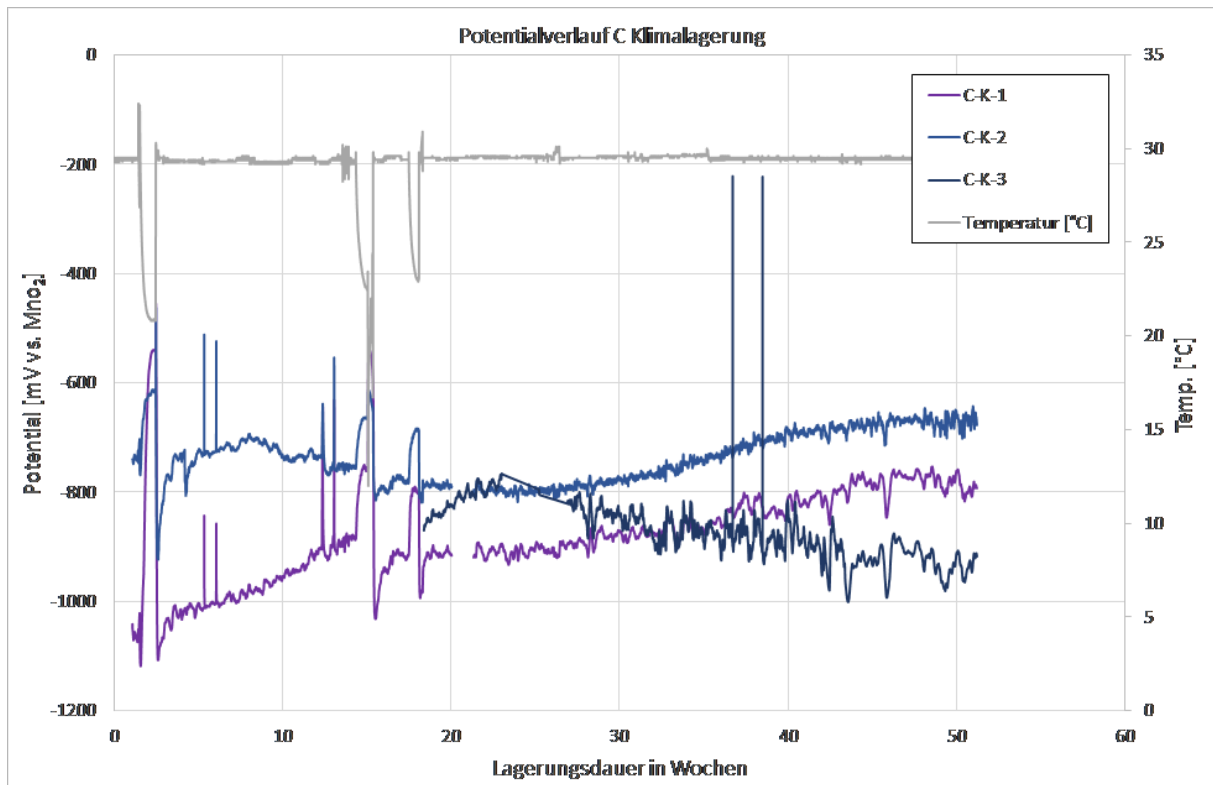


Abb. 28: Potentialverlauf Anodensystem C, Klimalagerung

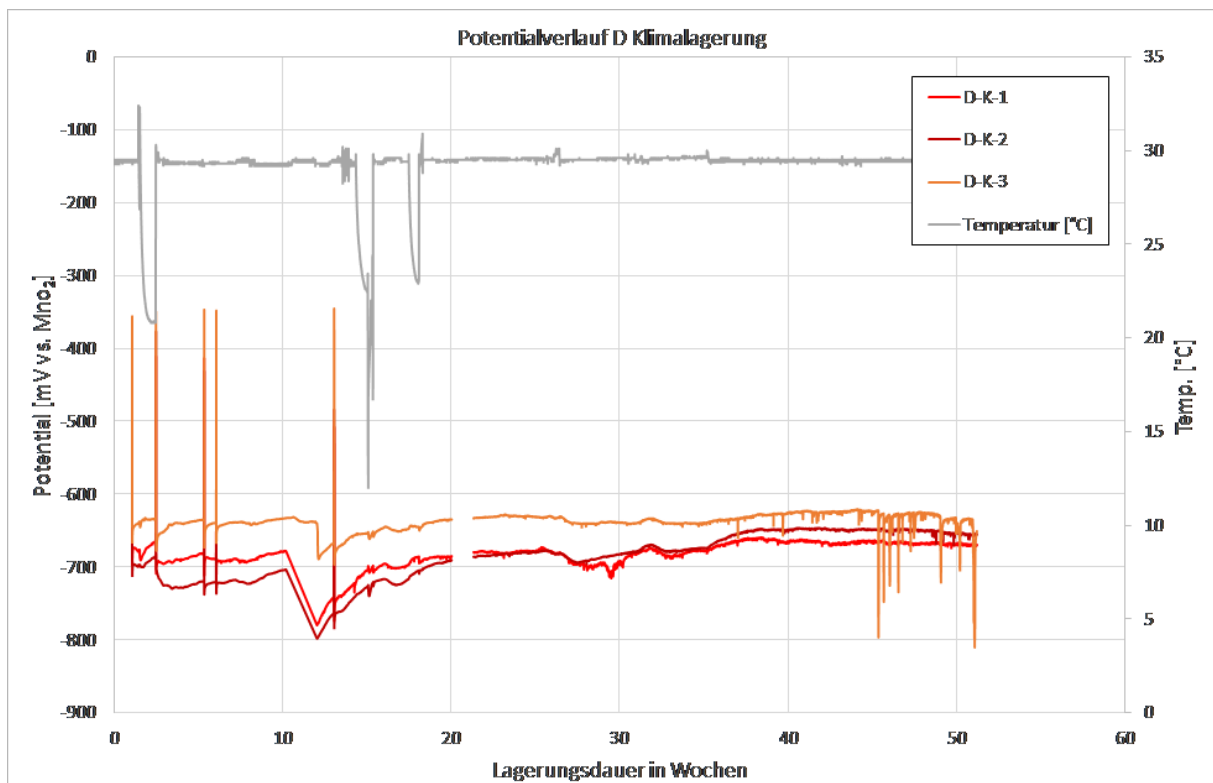


Abb. 29: Potentialverlauf Anodensystem D, Klimalagerung

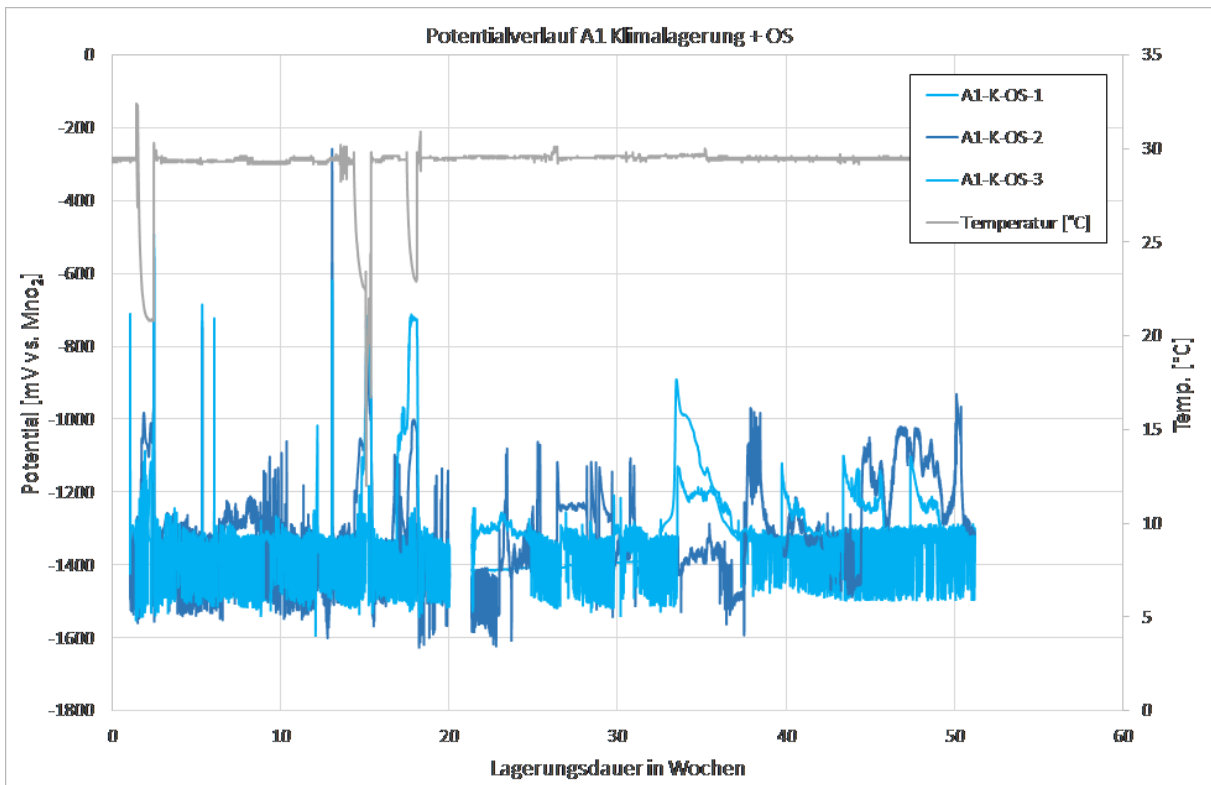


Abb. 30: Potentialverlauf Anodensystem A1, Klimalagerung unter OS-System

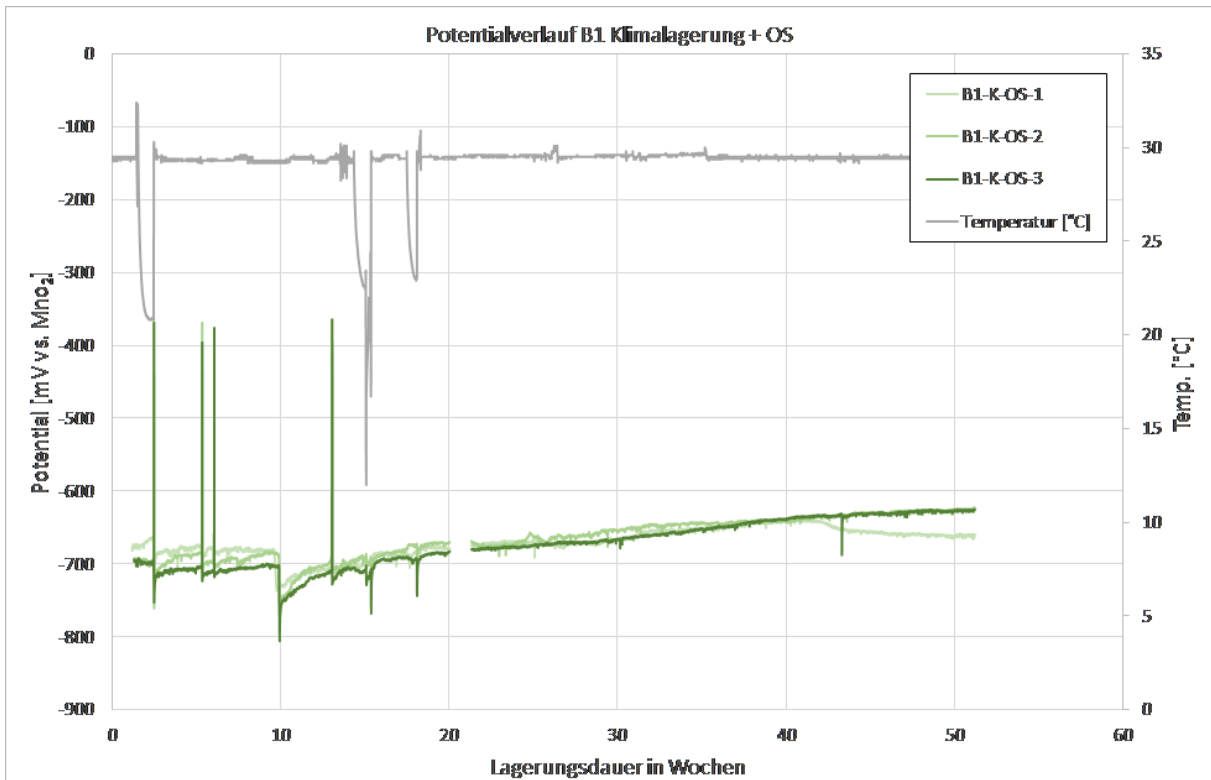


Abb. 31: Potentialverlauf Anodensystem B1, Klimalagerung unter OS-System

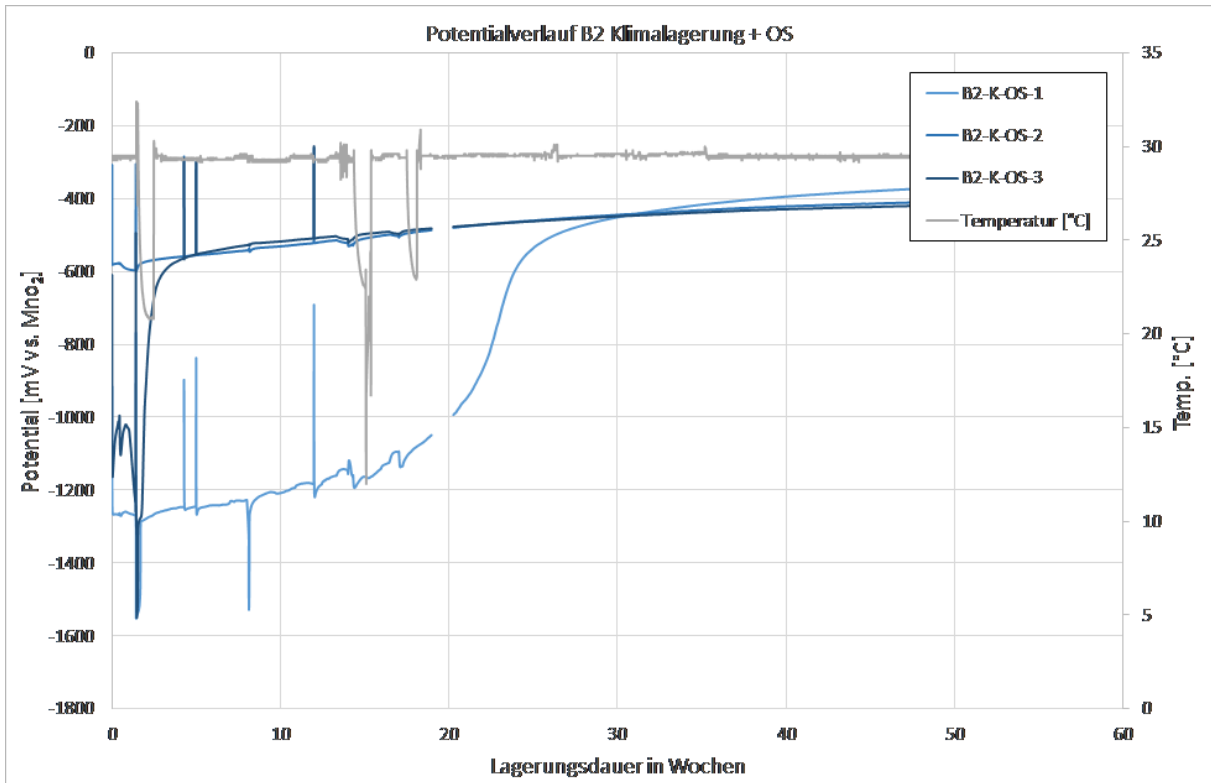


Abb. 32: Potentialverlauf Anodensystem B2, Klimalagerung unter OS-System

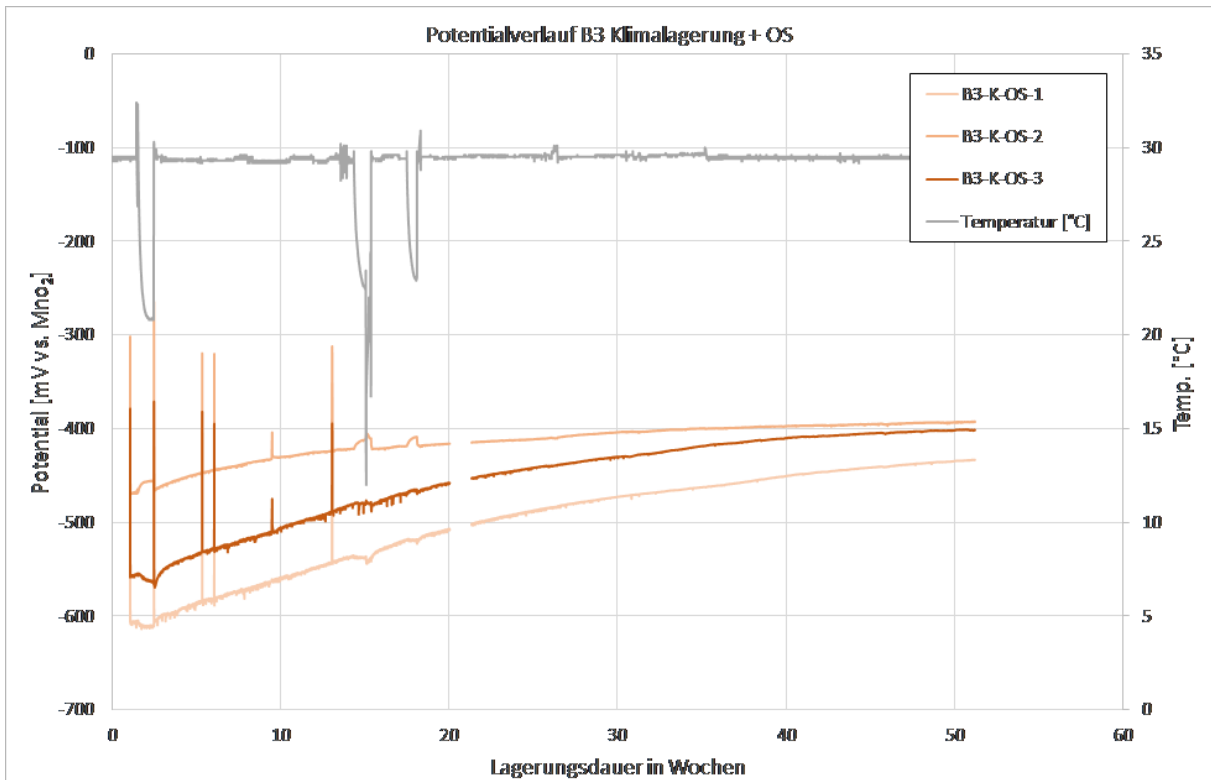


Abb. 33: Potentialverlauf Anodensystem B3, Klimalagerung unter OS-System

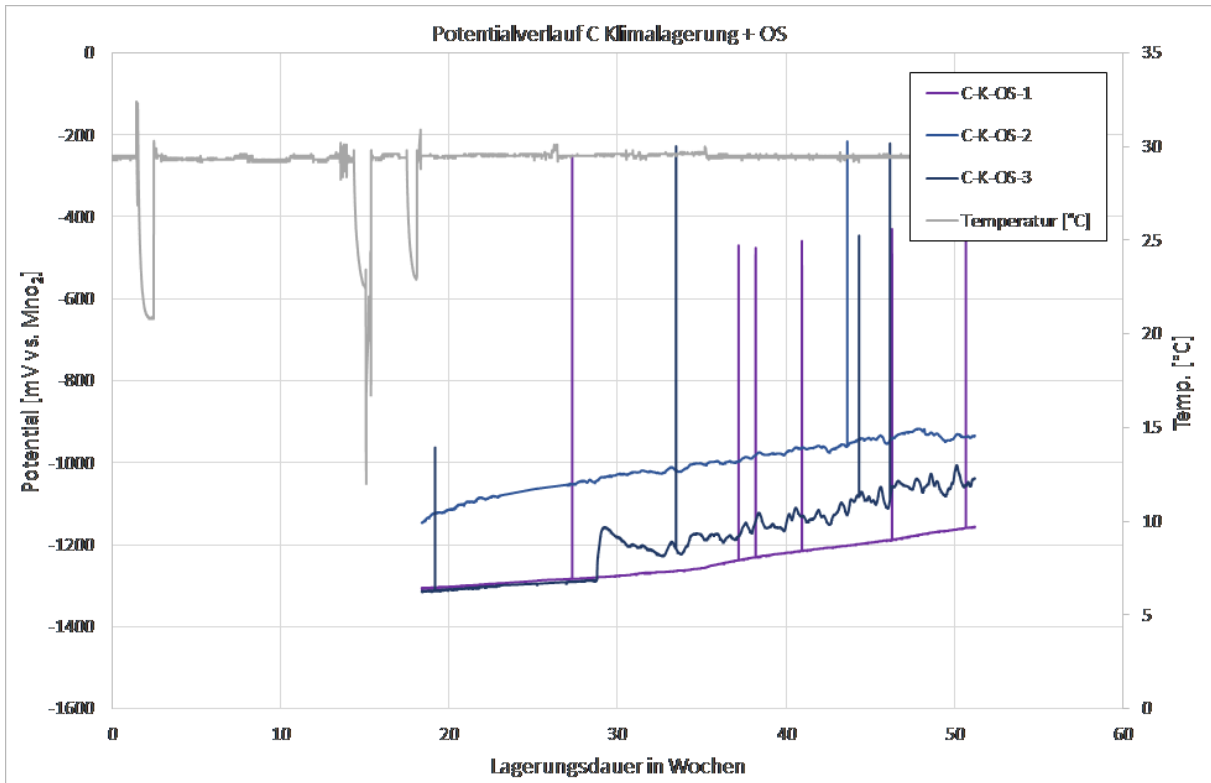


Abb. 34: Potentialverlauf Anodensystem C, Klimalagerung unter OS-System

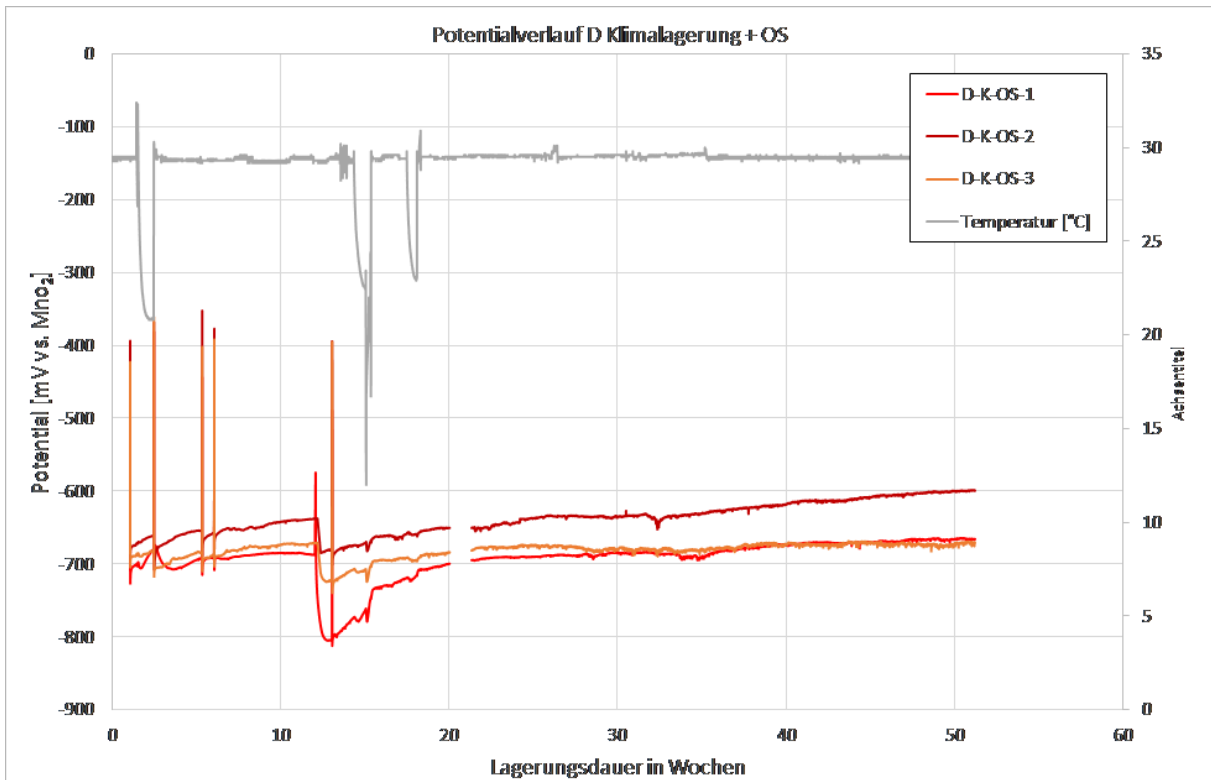


Abb. 35: Potentialverlauf Anodensystem D, Klimalagerung unter OS-System

Tabelle 2: Freie Korrosionspotentiale sowie die Mittelwerte (MW) eines Systems aller Prüfkörper zu Auslagerungsbeginn und nach einem Jahr

Anoden-system	PK	Potential vs. MnO ₂			
		Anfang		Ende	
		Einzel	MW	Einzel	MW
A1	L-1	-1002,8		-692,2	
	L-2	-1089,3	-1047,8	-720,7	-705,6
	L-3	-1051,2		-703,8	
	Klima-1	-1203,0		-1355,8	
	Klima-2	-1016,2	-1124,8	-1325,2	-1328,1
	Klima-3	-1155,1		-1303,2	
	Klima-OS-1	-1342,6		-1299,5	
	Klima-OS-2	-1345,1	-1370,0	-1324,2	-1338,5
	Klima-OS-3	-1422,4		-1391,9	
B1	L-1	-709,9		-600,9	
	L-2	-736,5	-704,4	-615,7	-615,6
	L-3	-666,7		-630,1	
	Klima-1	-552,7		-594,5	
	Klima-2	-643,8	-629,8	-607,3	-603,1
	Klima-3	-692,9		-607,4	
	Klima-OS-1	-677,7		-659,5	
	Klima-OS-2	-693,1	-688,4	-623,4	-636,1
	Klima-OS-3	-694,4		-625,5	
B2	L-1	-658,3		-435,0	
	L-2	-617,5	-623,4	-415,5	-417,2
	L-3	-594,4		-401,1	
	Klima-1	-586,0		-424,0	
	Klima-2	-578,8	-584,3	-406,1	-409,7
	Klima-3	-588,2		-399,0	
	Klima-OS-1	-1260,6		-368,4	
	Klima-OS-2	-580,3	-966,1	-408,5	-398,3
	Klima-OS-3	-1057,5		-418,0	
B3	L-1	-516,1		-404,7	
	L-2	-459,4	-506,8	-420,4	-410,2
	L-3	-544,9		-405,4	
	Klima-1	-470,0		-376,1	
	Klima-2	-562,4	-532,4	-407,6	-397,1
	Klima-3	-564,9		-407,5	
	Klima-OS-1	-604,8		-433,3	
	Klima-OS-2	-469,6	-544,0	-393,0	-409,2
	Klima-OS-3	-557,6		-401,4	
C	L-1	-725,2		-563,4	
	L-2	-698,0	-815,4	-489,0	-610,8
	L-3	-1023,0		-780,0	
	Klima-1	-1041,5		-792,9	
	Klima-2	-740,0	-880,5	-677,4	-796,1
	Klima-3	-860,0*		-918,0	
	Klima-OS-1	-1306,0*		-1156,0	
	Klima-OS-2	-1146,0*	-1255,3	-934,0	-1043,0
	Klima-OS-3	-1314,0*		-1039,0	
D	L-1	-734,0		-633,3	
	L-2	-730,8	-737,7	-687,7	-661,8
	L-3	-748,4		-664,5	
	Klima-1	-674,8		-669,4	
	Klima-2	-689,3	-665,6	-654,9	-658,4
	Klima-3	-632,7		-650,9	
	Klima-OS-1	-704,3		-665,6	
	Klima-OS-2	-666,8	-683,3	-599,4	-645,1
	Klima-OS-3	-678,7		-670,4	

*Aufzeichnung wegen Datenbankfehler erst ab einem Probenalter von 18 Wochen

Die untersuchten galvanischen Anodensystem zeigen hinsichtlich Ihrer jeweiligen Ruhepotentiallagen und -Verläufe ein differenziertes Bild. Generell ist festzustellen, dass die aufgrund der im Vorfeld durchgeführten Literaturlauswertung erwarteten Potentialbereiche von den meisten getesteten Systemen nicht erreicht werden. Hier waren bei der Annahme von aktivem Korrosionsverhalten von reinem Zink oder einer weitestgehend zinkhaltigen Legierung in alkalischen Einbettmörteln Werte von -1 V oder negativer gegen die verwendeten Referenzelektroden erwartbar. Dies wird anfänglich lediglich von System A1 und teilweise System C erfüllt. Die Systeme B1, B2, B3 und D weisen deutlich positivere Potentialwerte auf. Dies deutet nicht auf ein aktives Korrosionsverhalten der Anodensysteme hin.

Hinsichtlich der unterschiedlichen Lagerungen zeigt sich, dass die vergleichsweise trockene Laborlagerung (L) bei allen Anodentypen zu einer Verschiebung des freien Korrosionspotentials in positive Richtung führt. An der anfänglich gemessenen Reihung der Anodensysteme ändert sich nichts. Die positivsten Werte zeigen nach einem Jahr Laborlagerung, mit Werten von knapp -400 mV vs. MnO_2 , die bohrlochapplizierten Systeme B2 und B3 auf. Die negativsten Werte weist ein einzelner PK vom Typ C, sowie die PK von Typ A1 mit Werten von -700 bis -800 mV auf. Auf Basis dieser Erkenntnisse ist bei trockener Exposition bei allen Systemen mit einer Leistungsminderung zu rechnen. Die in den Potentialverläufen zwischen Woche 8 und 12 bei einigen Systemen zu erkennenden Potentialverschiebungen zu negativeren Werten hin, wurden durch die kurzzeitige anodische Polarisation der PK bei der Ermittlung der Stromdichtepotentialkurven (SDK) aus AP2b verursacht. Ein nachhaltiger Effekt durch eine etwaige Depassivierung der jeweiligen Systeme ist allerdings nicht zu beobachten.

Die Lagerungen der Prüfkörper mit und ohne OS im feuchteren Klima führt bei einigen Anodensystemen zu einer Verschiebung der freien Korrosionspotentiale zu negativeren Werten hin. Die Wirkung des OS-Systems zeigt sich in der Potentiallage und übersteigt die der reinen Klimalagerung. Es ist davon auszugehen, dass das Abdiffundieren von Wasser aus dem Prüfkörper signifikant gehemmt wird und somit mehr Wasser im Prüfkörper vorhanden ist.

Unter beiden Expositionen weist der Anodentyp A1 die negativsten Potentiale auf, welche mit einer Schwankungsbreite von ca. ± 200 mV um einen Wert von ca. -1,4 V vs. MnO_2 zu oszillieren scheinen. Auch System C zeigt mit Werten unter -800 mV (Klima) bzw. -900 mV (Klima-OS) vergleichsweise niedrige Potentiale. Alle anderen Systeme pendelten sich nach einem Jahr Lagerung unter allen Lagerungsbedingungen bei Werten von ca. -400 mV (B2, B3) bzw. -600 bis -700 mV (B1, D) vs. MnO_2 ein.

Abschließend lässt sich zu diesem AP feststellen, dass die klimatischen Randbedingungen einen großen Einfluss auf die Performance der funktionstüchtigen Systeme A1 und evtl. C haben. Bei den Typen B1, B2, B3 und D zeigen sich jedoch unabhängig von der Lagerung Potentialverläufe, die eine Verwendung als Anodensystem für Stahlbeton fraglich erscheinen lassen, da die erzielbaren Treibspannungen zum Schutzobjekt als äußerst gering oder nicht vorhanden einzuschätzen sind. Es bleibt allerdings anzumerken, dass die hier betrachteten PK bis auf die kurzzeitige anodische Polarisation zur Erstellung der SDK stromlos gehalten wurden. Inwieweit eine permanente anodische Polarisation hier zu Veränderungen der Eigenschaften führt, soll durch die galvanischen Halteversuche in AP2a gezeigt werden.

3.3 Arbeitspaket 2a (BAM)

3.3.1 Aufgaben und Ziel des Arbeitspaketes

Im zweiten Arbeitspaket werden an der BAM galvanostatische Halteversuche durchgeführt, die eine Beaufschlagung mit typischen Schutzstromdichten simulieren soll. In regelmäßigen Abständen werden die Ausschaltpotentiale und die Depolarisation der Elektroden untersucht. Anhand dieser Ergebnisse sollen mögliche Passivierungsvorgänge durch eventuelle Deckschichtbildung beschrieben werden. Weiterhin werden an diesen Probekörpern, nach der Depolarisation, galvanostatische Pulsmessungen zur Ermittlung der anodischen und kathodischen Polarisationswiderstände durchgeführt. Die Versuche werden an je drei Prüfkörpern je System über die gesamte Projektlaufzeit durchgeführt. Der Prüfkörperaufbau entspricht dem der am ibac verwendeten Prüfkörper für die Ermittlung der Stromdichte-Potential-Kurven.

3.3.2 Prüfkörperdesign, Herstellung und Lagerung

Die Betonrezeptur entspricht der in Arbeitspaket 1b vorgestellten Variante. Als Ankoppelmörtel wurde, wie zuvor bei den Widerstandsprobekörpern beschrieben, SikaTop ES 104 verwendet und nach Herstellerangaben verarbeitet. Für jedes Anodensystem wurden 3 Probekörper hergestellt.

Die verwendete Stahlschalung hat eine Kantenlänge 20 x 20 x 20 cm, der im Inneren des Prüfkörpers auszusparende Bereich wurde mit einer Silikonform realisiert, in der sich unten und oben zwei Stahlplatten befinden, deren Kantenlänge 1 cm kürzer ist als die der Silikonform. Innerhalb der Silikonform sind zwei Gewindestäbe, die die Stahlplatten miteinander verbinden. Die Silikonform hat eine Kantenlänge im Grund von 10 x 10 cm und eine Höhe von 15 cm nach dem Ausschalen ergibt sich daraus die Möglichkeit, die Anoden mittels Ankoppelmörtel in dem Gefach im Prüfkörper einzubetten. In den Beton wird ein Titanmischoxidgitter mit einer Kantenlänge von jeweils 18 cm und einer Höhe von ebenfalls 18 cm eingebettet. Dies dient als Gegenelektrode für nachfolgende Polarisationsversuche. Die Betondeckung zwischen der Außenseite des PK und dem Titanmischoxidgitter beträgt ca. 1,5 cm. Hierfür wurden Abstandshalter aus Mörtel hergestellt und am Titanmischoxidgitter mit artgleichem Material befestigt, siehe Abb. 36. Neben den Gegenelektroden wurden Bezugselektroden vom Typ ERE20 der Firma Force in jeden Probekörper eingebaut, dabei handelt es sich um Mangandioxiidelektroden mit einem Potential von ca. 410 mV gegen die Standardwasserstoffelektrode (SHE).



Abb. 36: Stahlschalung mit Silikonkörper links und Bezugs- und Gegenelektroden für die Prüfkörper rechts.

In Abb. 37 ist ein Prüfkörper mit eingesetzter Gegenelektrode zu erkennen und auf der rechten Seite der Abbildung die fertig hergestellten und noch in der Schalung befindlichen Prüfkörper der ersten Betonage. Die Prüfkörper wurden 24 h nach der Betonage ausgeschalt, die Silikonform in der Mitte des Prüfkörpers wurde 48 h nach der Betonage, durch Eindrehen einer Schraube, auf der im Bild unten

liegenden Stahlplatte, und Herausziehen der Silikonform, entfernt. Im Anschluss daran wurden die sehr glatten Innenseiten der Prüfkörper, die einen Verbund mit dem später einzubringenden Ankoppelmörtel gewährleisten sollen, sandgestrahlt, um die Oberflächenrauheit zu erhöhen.

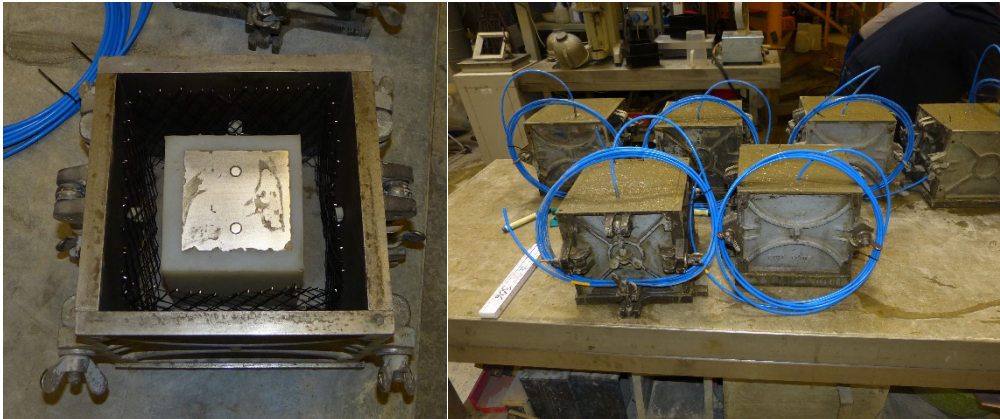


Abb. 37: Schalung mit eingesetzter Gegenelektrode links und fertig betonierte Prüfkörper rechts.

Die Prüfkörper wurden im Anschluss daran bei einem wie zuvor beschriebenen Konstantklima ausgelagert. Mit einem Probenalter (Betonalter) von ca. 40 Tagen wurden die Anodensysteme mittels Ankoppelmörtel eingebettet, hierzu wurden die Gefache der Prüfkörper vor dem Einbringen des Ankoppelmörtels mittels Sprühnebel mehrfach befeuchtet, siehe Abb. 38. In Abb. 39 sind die fertigen Probekörper mit eingebetteten Anodensystemen, in dieser Abbildung sind das die System A1 und A2 zu je drei Probekörpern, abgebildet.



Abb. 38: Vorbehandlung der Prüfkörper für das Einbringen der Anoden links und verdichte des eingebrachten Ankoppelmörtels auf dem Vibrationstisch rechts.



Abb. 39: Links im Ankoppelmörtel eingebettete auskragende Anschlüsse der Anodensysteme (A1 und A2) und rechts abziehen und glätten der Ankoppelmörteloberfläche

Nach dem Einbetten der Anodensysteme wurden diese 48 h unter nassen Tüchern gelagert und dann in die Klimalagerung verbracht. Circa 48 Tage nach Herstellung wurden die Prüfkörper an ein Messsystem vom Typ Keysight DAQ 970A angeschlossen, das Potential wurde im Nachgang alle 5 Minuten aufgezeichnet. Die Probekörper wurden je Serie, bestehend aus drei gleichartigen Probekörpern, in Reihe an einen Galvanostaten der Firma BANK vom Typ MP87 angeschlossen, die Reihenschaltung erfolgte unter Einbeziehung des Elektrolyten. Die Arbeitselektrode (AE) des Prüfkörpers 1 einer Serie wurde an den Ausgang für die AE am Galvanostaten angeschlossen, die Gegenelektrode des selben Prüfkörpers an die Arbeitselektrode des 2. Prüfkörpers. Zum Schluss wurde die Gegenelektrode des 3. Prüfkörpers an den zugehörigen Ausgang des Galvanostaten angeschlossen, siehe Abb. 40.

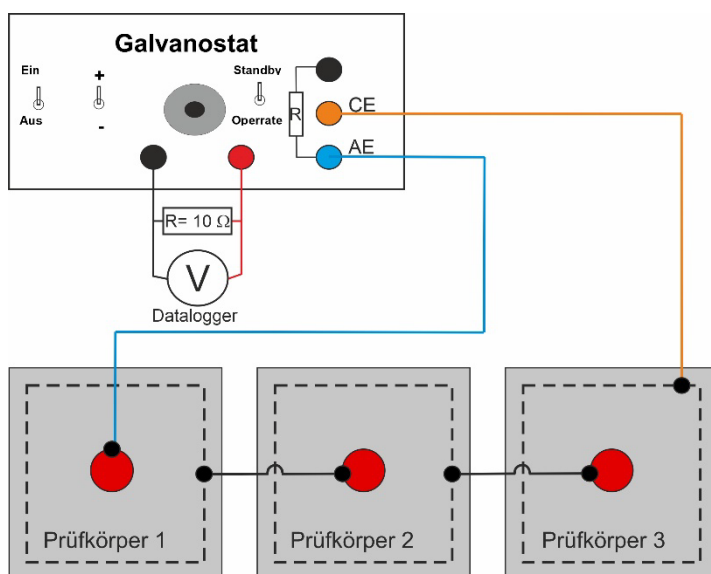


Abb. 40: Schematische Darstellung des Messaufbaus für galvanostatische Haltversuche an drei Proben einer Serie, in Reihe geschaltet

In Abb. 41 ist der Aufbau der Prüfkörperlagerung in der Klimakammer dargestellt, die Prüfkörper werden auf den metallenen Regalböden mit Abstandshaltern aus Kunststoff gelagert, da sie galvanisch von den Böden und untereinander elektrolytisch getrennt sein müssen.

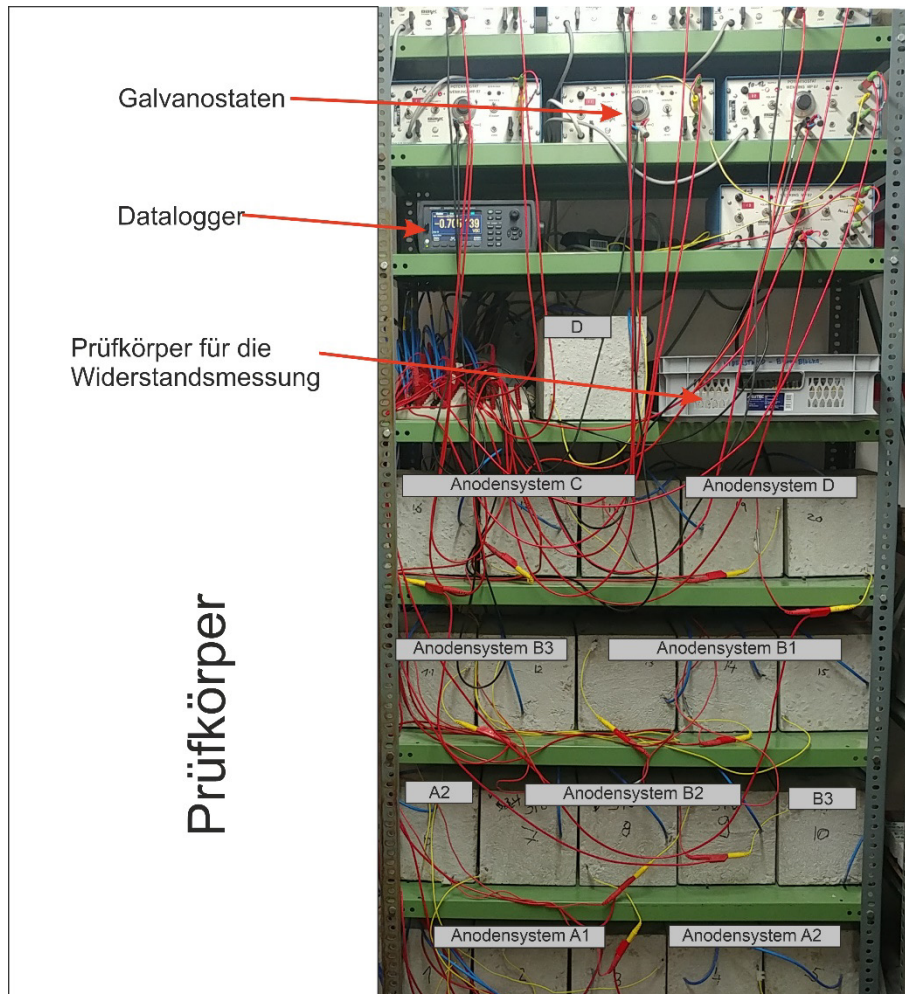


Abb. 41: Darstellung des Prüfstandes der galvanostatischen Halteversuche in der Klimakammer

3.3.3 Ergebnisse und Zusammenfassung des AP2a

Die Potentialaufzeichnung erfolgte ab einem Probenalter von ca. 48 Tagen. In Abb. 42 sind die Potentiale über die Zeit als Mittelwert aus drei gemessenen Proben dargestellt. Grundlegend können die Anodensysteme anhand des gemessenen freien Korrosionspotentials bereits grob unterteilt werden. Die Systeme B2 und B3 haben eine deutlich positivere Potentiallage als die anderen Anodensysteme. Die Systeme B1, C und D befinden sich in einer ähnlichen Potentiallage zwischen -650 bis -700 mV. Die Systeme A1 und A2 weisen das negativste freie Korrosionspotential auf und liegen zwischen -1400 mV und -1500 mV, auffällig ist hier, dass das Potential oszilliert, dies aber mit zunehmendem Probenalter abnimmt.

Bezogen auf die Wirksamkeit der Anodensysteme ist es erforderlich, dass die Potentiallage der Anodensysteme signifikant negativer liegt als das Potential eines aktiv korrodierenden Betonstahls in Beton (ca. -350 bis -500 mV gegen MnO_2 -Bezugselektrode). Somit ist die Wirksamkeit der Systeme B2 und B3 schon nach dem Erfassen des freien Korrosionspotentials und der daraus resultierende zu geringen oder fehlenden Treibspannung nicht gewährleistet, die Systeme werden daher in den weiterführenden Untersuchungen nicht mehr berücksichtigt.

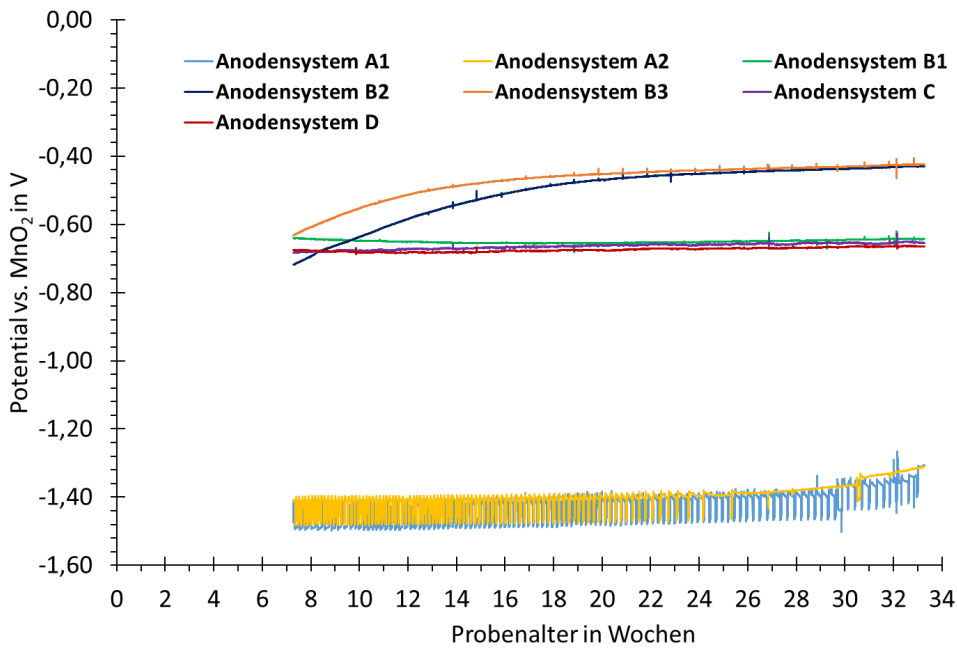


Abb. 42: Freies Korrosionspotential der Anodensysteme in den Prüfkörpern, dargestellt ist der Mittelwert aus jeder Serie

Parallel zu den Potentialmessungen wurden, in einem wöchentlichen Intervall, die elektrochemischen Kennwerte wie IR-Drop und Polarisationswiderstand erfasst. In einem Turnus von 4 Wochen wurden Stromdichtepotentialkurven und EIS-Messungen durchgeführt. Letztere konnten aufgrund der gewählten Messanordnung nicht einwandfrei aus- bzw. bewertet werden und wurden verworfen. Die für die Bewertung der Systeme relevanten Parameter konnten anhand der Stromdichtepotentialkurven, der Polarisationswiderstände und des IR-Drops sowie dem gemessenen Potential ermittelt werden.

Ab einem Probenalter von 33 Wochen wurden die Polarisationsversuche durchgeführt. Dabei wurden die Systeme mit einer Stromdichte von $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ galvanostatisch polarisiert. Für die Durchführung der wiederkehrenden elektrochemischen Polarisationsmessungen, im Zuge der galvanostatischen Halteversuche, erfolgte vor den Messungen eine 24-stündige Depolarisation durch temporäres Aussetzen der galvanostatischen Halteversuche.

In Abb. 43 ist der Potentialverlauf der Anodensysteme A1, A2, B1, C und D dargestellt, die Systeme B2 und B3 konnten galvanostatisch nicht zielführend polarisiert werden, da die Klemmspannungen bei Werten größer 15 V lagen und die Potentiallage in ähnliche Größenordnungen polarisiert wurde.

Die Potentiallage des Anodensystems D, unter galvanostatischer Polarisation ist unmittelbar nach Beginn des Polarisationsversuches signifikant gestiegen, die Potentiallage nach Depolarisation bleibt bis zu einem Probenalter von 106 Wochen gleich. Eine weitere signifikante Änderung des Potentialanstiegs des Systems D unter Polarisation ist ab einem Probenalter von 72 Wochen bzw. 39 Wochen Polarisation zu erkennen. Das Anodensystem D entkoppelt sich, was durch den Anstieg des IR-Drop in Abb. 44 verifiziert wird. Das Anodensystem B1 zeigt sowohl im Potentialverlauf als auch bei dem Verlauf des IR-Drop ähnliche Tendenzen und entkoppelt sich bereits 7 Wochen nach Beginn der Polarisationsversuche. Der Potentialverlauf des Systems C steigt ab Woche 49 langsam an, der IR-Drop ändert sich ebenfalls und steigt weiter an. Die Potentiale der Systeme A1 und A2 werden durch den anodischen Halteversuch bis zur 80. Woche nicht beeinflusst. Dies ist an den nicht vorhandenen Potentialabfällen infolge Depolarisation zu erkennen. Das Anodensystem A2 zeigt nach einer Polarisationsdauer von 47 Wochen (Woche 80) einen geringfügigen Potentialanstieg infolge galvanostatischer Polarisation, die Depolarisation nimmt zu und der IR-Drop steigt geringfügig gegenüber dem Anodensystem A1 an.

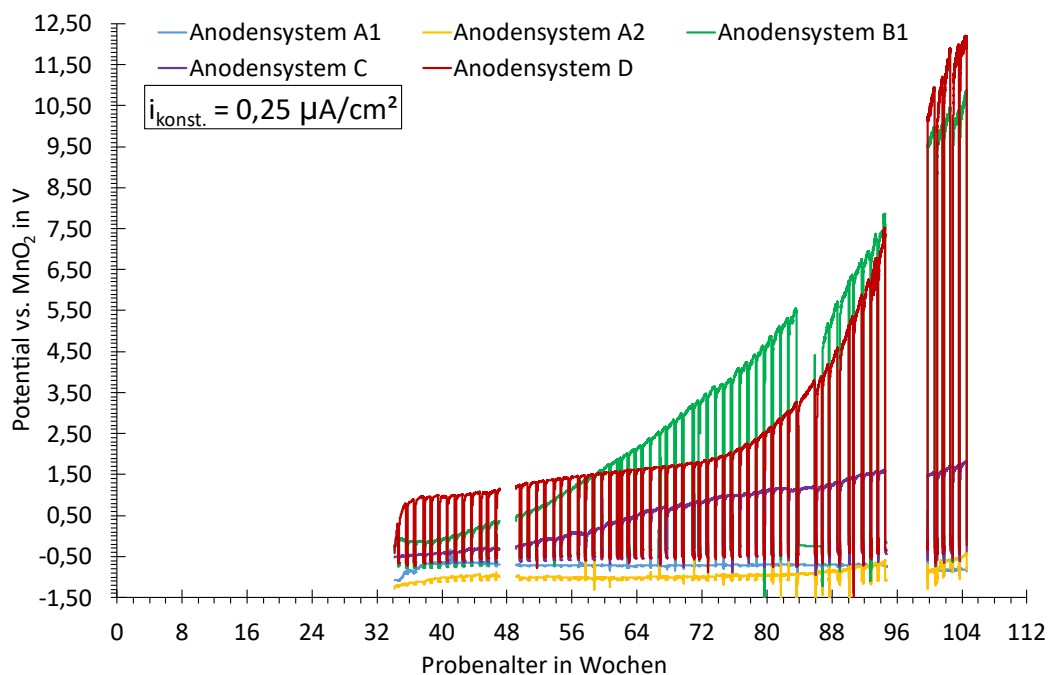


Abb. 43: Potential der Anodensysteme in den Probekörpern unter Polarisation sowie im depolarisierten Zustand

Der IR-Drop der Anodensysteme A1 und A2 ist zu Beginn der Untersuchungen nahezu identisch, und bleibt dies auch über den gesamten Untersuchungszeitraum. Beim Vergleich mit dem Anodensystem C fällt auf, dass die Entwicklung des IR-Drop quasi identisch zu den Systemen A1 und A2 ist. Es ist jedoch ein Offset vorhanden, der mit zunehmendem Probenalter größer wird, was aufgrund der log-Darstellung nicht sofort ersichtlich ist. Dies deckt sich tendenziell mit dem Anstieg des Potentialverlaufs des Anodensystems C gegenüber den Systemen A1 und A2.

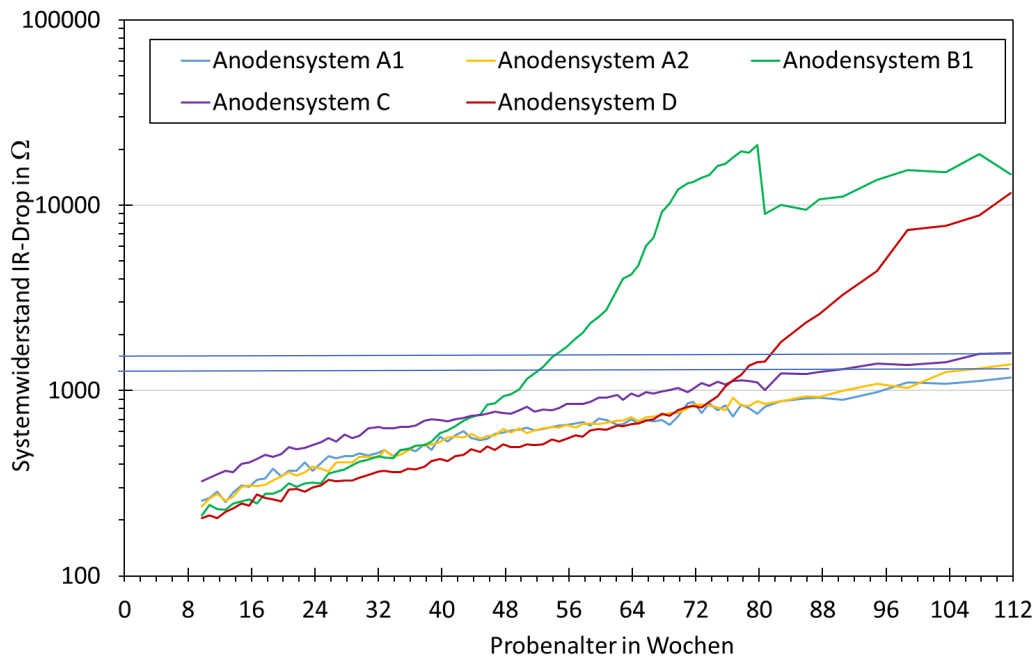


Abb. 44: IR-Drop, Spannungsabfall zwischen Bezugs- und Arbeitselektrode über den Elektrolyten Beton-Ankoppelmörtel-Einbettmörtel für die Anodensystem A1, A2, B1, C und D

In Abb. 45 ist die Entwicklung des IR-Drop der Anodensysteme B2 und B3 über die Zeit ohne galvanostatische Polarisation dargestellt, die Systeme sind nicht verwendbar und weisen eine, gegenüber den Systemen A1 und A2 600-fach höheren Spannungsabfall auf. Das Einbettmittel scheint hier nicht den gewünschten Effekt auf die Korrosionsaktivität und Leitfähigkeit unter den gegebenen Anwendungsbedingungen zu haben.

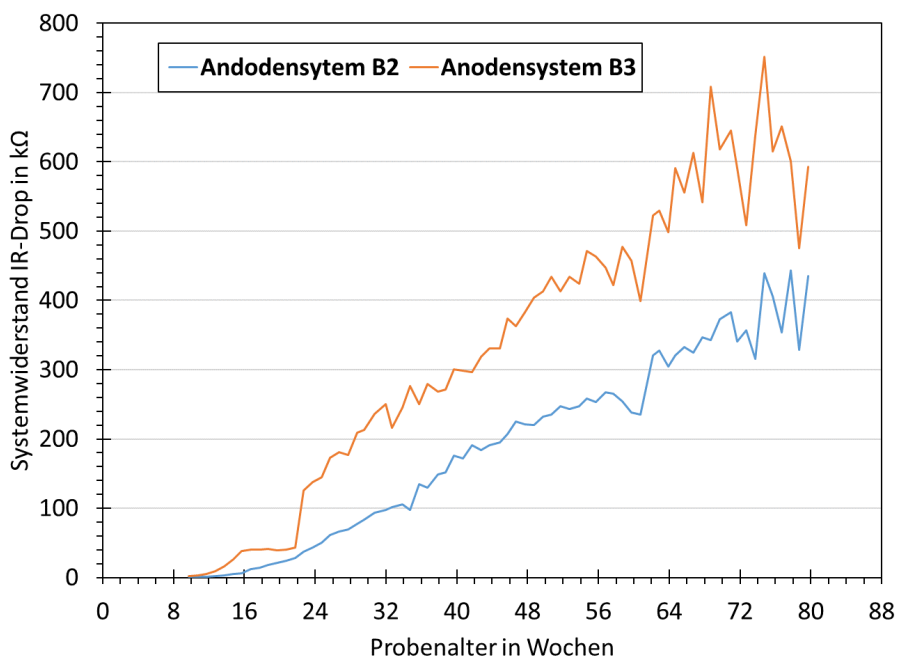


Abb. 45: IR-Drop, Spannungsabfall zwischen Bezugs- und Arbeitselektrode über den Elektrolyten Beton-Ankoppelmörtel-Einbettmörtel für die Anodensystem B2 und B3

Neben dem IR-Drop wurde wie zuvor beschrieben der Polarisationswiderstand aus linearen Polarisationsmessungen bestimmt, die Polarisationsgeschwindigkeit betrug 0,1 mV/s der Linearitätsbereich ± 5 mV.

In Abb. 46 sind die Polarisationswiderstände aller Anodensysteme dargestellt, die Ermittlung der Polarisationswiderstände erfolgte ab einem Probenalter von 44 Wochen. Die Polarisationswiderstände der Anodensysteme A1, A2 und C sind ähnlich. Die Anodensysteme B1 und D verhalten sich ebenfalls ähnlich, der Polarisationswiderstand liegt zum Ende des Untersuchungszeitraumes im Bereich der nicht polarisierten Anodensysteme B2 und B3, diese 4 Systeme haben sich entkoppelt.

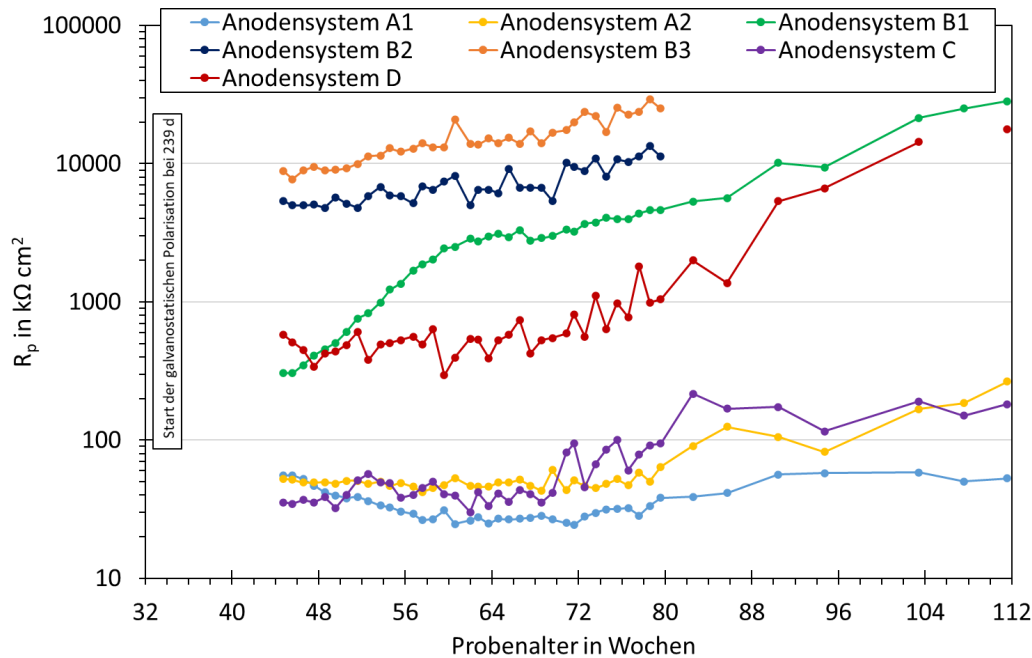


Abb. 46: Polarisationswiderstand aller Anodensysteme über die Zeit

Auch wenn die Polarisationswiderstände der Anodensysteme A1, A2 und C ähnlich sind, so zeichnet sich bei Betrachtung des freien Korrosionspotentials (E_{corr}) des Anodensystems C ein zunehmend positiveres E_{corr} ab, siehe Abb. 47. Der Polarisationswiderstand des Anodensystems C steigt und das gemessene Potential unter galvanostatischer Polarisation ebenfalls.

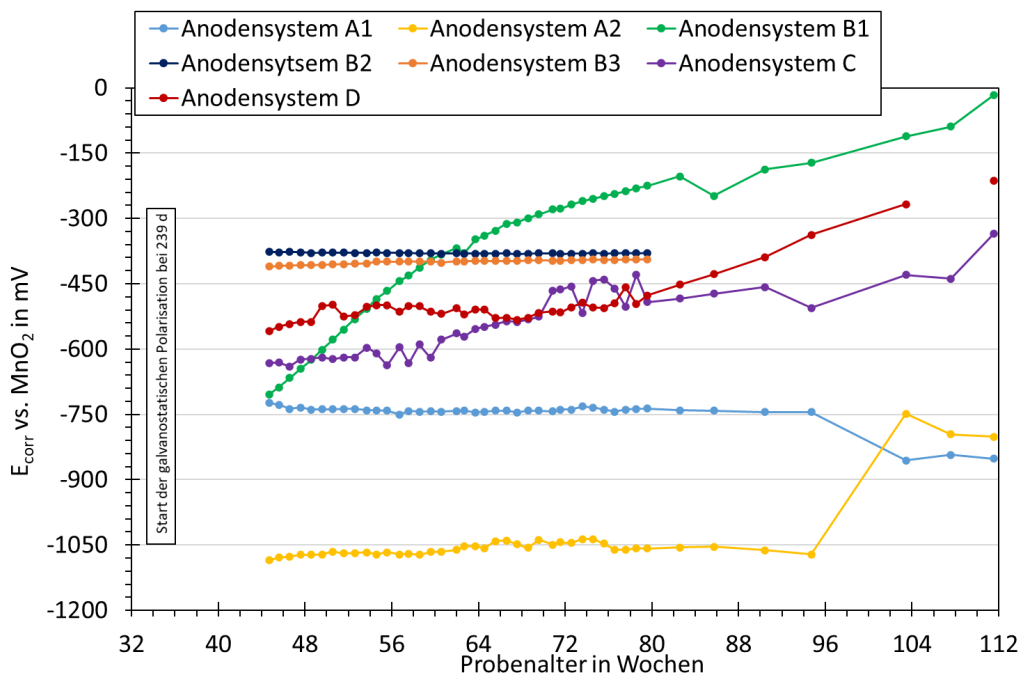


Abb. 47: freies Korrosionspotential aller Anodensysteme, bestimmt nach der 24-stündigen Depolarisation im Zuge der galvanostatischen Halteversuche

In Abb. 48 sind die Eigenkorrosionsstromdichten i_{corr} der Anodensysteme dargestellt. Die Ermittlung des i_{corr} wurde anhand von spezifischen B-Werten, die aus den Stromdichtepotentialkurven bestimmt wurden, unter Verwendung der zuvor gezeigten Polarisationswiderstände ermittelt. Die in Abb. 48 dargestellte rote Strichpunktlinie spiegelt die Polarisationsstromdichte für die galvanostatischen Halteversuche von $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ wider. Es ist deutlich zu erkennen das die Eigenkorrosionsstromdichte der Anodensysteme A1 und A2 im Bereich der Polarisationsstromdichte liegen. Dies erklärt auch die nicht vorhandene Polarisation bzw. Depolarisation bei System A1 und die geringe Depolarisation bei A2. Die gegenüber dem System A1 ausgeprägtere Reduktion der Eigenkorrosionsstromdichte des Systems A2 ab der Woche 80 spiegelt sich ebenfalls in der Änderung der Depolarisationshöhe wider. Die Eigenkorrosionsstromdichte des Systems C ist deutlich geringer als die der Systeme A1 und A2, hinzu kommt das diese über die Zeit abnimmt. Die Potentiallage wird während der galvanostatischen Halteversuche kontinuierlich positiver, der Polarisationswiderstand steigt.

Die Systeme B1 und D weisen eine deutliche Reduktion der Korrosionsaktivität auf, es muss von einer deckschichtbasierten Entkopplung des Systems ausgegangen werden. Die Anodensysteme B2 und B3 scheinen unter diesen Einsatzbedingungen grundlegend nicht geeignet zu sein, wie bereits die Messung des freien Korrosionspotentials ergeben hat

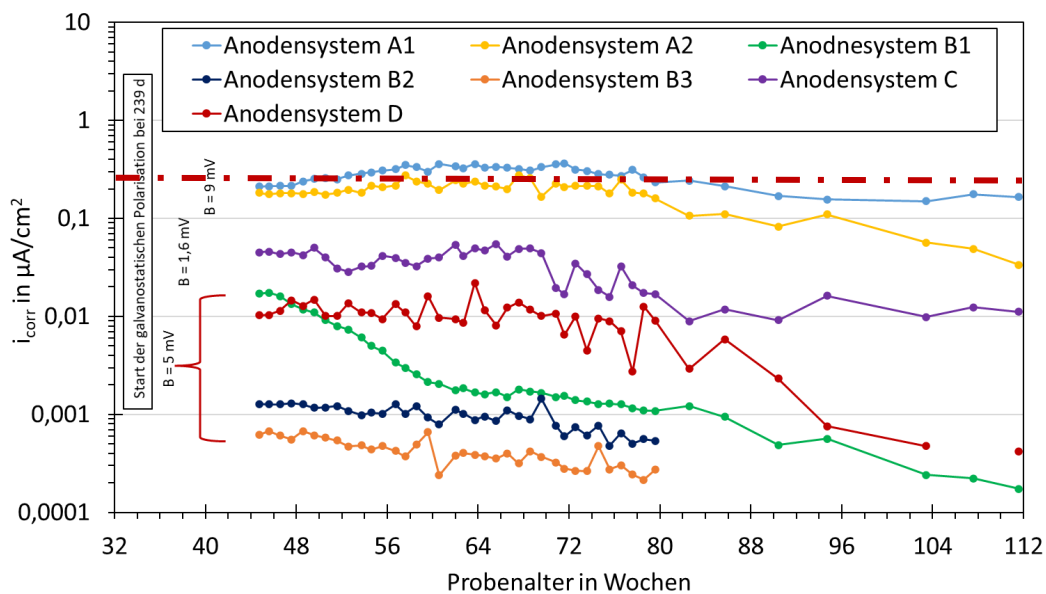


Abb. 48: Berechnete Eigenkorrosionsstromdichte der Anodensystem mit systemspezifischen B-Werten für die jeweiligen Anoden, rotgestrichelte Linie entspricht der Korrosionsstromdichte aus galvanostatischen Halteversuchen

3.4 Arbeitspaket 2b (ibac)

3.4.1 Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes

Nachdem die Wirkungsweise der Anodensysteme durch die Ergebnisse des ersten Arbeitspaketes eingeschätzt werden kann, werden Stromdichtepotentialkurven (SPK) der Systeme aufgenommen. SPK sind Darstellungen der Stromdichte als Funktion der Potentialänderung. Der Strom wird dabei auf die wirksame Elektrodenfläche bezogen und als Stromdichte dargestellt. Die Kenntnis dieser Beziehungen ermöglicht einen Vergleich der Anodensysteme untereinander hinsichtlich der Möglichkeiten, ein Schutzobjekt mit Schutzstrom zu versorgen. Sie stellen außerdem wichtige Eingangsdaten für die numerischen Berechnungen in AP3 dar, mittels derer orts aufgelöste Polarisationswiderstände auf den Elektrodenoberflächen berechnet werden können.

3.4.2 Versuchsdurchführung

An allen Prüfkörpern der zuvor dargestellten Lagerungen L, Klima und Klima-OS wurden SPK bestimmt. Dabei wurde eine Eingangsmessung der Prüfkörper der Variante L unmittelbar nach dem Ende der Nachbehandlung durchgeführt. Nach einem Zeitraum von ca. 4 Monaten wurden die Messungen für alle Serien durchgeführt, bzw. für die Lagerung L wiederholt. Insgesamt 22 Monate nach der Erstmessung erfolgte erneut eine Bestimmung der SPK ausgewählter PK der Lagerung L. Diese stand ursprünglich im Kontext mit AP 4b, wird aber der Vollständigkeit halber hier berichtet. Die Umrechnung sämtlicher dargestellten Stromdichten erfolgte mittels der durch Autopsie erhaltenen Oberflächen aus Tabelle 1, Seite 10.

Die nachfolgenden SPK wurden mittels Laborpotentiostaten vom Typ Gamry Interface 1010 im potentiodynamischen Versuch bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 2mV/Minute ermittelt. Den prinzipiellen Prüfaufbau zeigt Abb. 49.

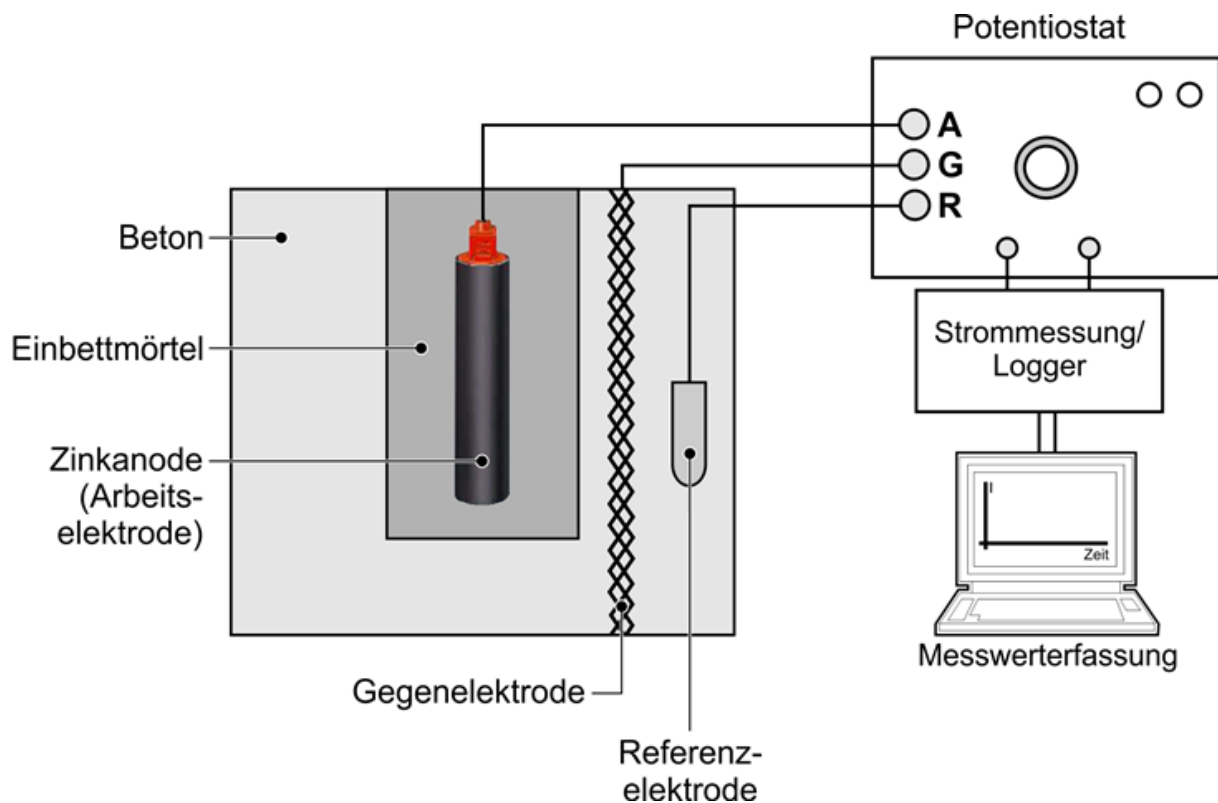


Abb. 49: Schematischer Prüfaufbau zur Ermittlung der Stromdichtepotentialkurven

Die Polarisation erfolgte ausgehend vom freien Korrosionspotential der galvanischen Anoden in anodischer Richtung ohne IR-Kompensation bis zu einem Wert von 0 mV vs. MnO₂. Dies wurde als eine obere Grenze angesehen, die durch eine passive Bewehrung am Bauwerk als Gegenelektrode in der Praxis erreicht werden könnte. Eine zu starke anodische Polarisation der Arbeitselektrode sollte aus Gründen der Übertragbarkeit der Ergebnisse vermieden werden. Unmittelbar nach Ende des potentiodynamischen Versuchs wurde eine Ausschaltmessung durchgeführt, um den IR-Drop zu ermitteln und eine IR-Kompensation der SPK durchzuführen.

3.4.3 Ergebnisse und Zusammenfassung des AP2b

Im Folgenden werden die ermittelten SPK der Anodensysteme vor Beginn der Auslagerung, nach 4 Monaten sowie 22 Monaten für ausgewählte Systeme dargestellt.

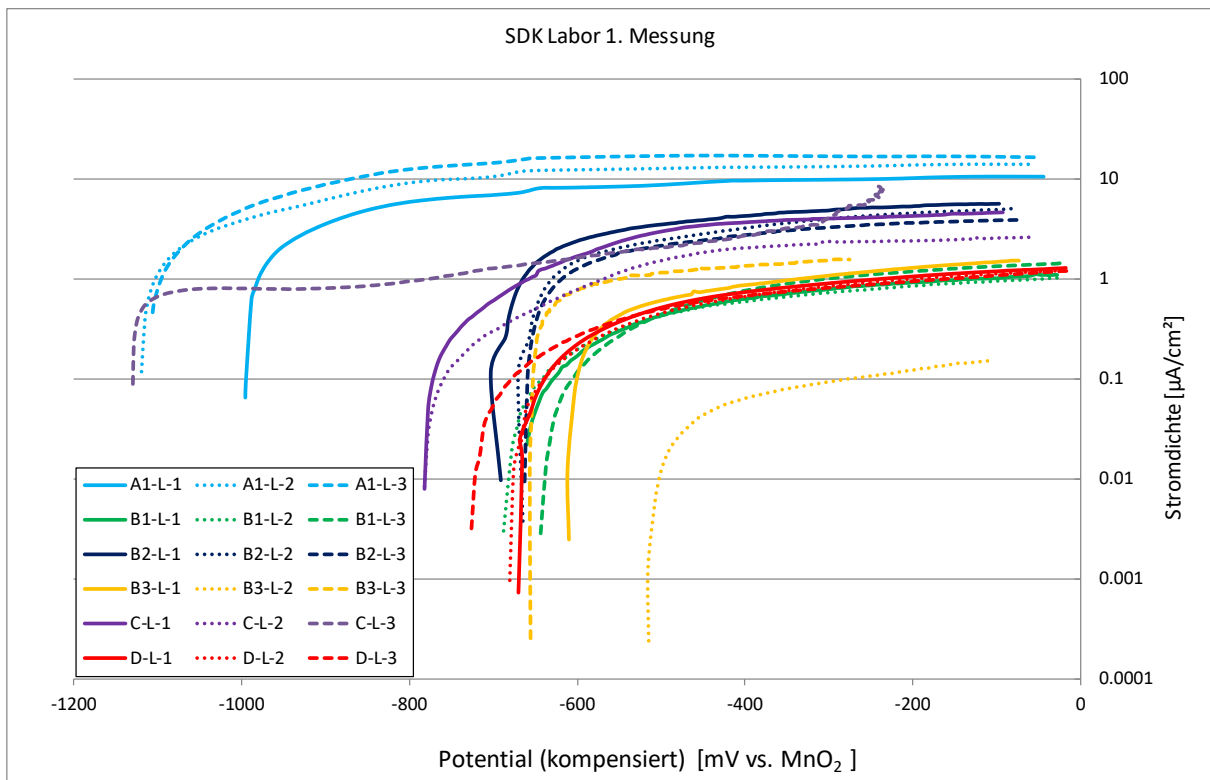


Abb. 50: SPK der Prüfkörper der Serie L vor Beginn der Auslagerung

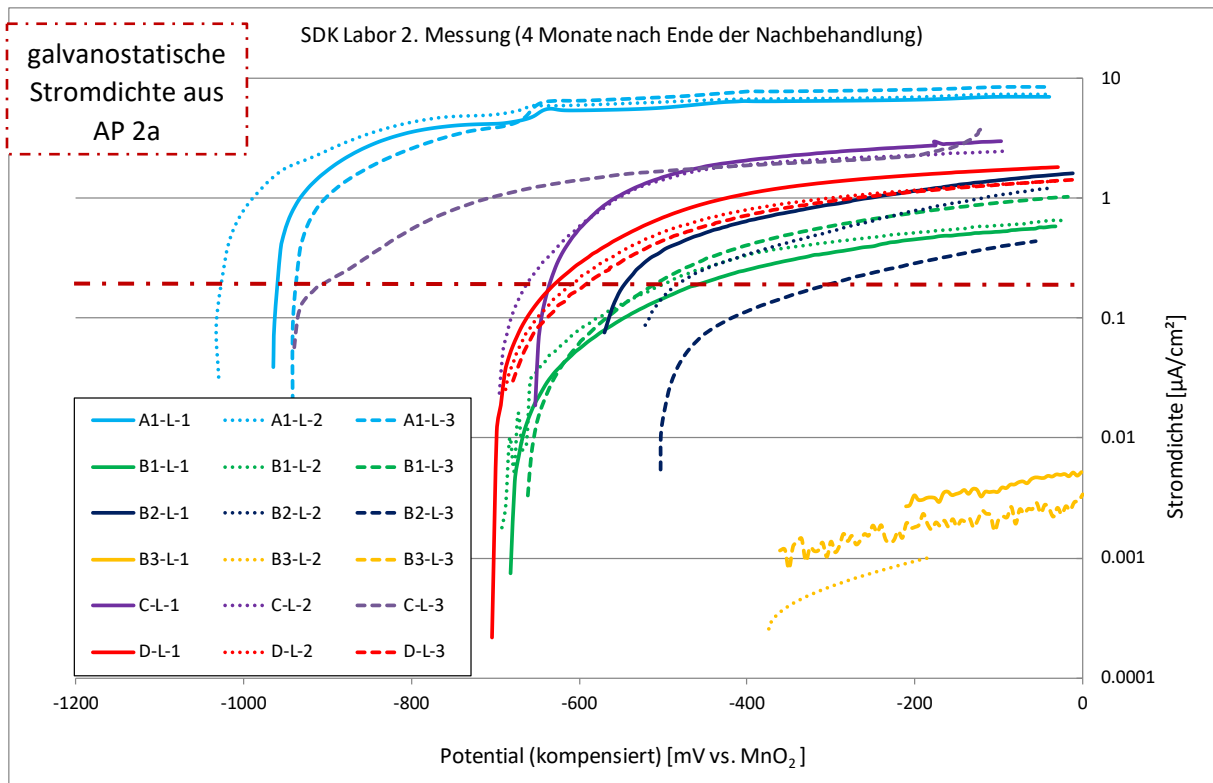


Abb. 51: SPK der Prüfkörper der Serie L, 2. Messung

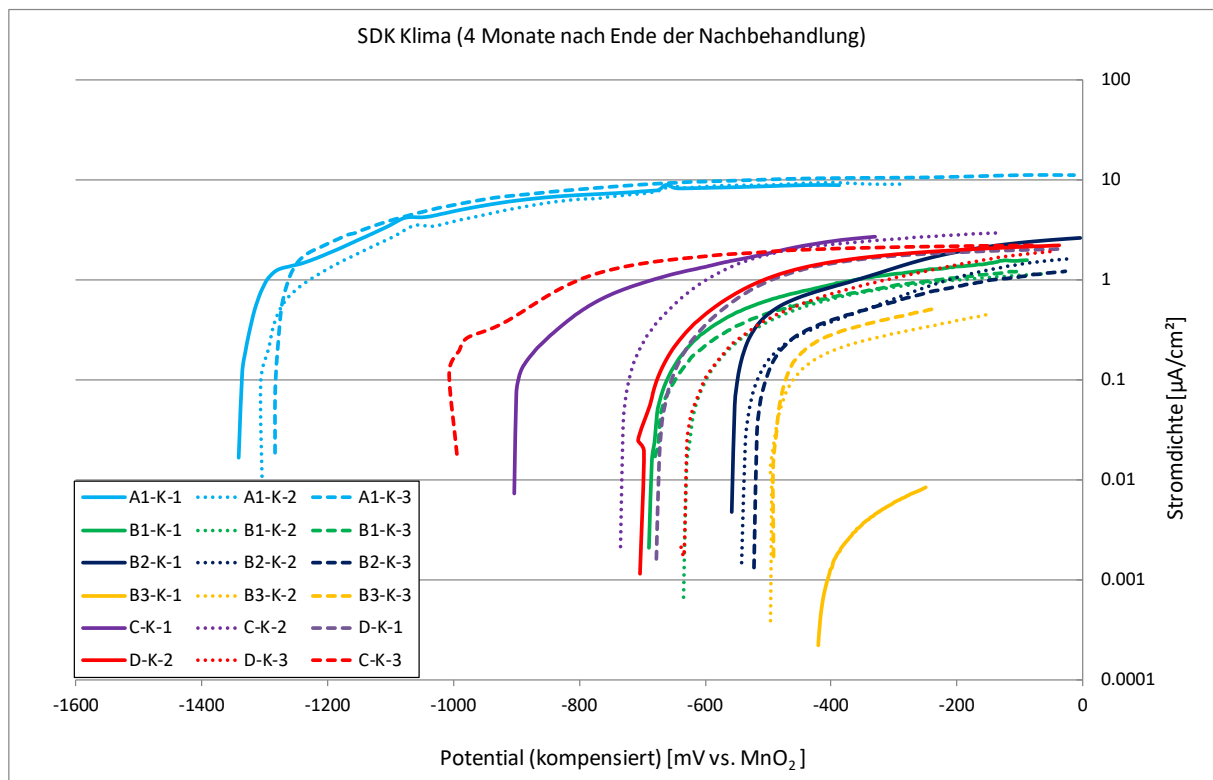


Abb. 52: SPK der Prüfkörper der Serie Klima, 4 Monate nach Ende der Nachbehandlung

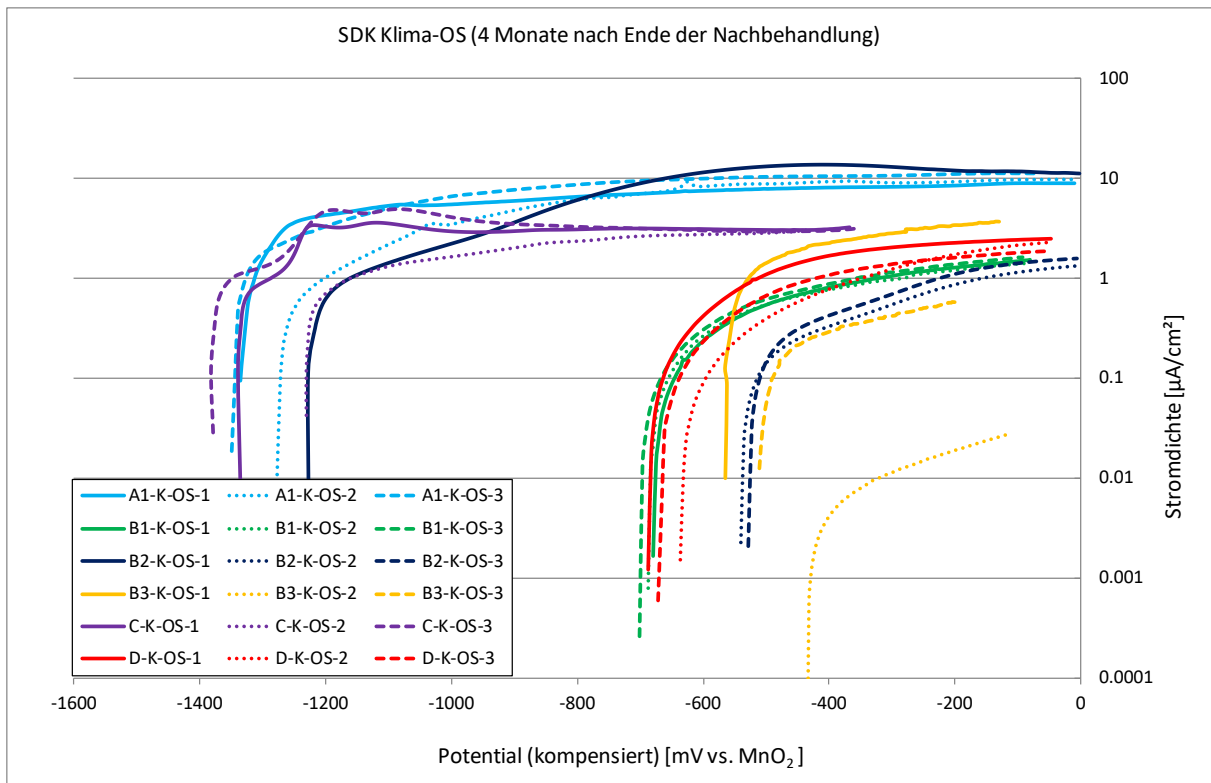


Abb. 53: SPK der Prüfkörper der Serie Klima+OS, 4 Monate nach Ende der Nachbehandlung

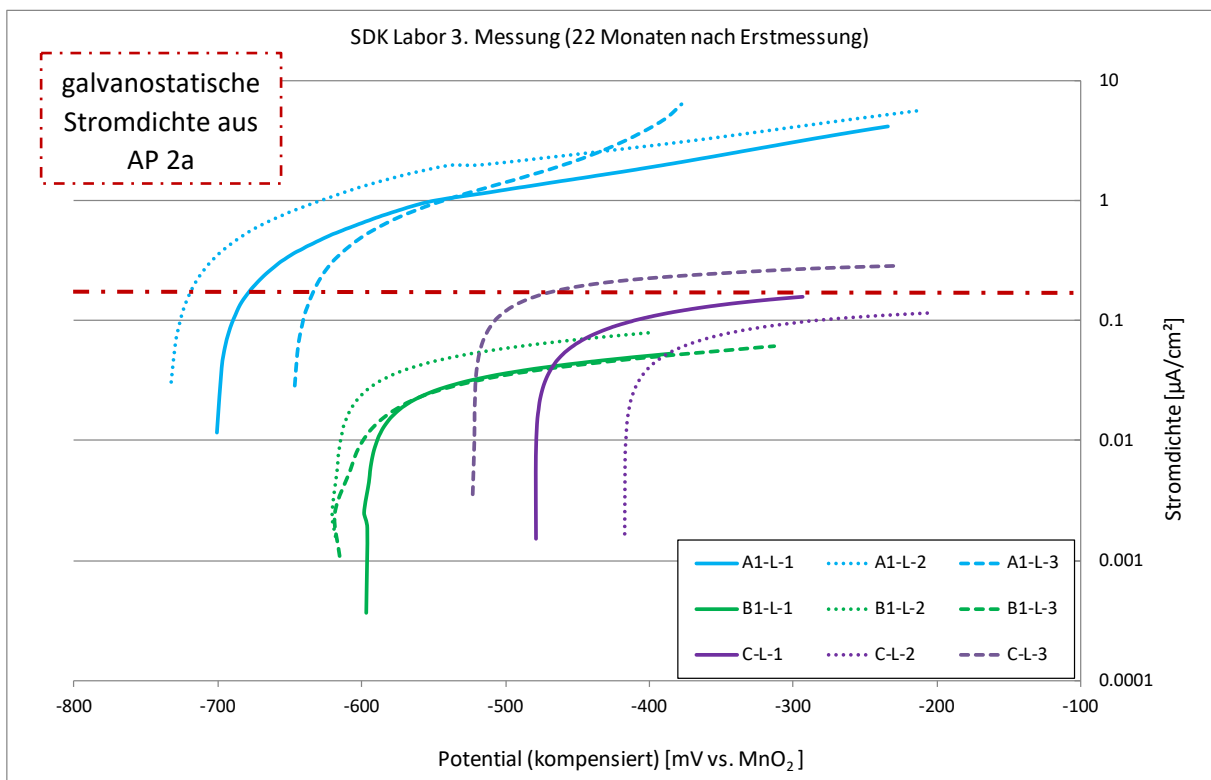


Abb. 54: Ausgewählte SPK der Prüfkörper der Serie L, 22. Monate nach Erstmessung

Die Auswertung der SPK unmittelbar nach Ende der Nachbehandlung, vgl. Abb. 50, zeigt, dass die Systeme A1 und teilweise C, welche auch die negativsten freien Korrosionspotentiale zeigten, hier ebenfalls die höchsten anodischen Grenzstromdichten erreichen. Der horizontale Verlauf der Kurven am Ende des Versuchs weist darauf hin, dass diese auch unter baupraktisch zu erwartenden Polarisierungen erreicht werden können. Ebenso bestätigt sich die Einschätzung, dass nicht alle Systeme als aktiv angesehen werden können, da die Grenzstromdichte von System A1, welche bei ca. $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ anzusiedeln ist, von anderen Systemen teilweise um den Faktor 10 unterschritten wird. Für eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Systeme, hinsichtlich eines abzuschätzenden Schutzstromes, muss hier jedoch berücksichtigt werden, dass die Zinkoberflächen der Systeme sich stark unterscheiden, vgl. Tabelle 1, Seite 10.

Betrachtet man die Entwicklung der Polarisationsseigenschaften 4 Monate nach der Erstmessung, Abb. 51 bis Abb. 53, so ist zu beobachten, dass Anodensystem A1 in allen Fällen die günstigsten Polarisationsseigenschaften aufweist. Generell verbessern sich die Eigenschaften, je feuchter die gewählte Exposition ist. Bei der Lagerung Klima-OS ist die Leistungsfähigkeit des Anodensystems C der von A1 gleichwertig, vgl. Abb. 53. Die gute Performance von B2-Klima-OS-2 scheint hier ein Artefakt zu sein, weil es stark von allen anderen PK des Anodentyps abweicht. Das Ergebnis korreliert mit der Entwicklung der Ruhepotentiale, vgl. Abb. 32, Seite 27. Im Nachgang der Bestimmung der SPK schwenkt die Potentialentwicklung des PK dann auf den allgemeinen Trend der Serien des Typ 2 ein. Unter Laborlagerung kann auch System A1 die guten Polarisationsseigenschaften nicht aufrechterhalten. Der bereits diskutierte Anstieg der freien Korrosionspotentiale geht hier mit einem Absinken der anodischen Grenzstromdichte einher. Die Prüfkörper des Typs B3-L sind bereits zum Zeitpunkt der 2. Messung mit den vorliegenden Messparametern nicht mehr sinnvoll bestimmbar.

Betrachtet man die Ergebnisse der Serie L der Anodentypen A1, B1 und C, die 22 Monate nach der Erstmessung ermittelt wurden, vgl. Abb. 54, fällt der erhebliche Leistungsverlust unter Laborlagerung deutlich ins Auge. Neben den weiter angestiegenen Ruhepotentialen sinken auch die erreichbaren Stromdichten deutlich ab. Die Tatsache, dass die Versuche bei IR-kompensierten Potentialen deutlich unter 0 mV vs. MnO_2 beendet wurden, ist den stark angestiegenen IR-Drops der PK geschuldet. Der Effekt war bei Typ B1 am stärksten ausgeprägt. Betrachtet man die unter AP2a angewandte galvanostatische Stromdichte bezogen auf die SPK, so kann das System A1 ohne signifikante Polarisierung die Stromdichte generieren. Das System C kann dies nur im Fall von einer der drei Proben, bei den anderen beiden Proben wird die theoretische Stromdichte nur durch Polarisierung von mehreren 100 mV in anodische Richtung sichergestellt. Das System B1 ist nach dem Prüfzeitraum nicht in der Lage die angestrebten $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ zu generieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der vorangegangenen AP stehen. Die für eine Feldanwendung günstigsten Polarisationsseigenschaften zeigt Anodensystem A1. Wenn die klimatischen Randbedingungen sich zu feuchteren Expositionen hin entwickeln, weist System C ebenfalls günstige Eigenschaften auf, insbesondere, wenn der Feuchteverlust der PK durch ein OS-System minimiert wird. Im trockenen Klima der Laborlagerung zeigt auch A1 eine deutliche Verschlechterung der Polarisationsseigenschaften, kann aber selbst bei geringer Polarisierung noch Schutzströme generieren und ist ausreichend korrosionsaktiv, was in den vorherigen AP anhand des geringen Polarisationswiderstandes gezeigt wurde. Die Polarisationsseigenschaften der anderen Anodensysteme erscheinen für eine erfolgreiche Anwendung unter allen betrachteten Expositionen fraglich.

3.5 Arbeitspaket 3 (ibac)

3.5.1 Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes

Im dritten Arbeitspaket sollen die Eigenschaften der Einbett- und Ankopplungsmaterialien genauer untersucht werden. Dazu werden Feuchte-Widerstandsbeziehungen und Desorptionsisothermen der Mörtel, unter Verwendung der in Arbeitspaket 1 erzielten Ergebnisse, erstellt.

Da sich durch die Laborversuche nur eine begrenzte Anzahl von Parameterkombinationen abdecken lassen, sollen, um die Ergebnisse der Polarisationsversuche auf eine größere Anzahl baupraktischer Bedingungen zu übertragen, numerische Berechnungen angestellt werden. Unter welchen Bedingungen eine ausreichende kathodische Polarisation der aktiv korrodierenden Bewehrung mittels der hier zu untersuchenden galvanischen Anodensysteme erreicht werden kann, hängt neben deren eigenen Polarisationsverhalten von einer Vielzahl anderer Parameter ab. Dazu zählen insbesondere die Geometrie (Lage der KKS-Anode zur Bewehrung, Bewehrungsgrad, Anteil der depassivierten Bewehrungsoberflächen, mehrlagige Bewehrung, etc.) und der elektrolytische Widerstand des Betons, welcher wiederum durch die Betonfeuchte, aber eben auch durch Betonqualität und das gewählte Bindemittel beeinflusst wird.

3.5.2 Durchführung der numerischen Untersuchungen

Die im Folgenden dargestellten numerischen Berechnungen wurden mittels der FEM Software COMSOL Multiphysics 5.3a durchgeführt. Auf eine detaillierte Darstellung der Grundlagen der numerischen Simulation von Korrosionsvorgängen in Stahlbeton im Allgemeinen sowie von KKS von galvanischen und Fremdstromsystemen im speziellen soll an dieser Stelle verzichtet werden. Diese sind z.B. in /H1, W1, B3/ ausführlich beschrieben. Eine detailliertere Darstellung der im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten numerischen Untersuchungen ist in /H3/ veröffentlicht.

Generell lässt sich festhalten, dass neben den Polarisationsseigenschaften der beteiligten Elektroden die spezifischen elektrolytischen Widerstände und die Geometrie bekannt sein müssen. Die Gewinnung, bzw. Wahl dieser Parameter wird im Folgenden beschrieben.

3.5.2.1 Polarisationsseigenschaften

Für alle Elektroden muss die Stromdichte auf der Elektrodenoberfläche als Funktion des Potentials definiert werden. Diese Eigenschaft wird prinzipiell durch die in AP2b ermittelten SPK beschrieben. Um diese jedoch im numerischen Modell abbilden zu können, wird i.d.R. die so genannte Butler-Vollmer-Gleichung verwendet:

$$i = \frac{i_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{2.3 \cdot \eta}{b_a}\right) - \exp\left(\frac{-2.3 \cdot \eta}{b_{c,0}}\right) \right]}{1 + \frac{i_0}{i_{\text{lim,ox}}} \cdot \exp\left(\frac{2.3 \cdot \eta}{b_a}\right) - \frac{i_0}{i_{\text{lim,red}}} \exp\left(\frac{-2.3 \cdot \eta}{b_{c,0}}\right)}$$

Darin sind i_0 die Austauschstromdichte, b_a und b_c die anodische und kathodische Tafelsteigung, $i_{\text{lim,red}}$ und $i_{\text{lim,ox}}$ die anodischen und kathodischen Grenzstromdichten. Diese Parameter werden durch einen Fit der tatsächlich gemessenen Werte bestimmt. Für die hier dargestellten Ergebnisse wurde als SPK der galvanischen Anode die Eingangsmessung des PK A1-L-2 gewählt, da dieser die günstigsten

Polarisationseigenschaften aufwies und somit geeignet war, die Möglichkeiten der Systeme zu identifizieren. Die zeitliche Entwicklung unter den verschiedenen Klimaten lag zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch nicht vor. Für die aktive- und passive Bewehrung wurden Polarisationseigenschaften gewählt, wie sie bereits zuvor innerhalb von Forschungsvorhaben an Portlandzementbetonprüfkörpern mit und ohne Chlorid Beaufschlagung gemessen wurden.

Eine grafische Übersicht der gewählten Polarisationseigenschaften sowie der Fit-Funktionen gibt Abb. 55. Die Potentialwerte sind bezogen auf die gesättigte Kalomelektrode (SCE) angegeben.

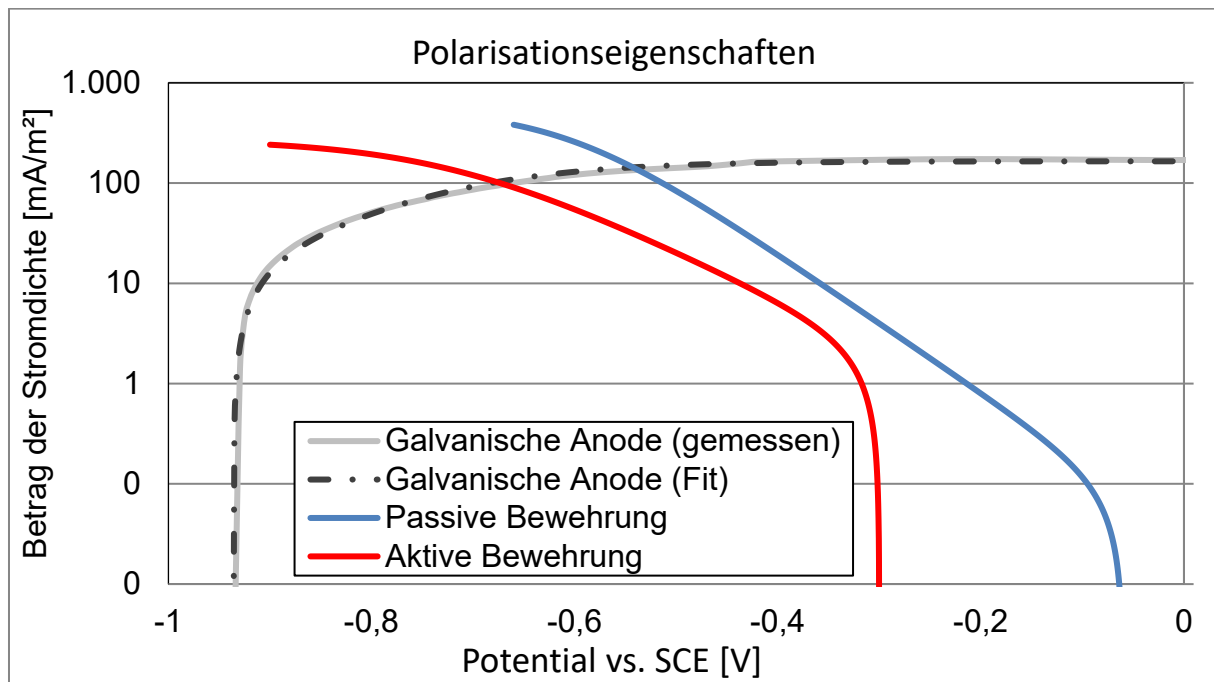


Abb. 55: Für die numerischen Untersuchungen gewählte Polarisationseigenschaften

Eine tabellarische Übersicht über die Parameter der Butler-Vollmer-Gleichung gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Fit Parameter

Elektrode	E_0 in V	i_0 in A/m ²	b_a in V/dec	b_c in V/dec	$i_{lim,ox}$ in A/m ²	$i_{lim,red}$ in A/m ²
Passive Bewehrung	-0,06	0,0000858	0,15	0,1438	1	0,545
Aktive Bewehrung	-0,3	0,002234	0,15	0,202	1	0,273
A1-L-2	-0,936	0,018	0,22	0,18	0,165	1,2

Die dargestellten Werte wurden so gewählt, dass eine bestmögliche Anpassung der Fit-Funktion an die Messwerte erreicht werden konnte. Dabei wurde akzeptiert, dass einige der dargestellten Parameter außerhalb ihrer theoretischen Grenzen liegen. Dies kann z.B. durch nachgelagerte Reaktionen begründet sein, die durch die Butler-Vollmer-Gleichung nicht abgebildet werden können.

3.5.2.2 Elektrolytwiderstände

Für die vorliegende Simulation wurden am Ankopplungsmörtel sowie dem gewählten Beton der Grundprüfkörper Feuchte-Widerstandsbeziehungen sowie Desorptionsisothermen erstellt. Abb. 56 zeigt das prinzipielle Vorgehen bei der Erstellung schematisch.

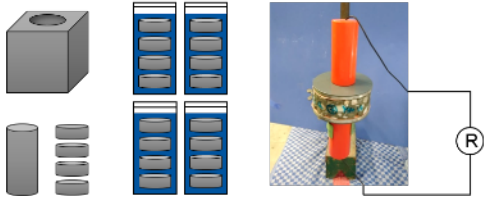
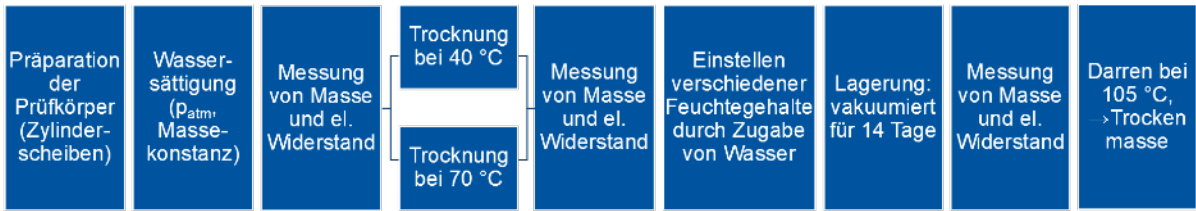


Abb. 56: Methodik zur Bestimmung der für die numerischen Untersuchungen gewählten Feuchte-Widerstandsbeziehungen

Zunächst werden aus Würfel oder plattenartigen Grundprüfkörpern Zylinderscheiben präpariert und bis zur Masse- bzw. Widerstandskonstanz wassergelagert. Der Gefahr einer Auslaugung wird durch ein geringes Flüssigkeitsvolumen um die Proben im Lagergefäß Rechnung getragen. Anschließend werden Masse und Elektrolytwiderstand der PK ermittelt und diese anschließend getrocknet. Nach der Trocknung werden erneut Masse und Widerstand bestimmt und gezielt abgestufte Wassergehalte eingestellt, die Prüfkörper in einer dampfdichten Spezialverpackung vakuumiert und ruhen gelassen. Nach Abschluss der Ruhephase werden letztmals Masse und Elektrolytwiderstand bestimmt, die PK dann bis zur Massekonstanz gedarrt. Die Widerstandsmessungen erfolgten im 2-Elektrodenaufbau mittels Wechselstrommessung bei 1 kHz. Die erhaltenen Absolutwiderstände wurden unter Berücksichtigung der Prüfkörpergeometrie in spezifische Widerstände umgerechnet. Die Ankopplung der Messelektroden erfolgte über so genannte Cardiopads, deren Widerstand über Blindmessungen ermittelt und aus der Auswertung eliminiert wurde. Abschließend wurden alle spezifischen Widerstandswerte auf die absolute Feuchte zum Messzeitpunkt im Verhältnis zur Trockenmasse der PK bezogen dargestellt

Eine grafische Darstellung der Feuchte Widerstandsbeziehungen von Ankopplungsmörtel und Grundbeton gibt Abb. 57.

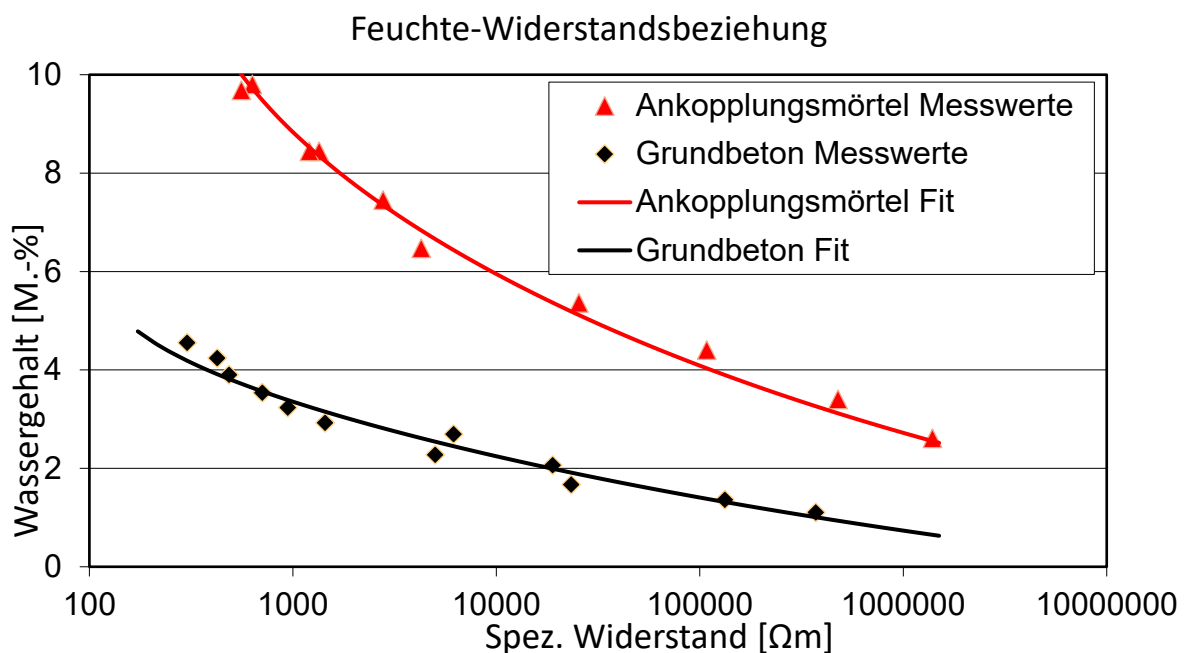


Abb. 57: Für die numerischen Untersuchungen bestimmte Feuchte-Widerstandsbeziehungen

Für die Bestimmung der Desorptionseigenschaften der Materialien wurden Proben zunächst wassergesättigt und anschließend in Exsikkatoren verschiedener Klimate bis zur Massekonstanz eingelagert. Anschließend wurden die zugehörigen Wassergehalte durch Darren bestimmt. Das Desorptionsverhalten der beiden Materialien zeigt Abb. 58.

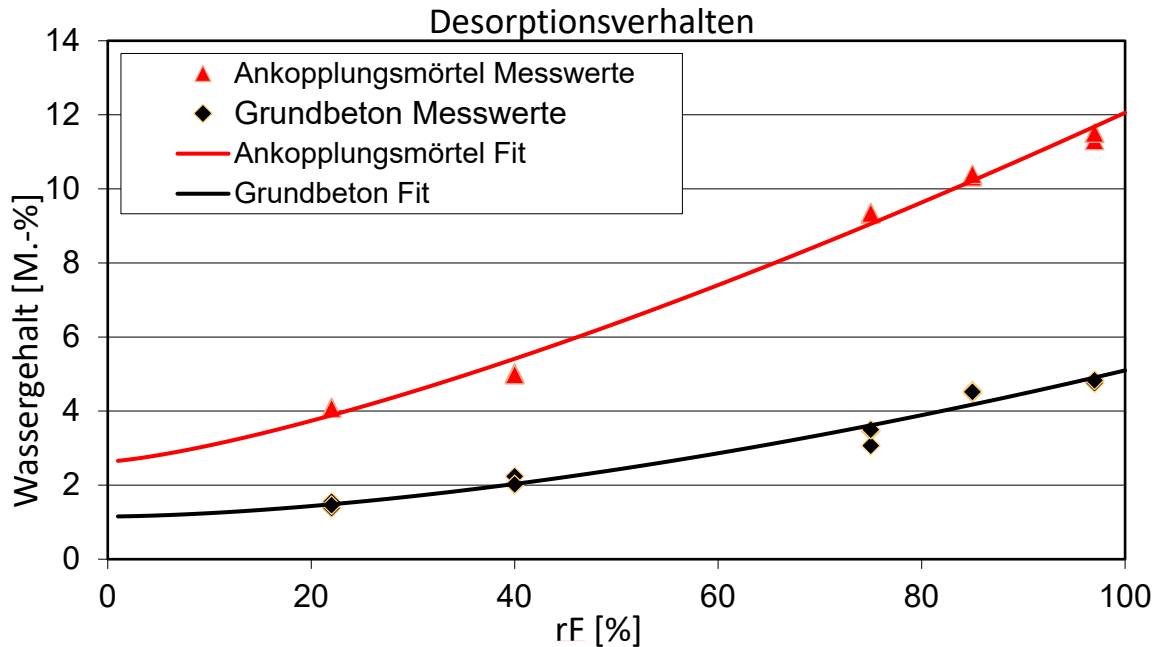


Abb. 58: Für die numerischen Untersuchungen bestimmte Desorptionseigenschaften

Mittels der vorliegenden Daten wurden die zu erwartenden Elektrolytwiderstände unter einer dauerhaften Lagerung bei 65, 75, 85 und 95% rF ermittelt. Die resultierenden Parameter sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Klimaabhängige Elektrolytwiderstände für die numerische Simulation

Relative Luftfeuchte in %	Wassergehalt Einbettmörtel in M.-%	Spez. Widerstand Einbettmörtel in Ωm	Wassergehalt Grundbeton in M.-%	Spez. Widerstand Grundbeton in Ωm	Widerstandsverhältnis
65	7,94	1778	3,10	1585	1,12:1
75	9,06	880	3,62	649	1,36:1
85	10,22	512	4,18	305	1,68:1
95	11,43	345	4,78	173	1,99:1

3.5.2.3 Geometrie

Für die Geometrie wurde ein typischer Anwendungsfall galvanischer Anodensysteme gewählt. Diese werden häufig zur Unterbindung des so genannten Anoden-Ringeffektes nach lokalem Betonersatz eingesetzt. Eine Übersicht über die geometrischen Randbedingungen gibt Abb. 59.

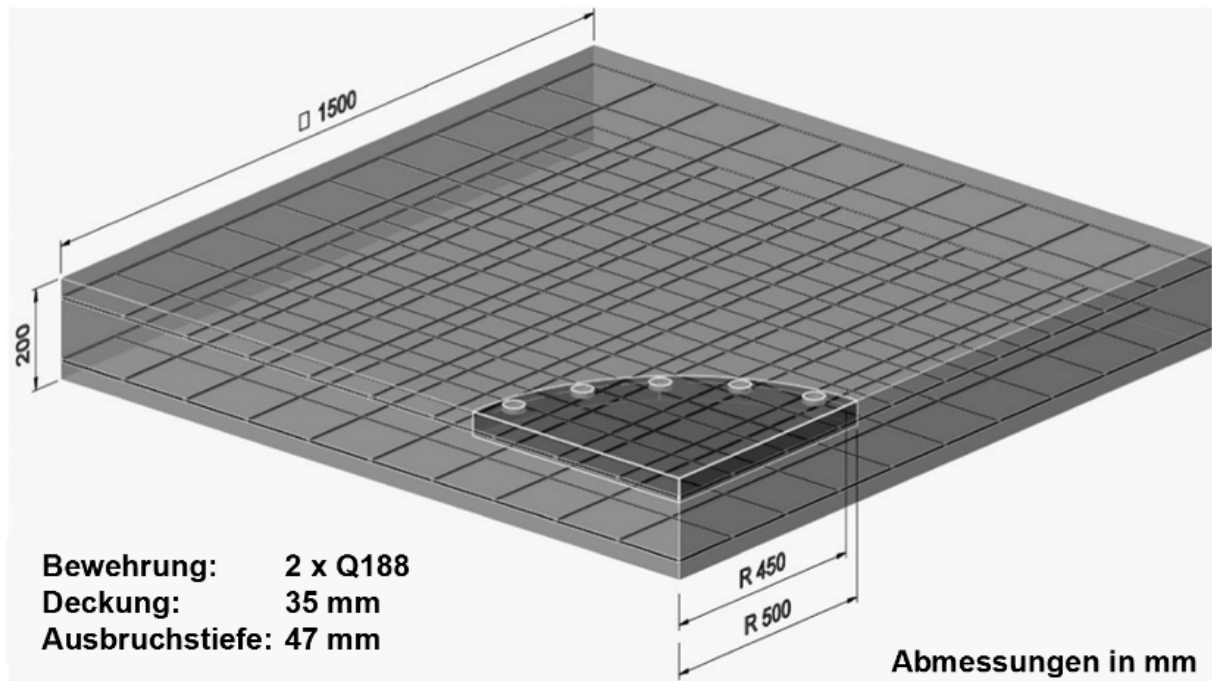


Abb. 59: Für die numerischen Untersuchungen gewählte Geometrie

Die Reparaturstelle hat einen Durchmesser von 1 m, die galvanischen Anoden entsprechen hinsichtlich ihrer Oberfläche ebenfalls Typ A1 und sind innerhalb der Reparaturstelle unmittelbar an deren Rand angeordnet. Die komplette untere Bewehrungslage, sowie die vollständige Bewehrungsoberfläche der oberen Bewehrungslage im Reparaturmörtel, wurden als passiv angenommen. Die komplette obere Bewehrungslage außerhalb der Reparaturstelle wurde als aktiv korrodierend definiert. Daraus resultiert ein pessimales Anoden zu Kathodenverhältnis im Übergangsbereich. Aus Symmetriegründen wurde nur ein Viertel der Platte abgebildet, die Ausdehnung von 3·3 m² ist erfahrungsgemäß ausreichend, um Makroelemente in Stahlbeton abbilden zu können. Die Anzahl der galvanischen Anoden im Übergangsbereich, bzw. deren Abstand zueinander kann innerhalb von Parameterstudien frei variiert werden.

3.5.3 Ergebnisse der numerischen Simulation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation für das Anodensystem A1 vorgestellt. Abbildungen Abb. 60 bis Abb. 63 stellen den Potentialverlauf entlang der Symmetrieachse dar.

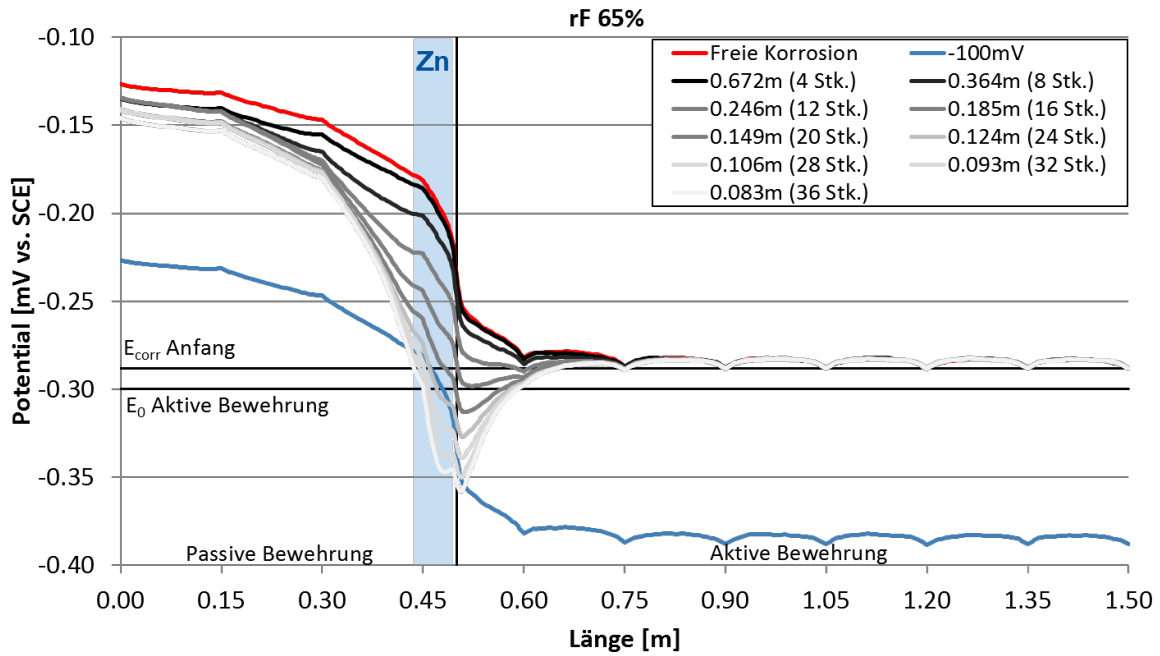


Abb. 60: Potentialverlauf entlang der Symmetrieachse, 65% rF

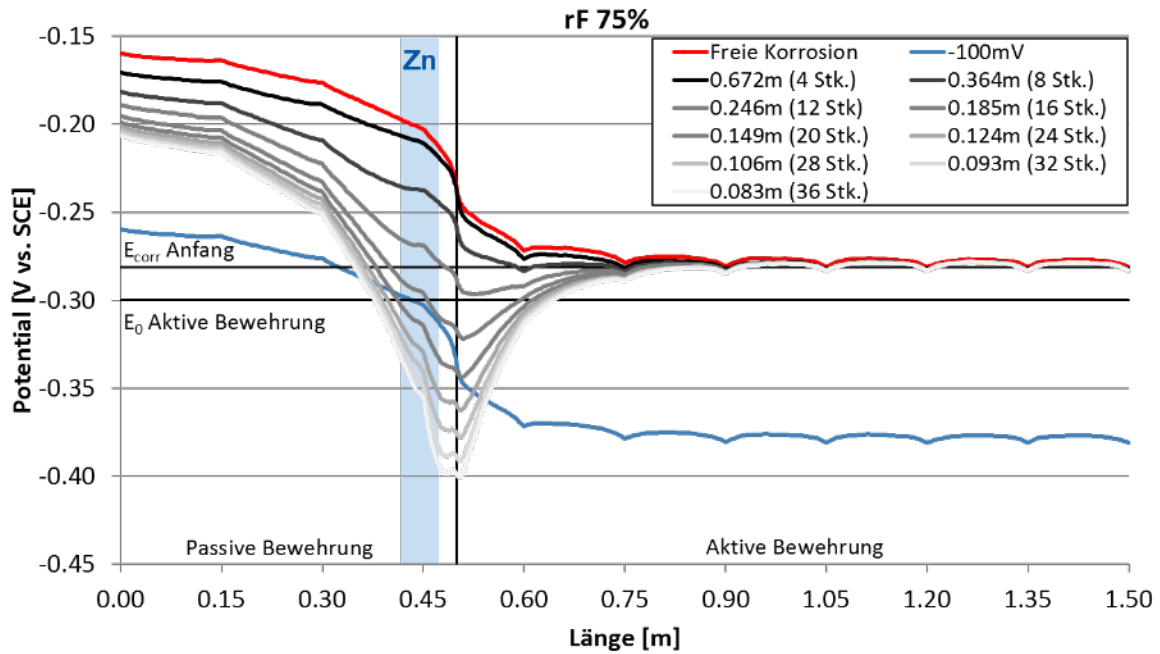


Abb. 61: Potentialverlauf entlang der Symmetrieachse, 75% rF

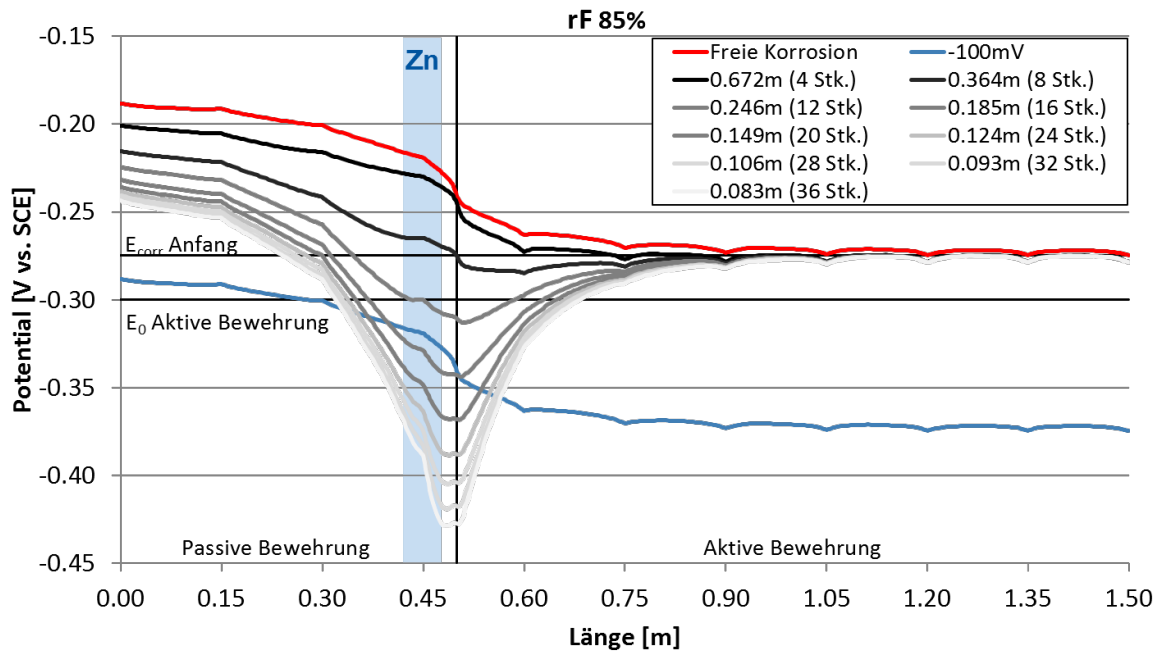


Abb. 62: Potentialverlauf entlang der Symmetrieachse, 85% rF

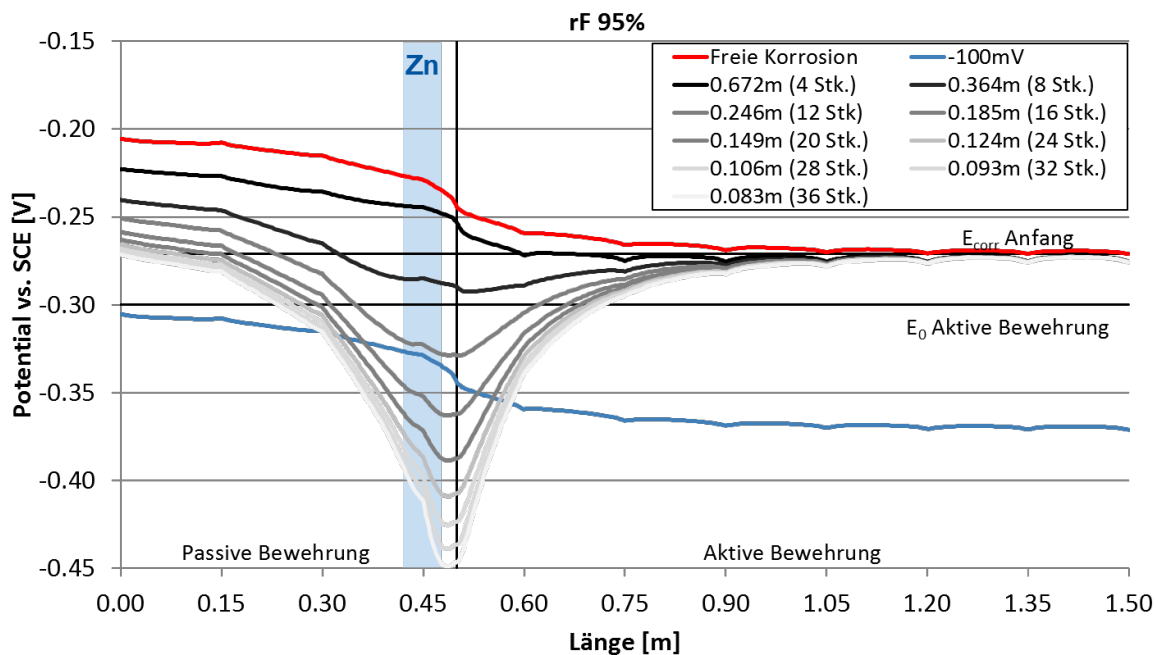


Abb. 63: Potentialverlauf entlang der Symmetrieachse, 95% rF

In den vorstehenden Darstellungen entspricht die rote Linie dem Fall der freien Korrosion. Der Anstieg der Kurve vom rechten Rand des Prüfkörpers, $L=1,5\text{m}$, bis zum Übergang zur Reparaturstelle zeigt die anodische Polarisation durch die neue Kathode im Reparaturbereich und ist somit eine Visualisierung des so genannten Anoden-Ringeffektes, siehe auch Abb. 64.

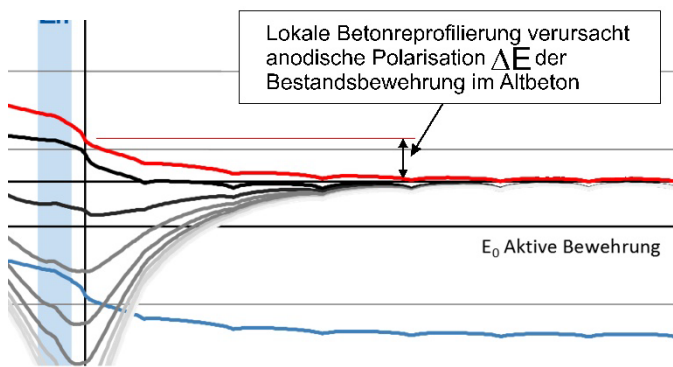


Abb. 64: ΔE infolge anodischer Polarisation - Ringeffekt

In den horizontalen Bereichen am rechten Rand, in größerer Entfernung zur Reparaturstelle, dominiert das Makroelement mit der unteren Bewehrungslage als Kathode. Die Welligkeit der Kurven ist den Flächenverhältnissen an den Kreuzungspunkten der Mattenbewehrung geschuldet. Die blaue Linie ist eine Verschiebung des Potentialverlaufs „freie Korrosion“ um 100 mV in kathodische Richtung. Ihr Unterschreiten kann als eine lokale Erfüllung des 100 mV-Kriteriums nach DIN EN ISO 12696 /N2/ interpretiert werden. Die schwarze Linie bei -0,30 mV visualisiert das freie Korrosionspotential der aktiven Bewehrung. Die weiteren Graphen zeigen den zu erwartenden Potentialverlauf bei schrittweiser Hinzunahme von galvanischen Anoden.

Die Ergebnisse lassen sich hinsichtlich der Erreichung drei verschiedener Schutzniveaus interpretieren.

1. Unterschreitet der Potentialverlauf die Linie E_{corr} -Anfang, so ist bereits die negative Auswirkung des Anodenringeffektes auf die umliegende Bewehrung beseitigt.
2. Ein Unterschreiten der Linie E_0 Aktive Bewehrung zeigt eine vollständige Unterdrückung der Makroelementkorrosion im Bauteil an, so dass lediglich noch von einer erhöhten Eigenkorrosion im betroffenen Bereich auszugehen ist.
3. Unterschreitet der Potentialverlauf die blaue Linie, so wird das 100 mV-Kriterium bereichsweise erfüllt.

Es lässt sich erkennen, dass die Anzahl der benötigten Anoden zur Erreichung der unterschiedlichen Schutzniveaus stark variiert. Ebenso können diese unter feuchteren klimatischen Bedingungen leichter erreicht werden. Der Einfluss des Elektrolytwiderstandes in Abhängigkeit der Bauteilfeuchte hat einen signifikanten Einfluss auf die Ausbildung des Anodenrings und die damit einhergehende Polarisation der Bewehrung außerhalb der Reparaturstelle. Dies wird im besonderen Maße bei der Darstellung der Potentialverläufe bei 65 % rF deutlich. Eine Polarisation der Bestandsbewehrung ist nur bis ca. 25 cm um die Anoden herum möglich.

Neben den Potentialverläufen können auch die Stromdichteverteilungen aus den Simulationsergebnissen extrahiert werden. Diese zeigen die Abb. 65 bis Abb. 68.

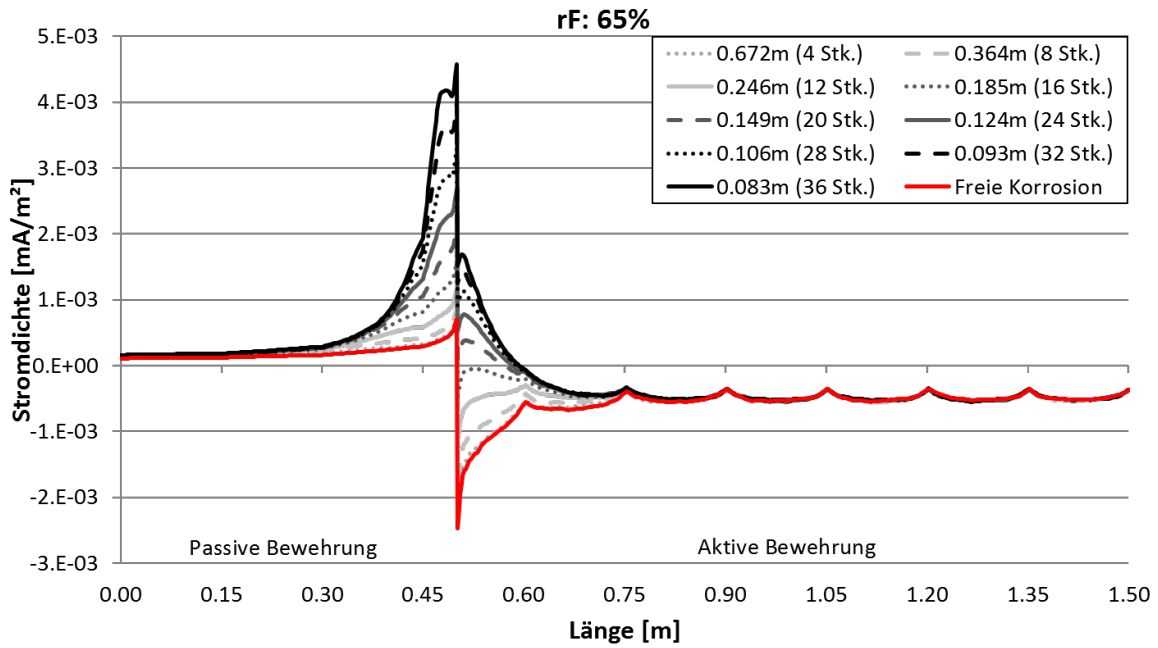


Abb. 65: Stromdichteverlauf entlang der Symmetrieachse, 65% rF

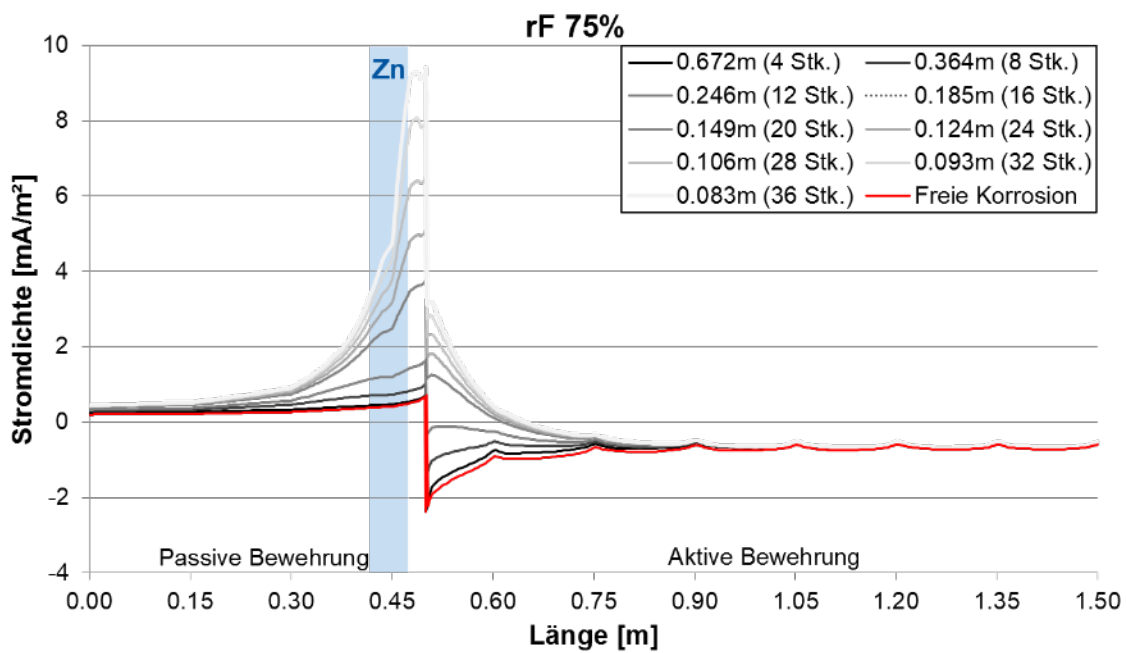


Abb. 66: Stromdichteverlauf entlang der Symmetrieachse, 75% rF

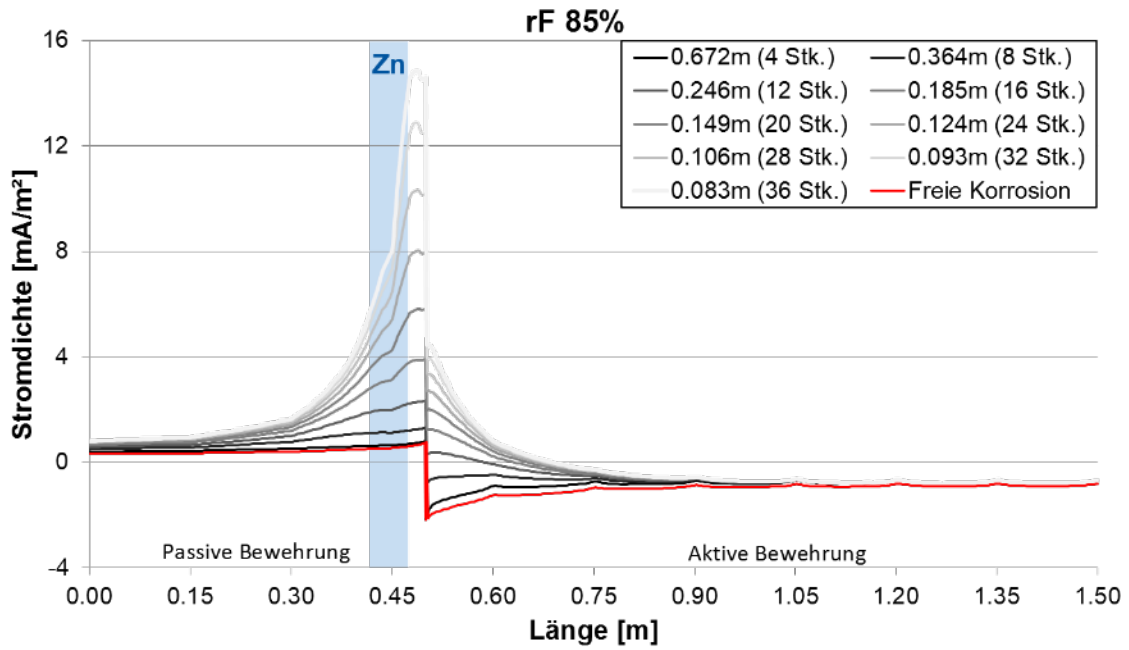


Abb. 67: Stromdichteverlauf entlang der Symmetrieachse, 85% rF

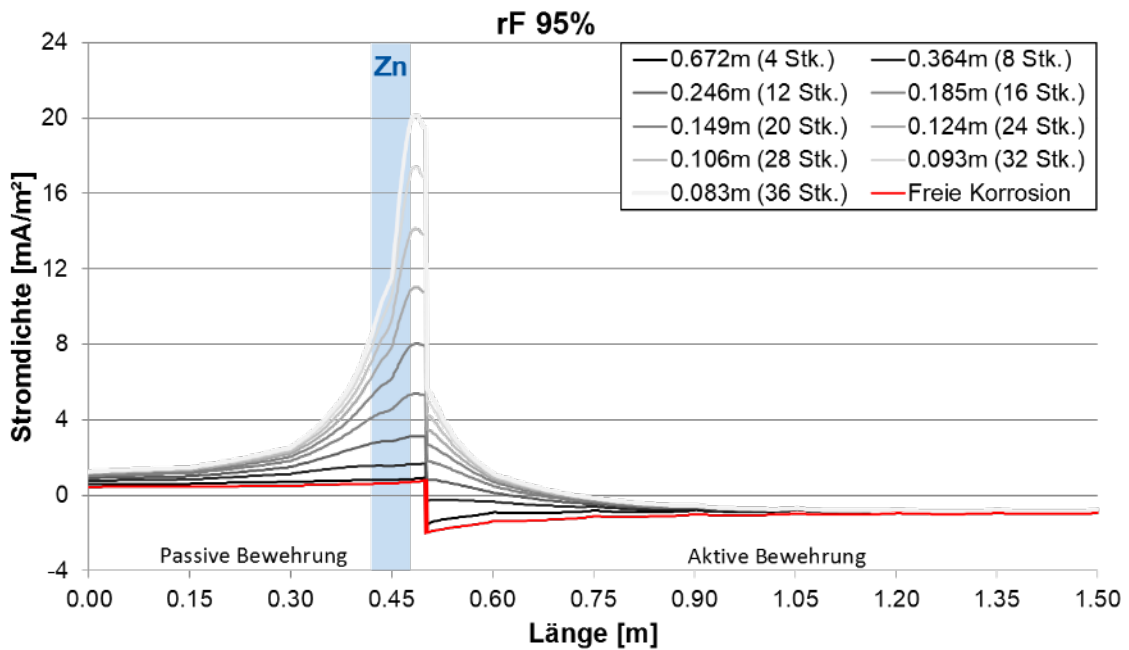


Abb. 68: Stromdichteverlauf entlang der Symmetrieachse, 95% rF

Auch, wenn die Darstellungen der Makroelementstromdichten weniger Information in sich tragen als die Potentialverläufe, kann man daraus Erkenntnisse ziehen. Zum einen zeigt eine Überschreitung der 0-Linie, analog zur obigen Unterschreitung von E_0 Aktive Bewehrung, eine vollständige Makroelementunterdrückung im Randbereich der Anodenanordnung hin zum Altbeton an. Zum anderen kann man aus der Höhe der Stromdichten den jeweiligen Schutzstromanspruch ableiten. Dieser steigt erwartungsgemäß bei feuchterem Klima an. Bei geringen Bauteilfeuchten und daraus resultierenden hohen Elektrolytwiderständen sinkt der Schutzstromanspruch signifikant. Die Änderung des Schutzstromanspruchs zwischen einer Umgebungsfeuchte von 75 % vs. 65 % ist exponentiell und mehrere Dekaden geringer.

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse der Simulation zusammen. Hier sind die drei identifizierten Schutzniveaus „Unterdrücken des Anodenringeffektes“, „Makroelementunterdrückung“ und „100 mV-Kriterium“ hinsichtlich ihrer Erreichbarkeit bei verschiedenen Anodenabständen und Klimaten, so wie ggf. die Reichweite des Effektes angegeben. Die ausgewiesene maximale Lebensdauer ist ein theoretischer Wert und geht von einer vollständigen Zinkauflösung der galvanischen Anode aus. Nicht zielführende Anodenanzahlen, also eine zu geringe Anzahl an Anoden werden in der nachfolgenden Tabelle nicht dargestellt.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Relative Luftfeuchte in %	Unterdrückung des Anodenringeffektes	Reichweite in m für:		Mittlere Anodenstromdichte in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Theoretische Lebensdauer in a^b
		Element- unterdrückung	100 mV- Kriterium		
65	20	0,069	– ^a	0,045	353
	24	0,081	– ^a	0,040	400
	28	0,087	– ^a	0,031	510
	32	0,089	0,006	0,029	549
	36	0,091	0,011	0,036	447
75	12	– ^a	– ^a	0,257	62
	16	0,098	– ^a	0,232	69
	20	0,112	0,004	0,222	72
	24	0,125	0,024	0,227	70
	28	0,136	0,034	0,210	76
	32	0,140	0,041	0,204	78
	36	0,145	0,044	0,188	85
85	8	– ^a	– ^a	0,478	33
	12	0,087	– ^a	0,444	36
	16	0,129	0,004	0,399	40
	20	0,149	0,034	0,379	42
	24	0,162	0,047	0,382	42
	28	0,171	0,058	0,353	45
	32	0,179	0,062	0,340	47
	36	0,184	0,065	0,313	51
95	8	– ^a	– ^a	0,695	23
	12	0,125	0,000	0,643	25
	16	0,166	0,030	0,579	28
	20	0,184	0,047	0,548	29
	24	0,197	0,065	0,545	29
	28	0,210	0,072	0,503	32
	32	0,214	0,078	0,481	33
	36	0,221	0,081	0,444	36

[a] für angegebene Anodenanzahl nicht erfüllt

[b] Annahme vollständiger Zinkauflösung

Die Ergebnisse zeigen, dass der primäre Zweck galvanischer Anoden, die Unterdrückung von Wechselwirkungen im Umfeld lokaler Instandsetzungen, wie der so genannte Anoden-Ringeffekt mit praxistauglichen Anodenanzahlen, bzw. -abständen erreicht werden kann. Für die Makroelementunterdrückung oder gar eine Erreichung der 100 mV- Kriteriums wären deutlich höhere Anzahlen erforderlich und selbst dann bliebe der Effekt auf einen relativ schmalen Bereich um die Reparaturstelle begrenzt. Man kann erkennen, dass die zu erwartenden Korrosionsstromdichten zumindest für die trockeneren Expositionen im Bereich der $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ liegen, für die entsprechend der Ergebnisse aus AP2a von einer dauerhaften Funktionsfähigkeit des hier gewählten Anodensystems A1 ausgegangen werden kann.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis ist anzumerken, dass die Annahme einer vollständigen Depassivierung der Bewehrung im chloridbelasteten Bereich sehr konservativ ist. Dies ist vermutlich der Grund, warum bei Praxisinstallationen häufig zumindest zeitweise das 100 mV-Kriterium dennoch erfüllt werden kann, vgl. dazu auch AP5c. Die Annahme wird im Rahmen dieser Untersuchungen dennoch als gerechtfertigt angesehen, da kein verlässliches Baustellenverfahren zur Quantifizierung der aktiven Bewehrungsoberflächen bzw. der lokalen Korrosionsstromdichten existiert. Ebenso beinhalten die dargestellten Ergebnisse noch keine zeitabhängigen Effekte. Weder Veränderungen der Anodenkinetik, noch hinsichtlich sekundärer Schutzeffekte an der Bewehrungsoberfläche.

3.6 Arbeitspaket 4a (BAM)

3.6.1 Aufgaben und Ziel des Arbeitspaketes

An der BAM werden Proben wie in AP 2 galvanostatisch beansprucht. Die jeweiligen System-Einbettmörtel werden mit einer 9 mm Elektrode aus Reinzink versehen und in Form eines Zylinders betoniert, vgl. Abb. 6. Diese Proben werden nach jeder Beanspruchung und eines damit einhergehenden Verbrauchs einer 3D-Computertomographie unterzogen, um eventuelle Fehlstellen in der Phasengrenze Mörtel/Elektrode, welche durch die anodische Polarisation entstehen können, zu verifizieren. Diese Ergebnisse fließen in die Ergebnisinterpretation der Pulsmessung und EIS ein und ermöglichen es, spezifische Polarisationswiderstände zu ermitteln.

3.6.2 Probekörperdesign, Herstellung und Lagerung

Die Proben wurden wie in Kapitel 2.4 beschrieben durch den Hersteller des Anodensystems C hergestellt und sind in Abb. 69 dargestellt. An der Unterseite befindet sich ein Justiering, der eine wiederhohlgenaue Einspannung der Proben für die CT-Untersuchungen gewährleisten soll. Angaben zum Ankoppelmörtel können nicht gemacht werden.

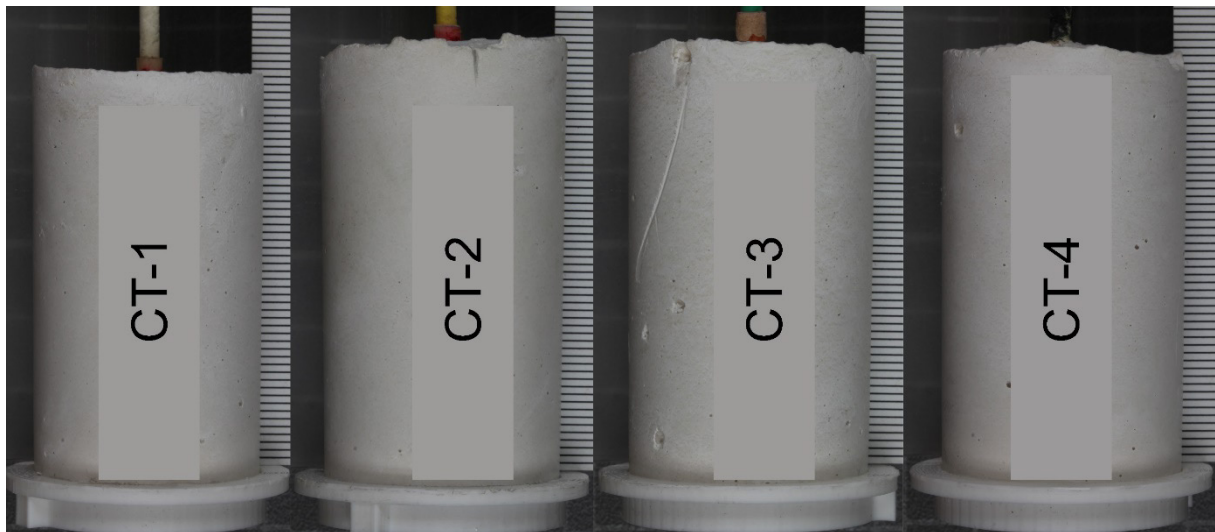


Abb. 69: Darstellung der CT-Proben in Ankoppelmörtel des Anodensystems C

Die Proben wurden während der elektrochemischen Messungen in gesättigter CaOH_2 -Lösung ausgelagert.

3.6.3 Ergebnisse und Zusammenfassung des AP4a

Die CT-Proben wurden einem galvanostatischen Halteversuch unterzogen. Vor Beginn der elektrochemischen Untersuchungen wurden die Proben mittels Computertomographie untersucht und durch die Null-Messung der Ausgangszustand definiert. Im Anschluss daran wurden die Proben in einer Dreielektrodenanordnung in gesättigter Calciumhydroxidlösung galvanostatisch polarisiert. Die Polarisationsstromdichte beträgt für die Schädigungsstufe 1, wie auch bei den Betonproben $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Bei den Schädigungsstufen 2 bis 4 wurde die Polarisationsstromdichte auf $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ erhöht, um signifikante Korrosionserscheinungen zu forcieren. Eine Besonderheit ist die Probe CT3. Diese wurde keinen weiterführenden elektrochemischen Untersuchungen unterzogen. Hier erfolgte nur zum Ende der Halteversuche die Bestimmung des Polarisationswiderstandes, der Strom-Potentialbeziehung und der Korrosionsstromdichte. Die Potentiallage aller Proben liegt trotz höherer Stromdichten während der Polarisation bei ca. -800 mV gegen $\text{Ag}/\text{AgCl sat.}$, siehe Abb. 70 links. Zu

Beginn der Polarisationsuntersuchungen steigt der IR-Drop geringfügig an, siehe Abb. 70 rechts. Anders als bei den Betonproben entkoppelt sich das System während der galvanostatischen Halteversuche nicht.

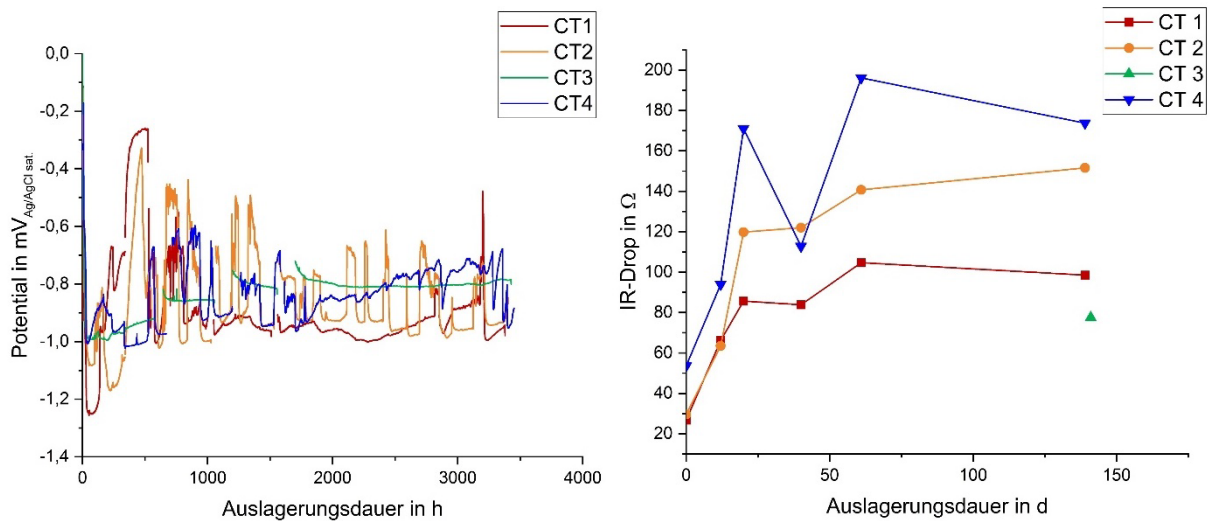


Abb. 70: Potentialverlauf während galvanostatischer Halteversuche der CT-Proben in gesättigter Calciumhydroxidlösung links und rechts die Entwicklung des IR-Drop über den Untersuchungszeitraum

Bei Betrachtung der Strom-Potentialkurven der Proben CT 1 und CT 2 in Abb. 71 ändert sich die Korrosionsaktivität über die Zeit deutlich. Die Probe CT 2 zeigt eine Potentialverschiebung des E_{corr} um ca. 250 mV in anodische Richtung, die Korrosionsrate nimmt ab und der Polarisationswiderstand steigt.

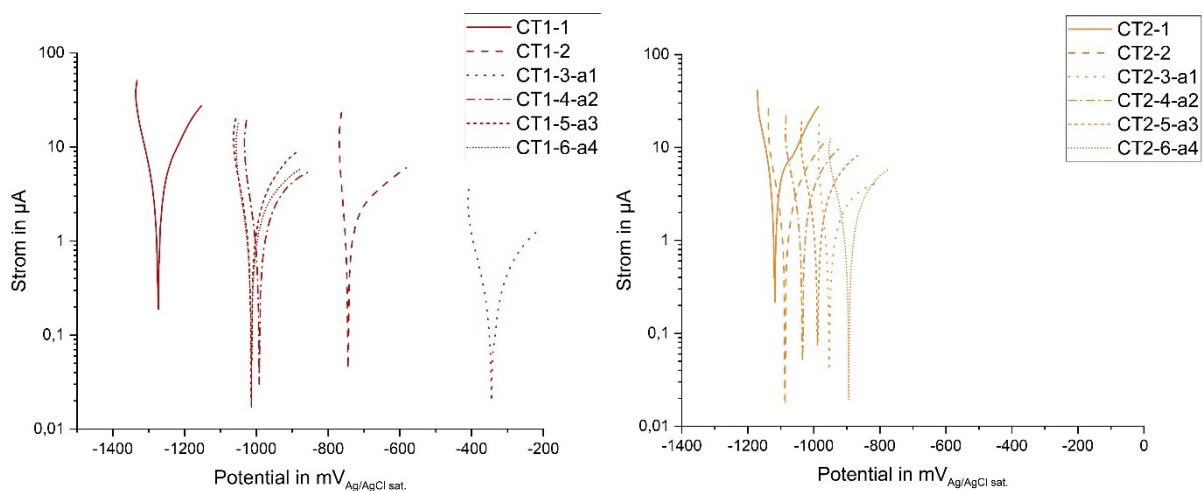


Abb. 71: Strompotentialkurven der Proben CT1 und CT2

Die Proben CT 3 und CT 4 weisen im Vergleich zu CT 1 und CT2 deutlich höhere Polarisationsströme für die Erstellung der Strom-Potentialbeziehung auf, siehe Abb. 72. Die Potentiallage beim Vergleich zwischen CT2 und CT4 hingegen weist keinen signifikanten Unterschied auf. Der Polarisationswiderstand ist jedoch um ein Vielfaches geringer und die Korrosionsstromdichte höher, siehe Abb. 73.

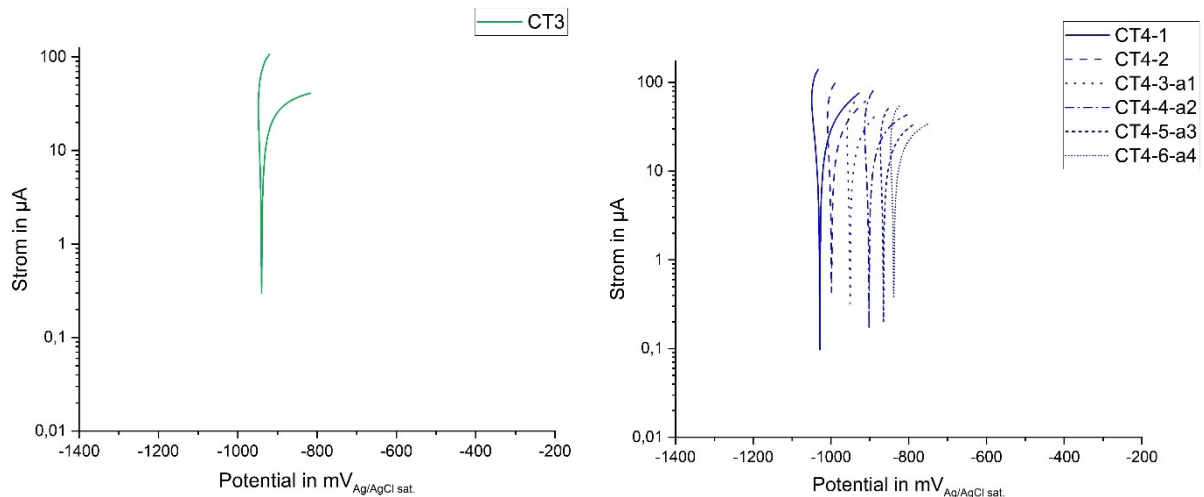


Abb. 72: Strompotentialkurven der Proben CT3 und CT4

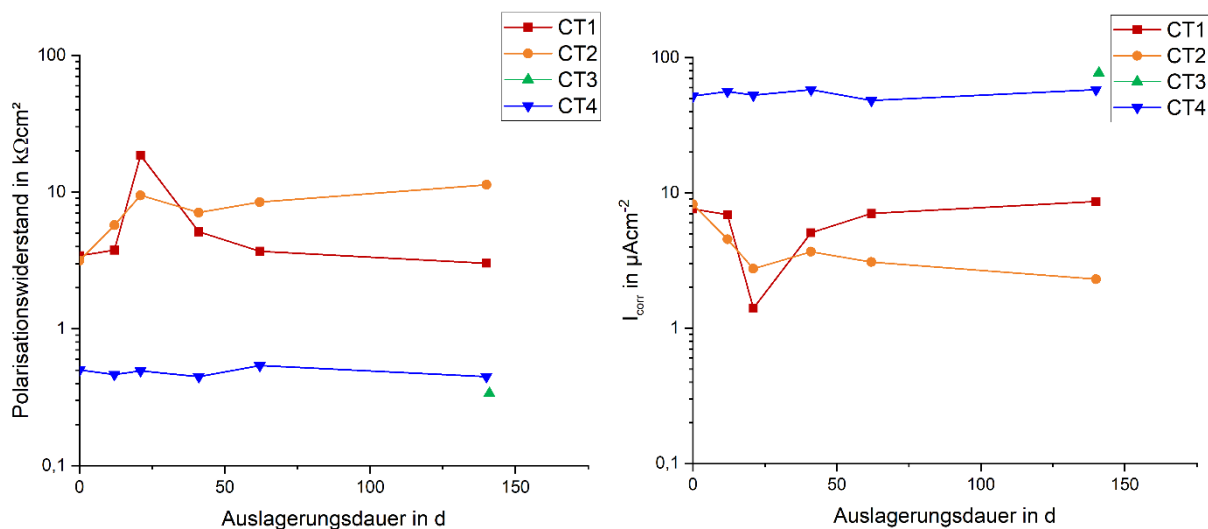


Abb. 73: Polarisationwiderstand der CT-Proben links und Korrosionsstromdichte rechts

Die Diskrepanz der variierenden Korrosionsstromdichten trotz ähnlicher freier Korrosionspotentiale lässt sich anhand der bildgebenden Darstellung aus den CT-Untersuchungen in Abb. 74 erklären. Die Proben CT3 und CT4 weisen flächendeckende Korrosionserscheinungen auf (rot markierte Bereiche in Abb. 74), was auf eine signifikant größere anodisch wirksame Oberfläche schließen lässt. Infolgedessen ist davon auszugehen, dass die kathodisch wirksamen Bereiche einen sehr großen Polarisationwiderstand aufweisen und sich somit ein ähnliches Mischpotential der heterogenen Mischelektrode ausbilden kann. Die Proben CT 1 und CT2 weisen nur eine geringfügige Zunahme an Korrosionsprodukten im Phasengrenzbereich auf. Somit stellt auch die Auslagerung der Anoden in einem wässrigen Elektrolyten keine flächig anodisch wirksame Elektrode sicher. Die computertomographische Untersuchung der Probe CT2 nach der Schädigungsstufe 2 unterlag einer technischen Störung und musste verworfen werden, die kontinuierliche Behandlung der Proben erlaubte keine erneute Messung. Trotz gleichartiger Probenherstellung, -behandlung und -Vorschädigung weisen die Proben signifikante Unterschiede auf, die bei Betrachtung der CT-Rekonstruktionen auf eine teilweise Entkopplung der Probenoberfläche vom Elektrolyten (Ankoppelmörtel) zurückzuführen ist.

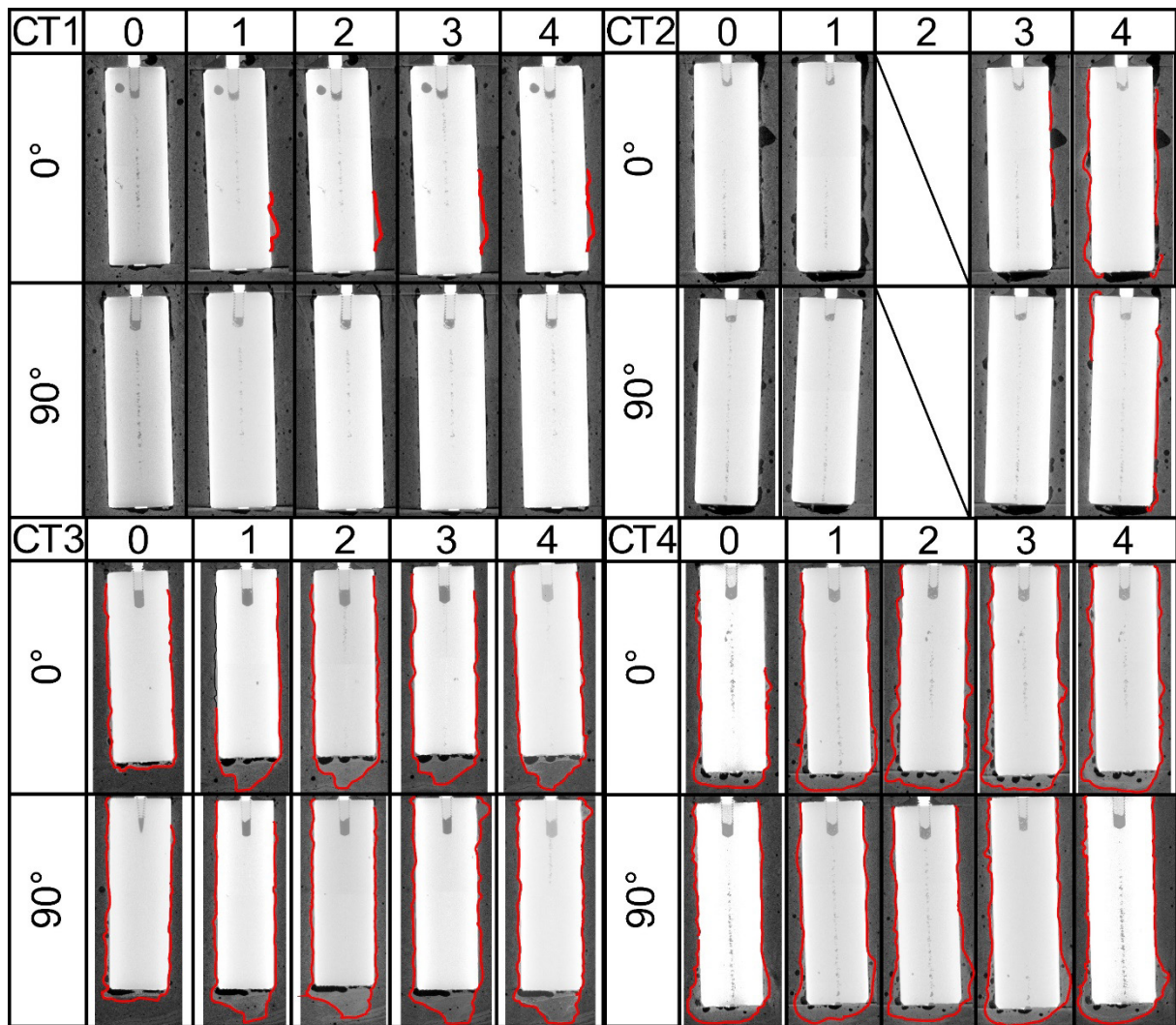


Abb. 74: Darstellung der CT-Rekonstruktion der Proben CT1, 2, 3 und 4 mit Betrachtung bei 0 und 90°, im Nullzustand und nach den Schädigungsstufen 1 bis 4 / mit rot sind Bereiche markiert, die einen Anteil an Korrosionsprodukten aufweisen, Angrenzende Oberflächen gelten als aktiv korrodierend

3.7 Arbeitspaket 4b (ibac)

Gemäß dem ursprünglichen Arbeitsplan sollte ebenfalls untersucht werden, wie sich die Leistung der Anodensysteme durch die anodische Zinkauflösung während des Betriebs verändert. Dazu wurden galvanostatische Halteversuche durchgeführt, die den abzudeckenden Schutzstrombereich der Systeme in einfache Vielfache voneinander unterteilt anfahren sollten, um so später den Einfluss von geflossener Gesamtladung und Höhe der dabei jeweils gewählten Polarisation getrennt voneinander erfassen zu können. Hier gelang es abschließend nicht, eine entsprechende abgestufte Matrix zu etablieren. Ursächlich war hier die generell hohe Spreizung der SPK auch innerhalb einer Prüfkörperserie innerhalb des betrachteten Stromdichtebereiches. Auf Basis der durchgeführten Versuche konnte kein ausreichender Zinkabtrag innerhalb der Projektlaufzeit generiert werden. Die relevanten elektrochemischen Kenngrößen der einzelnen PK variierten auch innerhalb einer Serie bereits vor Versuchsbeginn zu stark, was in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der vorangegangenen AP steht. Die Ergebnisse wurden verworfen.

3.8 Arbeitspaket 5a (BAM)

3.8.1 Aufgaben und Ziel des Arbeitspaketes

Im Arbeitspaket 5a werden an zwei ausgewählten Systemen die Elementstromverteilung an großformatigen Probekörpern ermittelt. Hierzu werden Platten umgerüstet, in denen die Anodensysteme zentrisch eingebettet werden und die Polarisationsströme der jeweiligen Ringe gemessen werden, ohne das Element elektrisch auftrennen zu müssen. Die jeweiligen Ringe werden automatisiert und an beiden Platten gleichzeitig über ein Null-Ohm-Amperemeter (ZRA) geschleift und der Strom gemessen. In der Platte sind drei Bezugselektroden sowie eine Multiringelektrode eingebettet. Die Platten werden über ein Remotesystem ferngesteuert geschaltet. Die Software und die zugehörige Hardware wurden hierfür in der BAM entwickelt (Abb. 75).

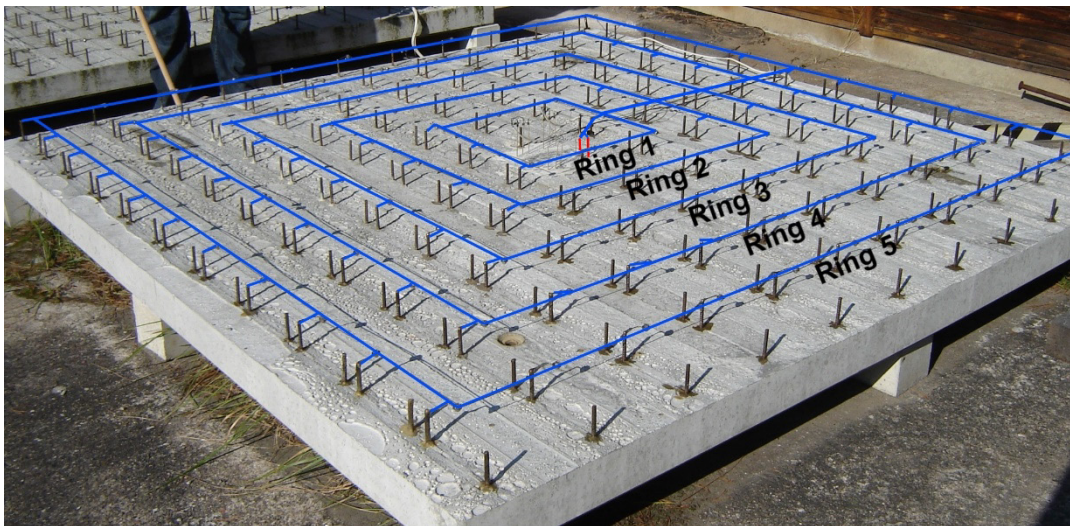


Abb. 75: Darstellung der Platte mit den Ringen

Weiterhin sollten auch Versuche, die im AP 6 des ibac beschrieben sind, an diesen Platten durchgeführt werden. Ein Fremdstrombetrieb erfolgt aufgrund der nicht vorhandenen Hybriden Systeme nicht.

3.8.2 Probekörperdesign, Herstellung und Lagerung

Die Anodensysteme wurden in freigestemmt Taschen eingebettet. Hierzu wurden die freigestemmt Oberflächen mit Druckluft gereinigt, befeuchtet und SikaTop ES104 eingebracht, siehe Abb. 76. Die Anoden wurden in diesen eingebettet. Die Bereiche wurden im Nachgang mit einer Folie abgedeckt, eine weitere Nachbehandlung erfolgte nicht. In die Taschen wurden jeweils zwei Anoden der jeweiligen Systeme eingebettet, wobei nur eine mit der ringförmig angeordneten Bewehrung kurzgeschlossen wurde.

Die Platten wurden im Jahr 2007 hergestellt. Die Betonrezeptur ist Tabelle 6 zu entnehmen. Platte 1 ist unter Verwendung eines CEM I ohne Zusatzstoffe hergestellt worden und die Platte 2 unter Reduktion der Zementmenge und Zugabe von Steinkohlenflugasche (SFA). Die Variation in der Bindemittelzusammensetzung soll den Elektrolytwiderstand dahingehend beeinflussen das die Platte 2 einen größeren Elektrolytwiderstand aufweist. Die Menge des Zugabewassers bleibt infolge der anteiligen Anrechenbarkeit der SFA gleich, die Zugabe an Fließmittel (FM) reduziert sich bei der Platte 2 aufgrund der Auswirkung der SFA-Zugabe auf die rheologischen Eigenschaften des Betons. Somit ist die Konsistenzklasse des Betons ebenfalls vergleichbar gewesen. Der in der Tabelle hinterlegte Elektrolytwiderstand wurde an verschiedenen Stellen der Platte unter Verwendung eines Elektrolytwiderstandsmessgerätes, ähnlich einer Wenner-sonde, der Firma Proceq vom Typ Resipod ermittelt.

Tabelle 6: Betonrezeptur der großformatigen Platten

	Rezeptur Platte 1	Rezeptur Platte 2
Zement	CEM I 42,5 R 370 kg	CEM I 42,5 R 340 kg
Zusatzmittel	FM 28 1,2% (BASF)	FM 28 0,8 % (BASF)
Zusatzstoff	-	SFA 50 kg/m ³
W/Z-Wert	0,48	0,48
Sieblinie	AB 16	AB 16
Elektrolytwiderstand 2022	112 Ωm	350 Ωm

Die Kathoden zu Anoden Verhältnisse sind in Abhängigkeit der verwendeten Anodensysteme in Tabelle 7 dargestellt. Der Unterschied der beiden Anodensysteme hinsichtlich des Flächenverhältnisses ist signifikant. In Abb. 76 links ist die Anordnung der Ringe und die Dimensionen der jeweiligen Platte aufgeführt.

Tabelle 7: Kathoden zu Anoden Verhältnis an den großformatigen Platten unter Verwendung der Anodensysteme A1 in Platte 1 und C in Platte 2

	Platte 1 cm ²	Platte 2 cm ²	Kathode/Anode Pl1 cm ²	Kathode/Anode Pl1 cm ²
Anodenfläche	35	272		
Ring 1	430	430	12	1,6
Ring 1+2	1290	1290	37	4,7
Ring 1+2+3	2581	2581	74	9,5
Ring 1+2+3+4	4302	4302	123	16
Ring 1+2+3+4+5	6454	6454	184	24

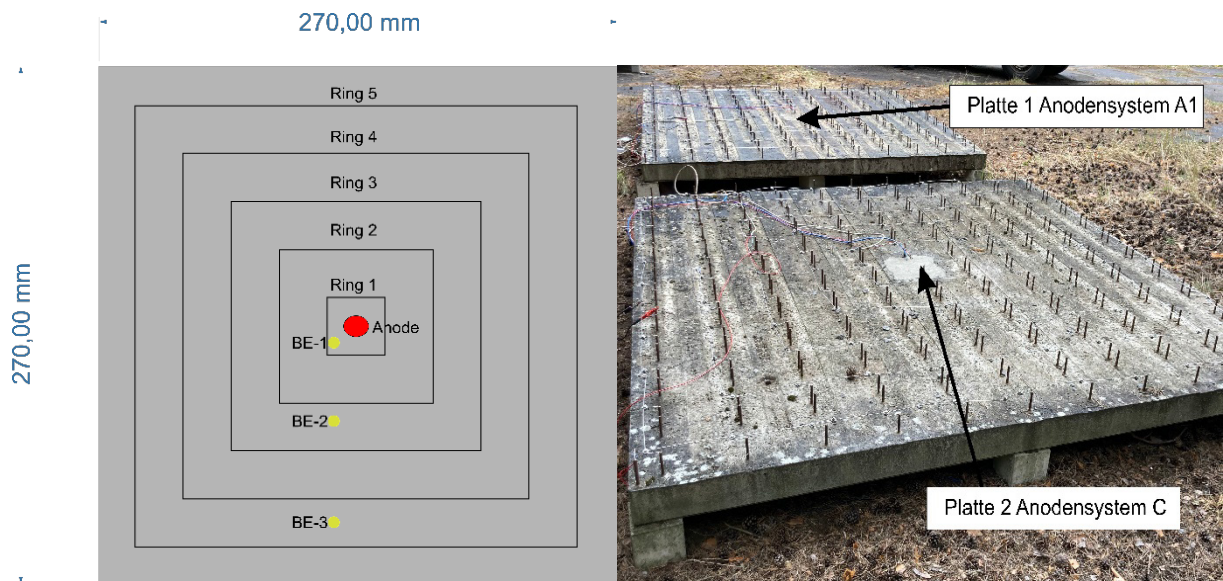


Abb. 76: Anordnung der Anoden und der ringförmigen Bewehrung sowie der Bezugselektroden vom TYP ERE 20 links und rechts die Photographie der Platten mit den frisch eingebetteten Anodensystemen A1 in Platte 1 und C in Platte 2

3.8.3 Ergebnisse und Zusammenfassung des AP5a

In Abb. 77 sind die gemessenen Potentiale nahe der Anode sowie die zugehörigen Elementströme dargestellt. Das in Platte 1 verbaute Anodensystem hat bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes ein geringfügig positiver werdendes Anodenpotential, deutlicher zeichnet sich dies bei der Potentialfeldmessung in Abb. 78 ab. Der Potentialtrichter, hinsichtlich der Polarisation des ersten Rings, ist jedoch über den Untersuchungszeitraum vergleichbar und ist in Abb. 79 zu erkennen. Der Elementstrom streut über den Untersuchungszeitraum und liegt zum Ende des Untersuchungszeitraumes zwischen -250 und -500 μA , siehe Abb. 77. Das entspricht für das Anodensystem A1 einer anodischen Stromdichte in Höhe von ca. 7-14 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Der Zeitraum von Kurzschluss bis ca. 14 Tage nach Kurzschluss des Systems, beschreibt eine Aktivierung des Anodensystems. Das Mischpotential im Nahbereich der Anode wird in diesem Zeitraum deutlich negativer und der Betrag des Elementstromes, resultierend aus Kurzschluss zwischen Anoden und allen Ringen, steigt signifikant an.

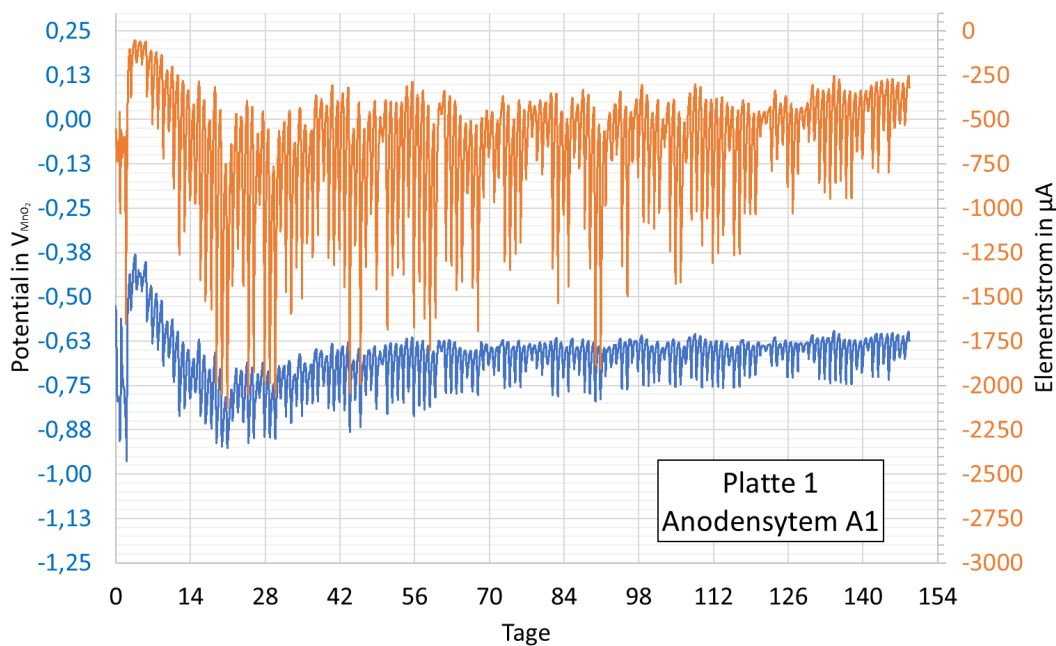


Abb. 77: Elementstrom und Mischpotential in Anodennähe an Platte 1 mit Anodensystem A1

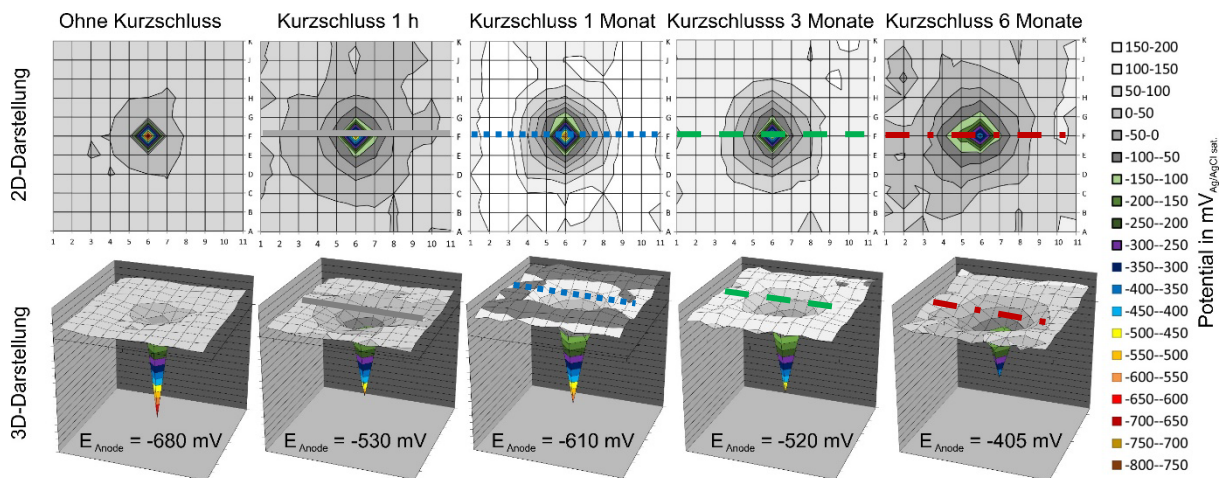


Abb. 78: wiederkehrende Potentialfeldmessung an Platte 1 mit Anodensystem A1, Darstellung in 2- und 3D, Linien in der Mitte der kurzgeschlossenen Darstellungen sollen den Bereich in der Mitte der Platte für Abb. 79 verdeutlichen

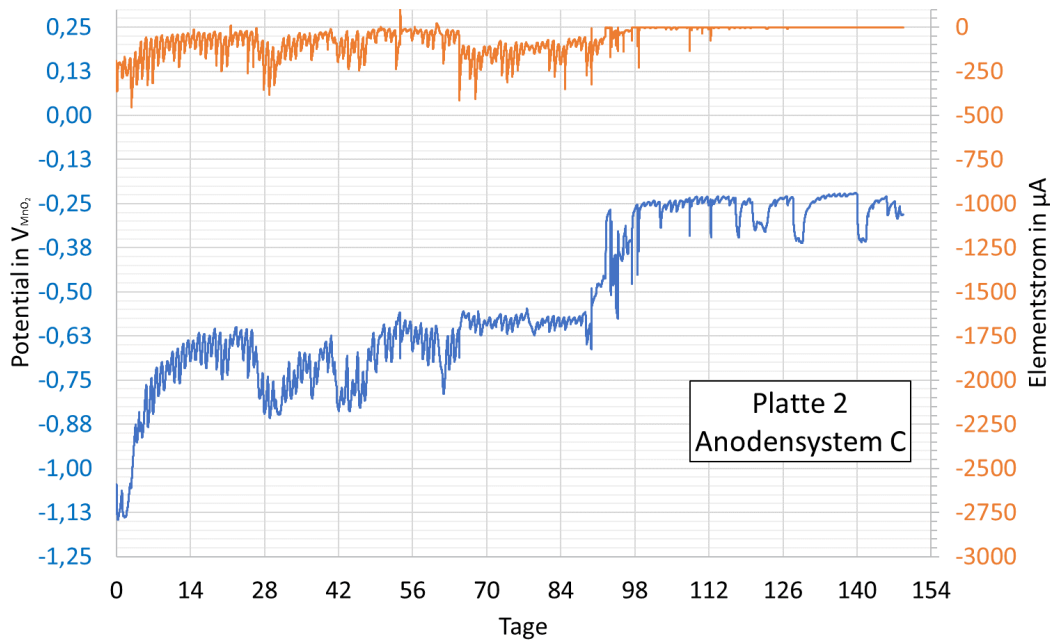


Abb. 80: Elementstrom und Mischpotential in Anodennähe an Platte 2 mit Anodensystem C

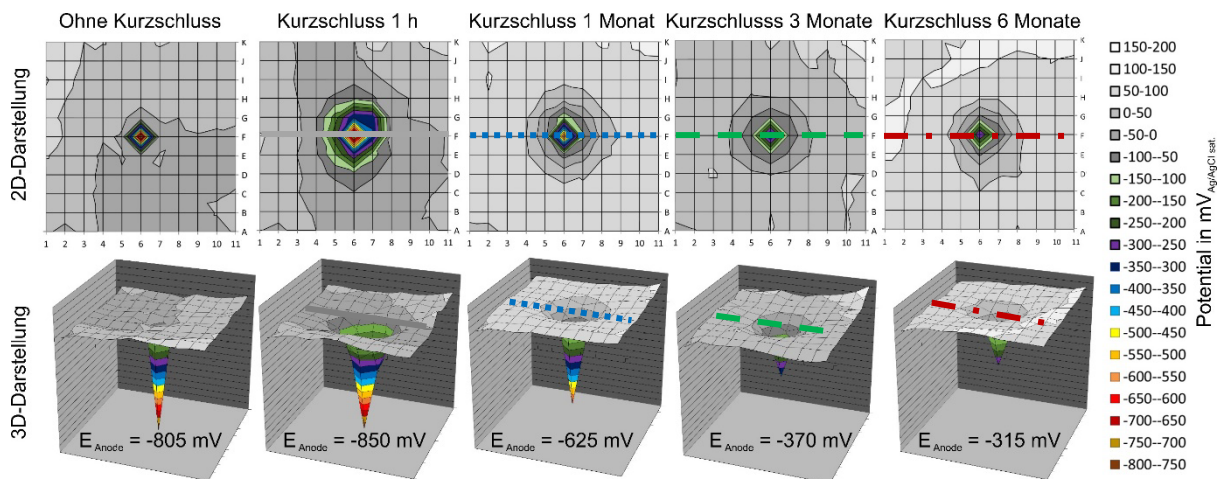


Abb. 81: wiederkehrende Potentialfeldmessung an Platte 2 mit Anodensystem C, Darstellung in 2- und 3D, Linien in der Mitte der kurzgeschlossenen Darstellungen sollen den Bereich in der Mitte der Platte für Abb. 82 verdeutlichen

In Abb. 82 sind die Potentialverläufe in der Mitte der Platte 2 unter Verwendung des Anodensystems C aufgetragen, dies entspricht der Achse F in Abb. 81. In dieser Darstellung ist ebenfalls ersichtlich, dass das Anodenpotential über den Untersuchungszeitraum deutlich ansteigt. Das Potential des ersten Ringes ist anders als bei Platte 1 nicht über den gesamten Untersuchungszeitraum identisch. Ein deutlicher Unterschied ist zwischen 1 h nach Kurzschluss und 1 Monat zu erkennen. Hier wird das Potential an Ring eins um ca. 200 mV positiver. Unabhängig von Feuchtegradienten steigt das Potential an Ring eins zwischen einem und Beginn des 6. Monats weiter an, das ΔE beträgt hier ca. 100 mV. Die Potentiallagen der Ringe 2 und 3 variieren hingegen und sind, ebenso wie an Platte 1 nicht zwangsläufig auf den Elementstrom zurückzuführen. Hier wirken sich vielmehr oberflächennahe Feuchtegradienten aus, die die Potentialfeldmessung beeinflussen können. Dies bestätigt sich beim Vergleich der Potentialverläufe nach einem und drei Monaten des Untersuchungszeitraumes. Ein gesicherter Wirkungsbereich im Sinne einer Mindestpolarisation von ca. 100 mV, unter Berücksichtigung des hier vorliegenden Elektrolytwiderstands, scheint nur bis zu einem Radius von ca. 25 cm, ausgehend von der Anode (Plattenmitte), gegeben zu sein. Die Polarisation des Rings 2 ist mit 25 bis 50 mV zu gering.

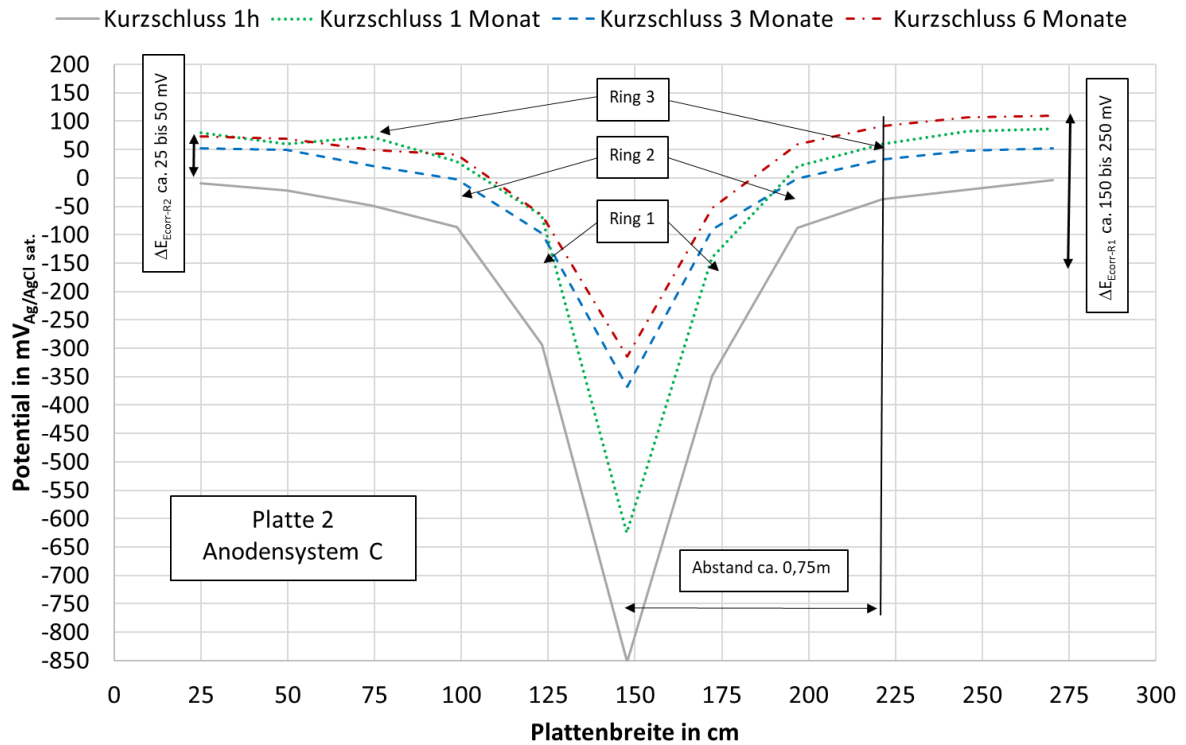


Abb. 82: Potentialeverlauf in der Mitte der Platte 2 im kurzgeschlossenen Zustand über den Untersuchungszeitraum

Zusammenfassend kann festgehalten werden dass der Elektrolytwiderstand bei der Auslegung der Anodensysteme zwingend zu berücksichtigen ist. Eine signifikante Polarisation der umliegenden Bewehrung ist von diesem ebenso abhängig wie von der vorliegenden Treibspannung zwischen Anode und Bewehrung. Es ist davon auszugehen, dass niedrigere Potentiale der Bewehrung geringere Treibspannungen und daraus resultierend auch geringere Elementströme generieren. Dabei ist jedoch der Polarisationswiderstand, im speziellen der kathodische Polarisationswiderstand der Bewehrung, nicht zu vernachlässigen. Wird bzw. ist dieser vergleichsweise klein, kann dies zu einem Anstieg des Elementstromes führen.

Für das Anodensystem A1 konnte über den Untersuchungszeitraum ein ausreichend hoher Elementstrom gemessen werden. Das System war nach einer Nutzungsdauer von 153 Tagen aktiv. Für das verwendete Anodensystem C konnte nur bis zu einer Nutzungsdauer von 98 Tagen ein Elementstrom gemessen werden, der Wirkungsbereich des Anodensystems war jedoch nur halb so groß wie der des Anodensystems A1.

3.9 Arbeitspaket 5b (ibac)

Am ibac sollten die Wechselwirkungen zwischen Einbett- bzw. Ankopplungsmaterial und restlichem Beton untersucht werden. Also beispielsweise, wie sich die Vorbelastung des Altbetons durch Chloride oder Karbonatisierung auf die Wirkungsweise des Anodensystems auswirkt und welchen Einfluss das auf das aktivierende Material um die Anoden hat.

Die Anodentypen A1, A2, C und D werden in bereits erhärtetem Einbettmörtel geliefert, vgl. Abb. 3 bis Abb. 5, Seiten 10 bis 11. Als Ankopplungsmaterial wurde in allen Fällen Sika Top ES 104 verwendet, die relevanten Eigenschaften wurden in den Abschnitten 3.1 und 3.5 berichtet. Die Bestimmung von Diffusionskoeffizienten oder Feuchtwiderstandsverhalten am festen Einbettmörtel der gelieferten Anodentypen war nicht möglich.

Die Anodentypen B2 und B3 sind für den Bohrlocheinbau bestimmt und können somit auch direkt in den Bauwerksbeton integriert werden. Von daher sind die oben genannten Materialeigenschaften und Interaktionen grundsätzlich von Interesse. Das Einbettmaterial wurde in Kartuschen geliefert. Es wurden Versuche zur Bestimmung des Feuchtwiderstandsverhaltens unternommen. Allerdings zeigten die pastösen Materialien kein erkennbares Erhärtungsverhalten. Vielmehr trockneten die Materialien an der Luft unter erheblichem Schwinden aus. Sie wiesen keine Eigenfestigkeit auf und rissen bei der atmosphärischen Trocknung vielfach. Verwertbare Messungen zum Feuchtwiderstandsverhalten gelangen nicht. Die geplanten Versuche zu den Diffusionseigenschaften wurden verworfen, da keinerlei Aussicht auf Erfolg bestand.

3.10 Arbeitspaket 5c (ibac)

3.10.1 Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes

Neben den anderen Arbeiten des fünften Arbeitspaketes sollten parallel an einem durch chloridinduzierte Korrosion gefährdeten Praxisobjekt ausgewählte Systeme auf Testflächen eingebaut und in Betrieb genommen werden. Diese sollen Praxiswerte liefern, welche später mit dem zu erarbeitenden Modell abgeglichen werden.

3.10.2 Umsetzung eines Demonstrators

Durch Vermittlung von PA-Mitgliedern ist es innerhalb der Projektlaufzeit gelungen, eine geeignetes Anwendungsobjekt zu finden und die Erlaubnis des Bauherrn für die Installation der Anodensysteme und einer entsprechenden Messtechnik zu erhalten. Der Demonstrator steht am Gymnasium der Stadt Baesweiler bei Aachen. Hier wurden Stützen im Bereich eines Umgangs saniert. Drei Stützen wiesen chloridinduzierte Korrosion am Stützenfuß auf. Zusätzlich sollte aufgrund von brandschutztechnischen Anforderungen eine Zusatzbewehrung mit anschließender Spritzbetonschale installiert werden. Zwei der instanzzusetzenden Stützen eignen sich als Demonstrator. Bei der 3. Stütze war eine Epoxidharzbeschichtung zwischen Alt- und Spritzbeton vorzusehen, um eine Rückdiffusion von Chloriden zu vermeiden. Es wurde auf Basis der zum Installationszeitpunkt vorliegenden Ergebnisse entschieden, die Anodensysteme A1 und C zur Anwendung zu bringen. Es wurden jeweils vier Anoden eines jeden Systems installiert.

Die elektronenleitende Verbindung zwischen Anoden und Betonstahl wurden aus der Stütze geführt und konnten im Rahmen der Installationsmaßnahmen mit einer geeigneten Messtechnik versehen werden. Hier können sowohl die Elementströme als auch die Potentiale messtechnisch erfasst, sowie Ausschaltmessungen durchgeführt werden. Zusätzlich zu den Anodensystemen wurden in den Stützen ERE20 Bezugselektroden der Firma Force eingebettet. Eine entsprechende passive Messtechnik wurde am ibac gebaut. Diese ermöglicht eine dauerhafte Wahl des Betriebszustandes (offen oder

kurzgeschlossen) sowie den temporären Anschluss der am ibac eingesetzten Laborpotentiostaten Gamry Interface 1010.

Bei der Installation der Anoden wurde wie folgt vorgegangen. Je 4 Anoden des entsprechenden Typs wurden mit Anschlusskabeln versehen. Die freilegenden Elektrodenanschlussdrähte wurden mit Schrumpfschläuchen isoliert. Anschließend wurden die Anoden an den Stützen platziert und in Plastikbeuteln mit Schwammtüchern bis zur Spritzbetonapplikation feucht gehalten. Es wurde je ein Bewehrungsanschluss (Bestandsbewehrung) im Fundamentbereich erstellt und die Referenzelektrode fixiert. Anschließend wurden alle Kabel innerhalb des neuen Korbes der Umschnürungsbewehrung verlegt und bis in eine Abhangdecke geführt. Die neue Bewehrung ist nicht mit der Stützenbewehrung verbunden. Unmittelbar vor der Applikation des Spritzbetons wurden die Beutel von den Anoden entfernt und die Anoden eingespritzt. Nach Beendigung der Baumaßnahme wurde die Messtechnik an der Abhangdecke installiert und mit dem Betrieb des Demonstrators begonnen. Die Abbildungen Abb. 83 bis Abb. 88 zeigen den Herstellprozess des Demonstrators.



Abb. 83: Herstellung des Demonstrators, Stützen nach dem Sandstrahlen (links) und nach Anbringen von Umschnürungsbewehrung und Anodensystem (siehe dazu auch Abb. 87)



Abb. 84: Herstellung des Demonstrators, Anode im Plastikbeutel mit Referenzelektrode und Bewehrungsanschluss



Abb. 85: Herstellung des Demonstrators, Stütze mit Schalung (links), Einspritzen der Anoden (rechts)



Abb. 86: Herstellung des Demonstrators, Spritzbetonauftrag (links), 2-seitig fertiggestellte Stütze (rechts)



Abb. 87: Herstellung des Demonstrators, fertige Stütze (links), Installation der Messtechnik (rechts)



Abb. 88: Herstellung des Demonstrators, fertige Messtechnik (links), Durchführung 1. Messkampagne (rechts)

3.10.3 Ergebnisse

Durch die Lage des Demonstrators auf dem Schulgelände des Gymnasiums Baesweiler, sind die Arbeiten wie auch Messkampagnen auf Ferienzeiten beschränkt. Die Installation der Anodensysteme erfolgte während der Sommerferien im August 2021. Die Anoden verblieben danach über den Winter stromlos, also ohne Kontakt zur Bewehrung. Die Installation der Messtechnik erfolgte im April 2022. Als Erstes wurden die Potentiale aller Anoden sowie der Bewehrung gegen die eingebauten Referenzelektroden gemessen. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 8.

Tabelle 8: Erstmessung am Demonstrator Gymnasium Baesweiler vor Kurzschluss im April 2022

Messtelle	Off-Potential in mV vs. MnO ₂
A1-1	-1503
A1-2	-1514
A1-3	-1594
A1-4	-1589
Bewehrung A1	-340
C-1	-666
C-2	-633
C-3	-670
C-4	-698
Bewehrung C	-360

Unmittelbar nach den Messungen wurden die Anoden mit der Bewehrung kurzgeschlossen. Die erste Messkampagne fand 10 Tage später statt. Dazu wurden zunächst die On-Potentiale, Potential im kurzgeschlossenen Zustand aller Anoden und der Bewehrung gemessen und die Elementströme mittels Laborpotentiostaten Gamry Interface 1010, der als Zero-Resistance-Amperemeter (ZRA) fungierte, bestimmt. Im Anschluss wurden Ausschaltpotentiale aller Anoden und der Bewehrung ermittelt. Die Bestimmung der Off-Potentiale erfolgte 24 h nachdem die die Verbindung zwischen Anoden und Bewehrung getrennt wurde. Die Ergebnisse der Messungen sowie auch jene der 2. Messkampagne, die knapp 3 Monate später erfolgte, sind Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Messdaten des Demonstrators am Gymnasium Baesweiler aus April (1.Messung) und Juli 2022 (2. Messung)

Messtelle	On-Potential		Ausschalt- potential mV vs. MnO ₂		Off-Potential +24h		Delta 24h in mV		Elementstrom in μ A		Elementstromdichte in μ A/cm ²	
	1.Messung	2.Messung	1.Messung	2.Messung	1.Messung	2.Messung	1.Messung	2.Messung	1.Messung	2.Messung	1.Messung	2.Messung
A1-1	-534,3	-483,4	-518,4	-540,0	-1561,0	-1337,0	1042,6	797,0	297,0	324,0	8,43	9,20
A1-2	-534,9	-484,2	-528,4	-566,5	-1554,0	-1374,0	1025,6	807,5	322,0	290,5	9,14	8,24
A1-3	-535,5	-483,9	-529,5	-574,2	-1608,0	-1405,0	1078,5	830,8	322,0	227,2	9,14	6,45
A1-4	-535,8	-483,6	-528,4	-549,3	-1602,0	-1590,0	1073,6	1040,7	276,0	286,5	7,83	8,13
A1-Gesamt	-532,8	-483,1	-481,5	-544,7					1270,0	1137,0	8,64	8,01
Bewehrung A1	-532,8	-483,1	-481,5	-444,4	-347,0	-338,6	-134,5	-105,8	-1270,0	-1137,0		
C-1	-398,6	-393,8	-392,6	-478,6	-694,0	-647,1	301,4	168,5	127,0	150,0	0,47	0,55
C-2	-398,8	-394,0	-396,5	-465,4	-668,0	-638,8	271,5	173,4	123,0	133,5	0,45	0,49
C-3	-398,6	-393,8	-397,2	-472,3	-698,0	-653,1	300,8	180,8	91,0	124,1	0,33	0,45
C-4	-398,6	-393,8	-396,6	-462,9	-703,0	-654,3	306,4	191,4	102,0	100,3	0,37	0,37
C-Gesamt	-398,6	-393,8	-385,9	-467,8					455,0	505,0	0,41	0,47
Bewehrung C	-398,6	-393,8	-385,9	-381,0	-361,0	-354,5	-24,9	-26,5	-455,0	-505,0		

Zwischen den Messkampagnen verbleiben die Systeme im kurzgeschlossenen Zustand. Die Untersuchungen werden über das Projektende hinaus fortgeführt und sollen regelmäßig der Fachöffentlichkeit im Rahmen von Vorträgen oder Veröffentlichungen vorgestellt werden.

Hinsichtlich der bisher erhaltenen Ergebnisse lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen: Die Ergebnisse der verwendeten Systeme entsprechen den Erwartungen gemäß den Laborversuchen. Sowohl System C als auch System A1 weisen deutliche Elementströme auf. Aufgrund der geringeren Treibspannung bei System C sind die Elementströme erwartungsgemäß niedriger. System A1 erfüllt die Anforderungen des 100mV-Kriteriums. Eine signifikante Veränderung der Messwerte zwischen der Erstmessung aus April 2022 konnte nicht beobachtet werden. Die Elementströme sind tendenziell vergleichbar mit denen der Großversuchsplatten der BAM, wobei die Treibspannungen zwischen Anode und Kathode deutlich geringer sind, da die freien Korrosionspotentiale der Bestandsbewehrung des Demonstrators niedriger sind. Die erreichten Anodenstromdichten des Systems A1 liegen deutlich über denen der galvanostatischen Halteversuche aus AP2a. Sie bewegen sich fast im Bereich der in AP1b ermittelten Grenzstromdichten. Insofern sind durch eine weitere Messkampagnen auch zukünftig noch Erkenntnisse hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Systeme zu erwarten.

3.11 Arbeitspaket 6 (ibac)

3.11.1 Aufgabe und Ziel des Arbeitspaketes

Schwerpunkt im sechsten Arbeitspaket sollte die Frage sein, wie sich ein möglicher Fremdstrombetrieb auf die Anodensysteme auswirkt. Der Antrag sah vor, unter Beteiligung des PA ein zielführendes Arbeitsprogramm für diese Fragestellung erarbeitet wird. Die Diskussionen zum Thema ergaben, dass ein Fremdromeinsatz der hier untersuchten Anodensysteme als nicht zielführend angesehen wurde. Dies liegt zum einen an der dafür notwendigen komplexen Kabelführung, welche den Kostenvorteil der Systeme gegenüber einer Fremdstrominstallation mit Kernanoden überkompensieren würde. Zum anderen erfolgt die Installation der betrachteten Systeme durch ein Verdrillen der Anschlussdrähte an der Bewehrung. Dies würde aber für ein Fremdstromsystem einen Kurzschluss darstellen, sodass ebenfalls alternative Befestigungsmittel sowie elektrische Anschlüsse zur Vermeidung von lokalen Korrosionselementen an den galvanischen Anoden selbst hätten entwickelt werden müssen.

Diskutiert wurde ebenfalls, ob der zum Zeitpunkt des Projektbeginns einzige am Markt verfügbare hybride Anodentypen in den Versuchsplan aufgenommen werden sollte. Eine Kontaktaufnahme mit dem Hersteller zeigte jedoch, dass während der batteriegestützten Fremdstrombeaufschlagung die Polarisation nicht über die Zinkoberfläche, welche in der galvanischen Phase als Anode dient, erfolgt, sondern über separate Elektrodenoberflächen. Insofern wäre die mit diesem System verbundene Fragestellung eher, inwiefern eine kurzzeitige kathodische Polarisation der Bewehrung mittels Fremdstrom durch Vorwegnahme sekundärer Schutzeffekte den Schutzstromanspruch senkt und so möglicherweise die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit des galvanischen Betriebes erhöht. Hinsichtlich dieser Fragestellung waren jedoch im Rahmen des aktuellen Forschungsansatzes keine Erkenntnisse zu erwarten. Letztlich wurden beide Ansätze nach intensiver Diskussion verworfen.

3.12 Arbeitspaket 7 (BAM, ibac)

3.12.1 Aufgaben und Ziele des Arbeitspaketes

Im letzten Arbeitspaket werden die Ergebnisse von der BAM und dem ibac zu einem Modell zusammengeführt, das auf Grundlage der zu erwartenden Treibspannungen, Stromdichten und des Materialverbrauchs der Anodensysteme die erreichbaren Systemlaufzeiten und Einsatzmöglichkeiten unter Berücksichtigung aller relevanten Parameter berechnet. Dieser Modellansatz wird durch den Vergleich mit den Testflächen und Langzeitversuchen, sowie ggf. in der Literatur dokumentierten Installationen validiert. Anschließend kann dadurch auf sinnvolle Anwendungsgrenzen unter gegebenen Randbedingungen geschlossen und eine Anwendungsempfehlung auf der Basis eines Bemessungsmodells ausgesprochen werden. Außerdem erfolgt in diesem Arbeitspaket der Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft.

3.12.2 Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich eines Modellbildungsansatzes

Die Modellbildung für die in diesem Vorhaben untersuchten Anodensysteme ist nach neusten Erkenntnissen nicht zielführend. Die bei der Erstellung des Forschungsantrages angedachte Nutzung der diskreten galvanischen Anoden als Mittel zur Sicherstellung eines normgerechten kathodischen Korrosionsschutzes lässt sich mittel- bis langfristig nicht realisieren. Hinzu kommt, dass diese Systeme nach der kürzlich erfolgten Novellierung der DIN EN ISO 12696 im August 2022 /N2/ für den Einsatz als Schutzsystem nach KKS-B nicht mehr zulässig sind, wenn die Einhaltung der Schutzkriterien nicht durch eine geeignete Verdrahtung und Messtechnik sichergestellt werden kann. Diese Änderung reduziert eine wirtschaftlich -technische Anwendung ohnehin auf den normativ neu eingeführten Anwendungsbereich des so genannten „Anodeneinleitungseffekts“, dem auch der hier beschriebene Anodenringeffekt zuzuordnen ist.

Alle untersuchten Anodensysteme sind diffusionskontrolliert. In den nachfolgenden Abbildungen Abb. 89 bis Abb. 92 sind die LPR-Kurven dargestellt, diese gelten für die Systeme bei einer rF von 65 % und wurden bei einem Probenalter von 54 Wochen erstellt. Die Systeme B1, B2, B3, C und D unterliegen einer anodischen Hemmung. Diese ist auf die Bildung von Korrosionsprodukten im Phasengrenzbereich Einbettmörtel-Arbeits Elektrode (Zn) zurückzuführen. Die Anodensysteme A1 und A2 haben keine signifikante anodische Hemmung während der galvanostatischen Halteversuche gezeigt. Das Anodensystem A2, wie auch in Abb. 43 rechts zu erkennen ist, weist mit zunehmender Polarisationsdauer ein positiveres Anodenpotential auf, was auf eine Deckschichtbildung aber auch Änderung der thermodynamischen Randparameter wie eine Änderung des pH-Wertes in der Phasengrenze zurückzuführen sein kann.

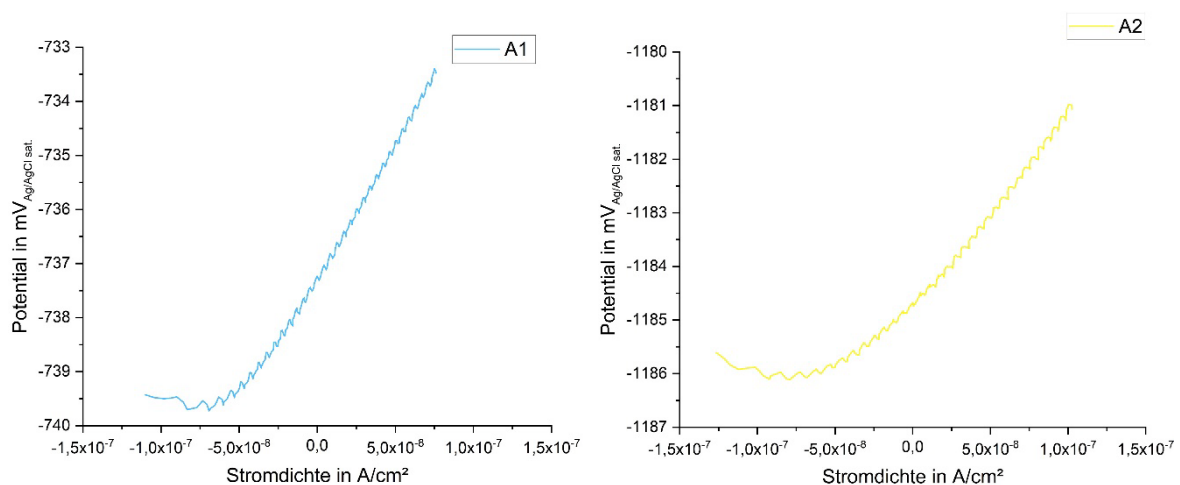


Abb. 89: Lineare potentiodynamische Polarisation zur Bestimmung des Polarisationswiderstandes, links Anodensystem A1 und rechts A2

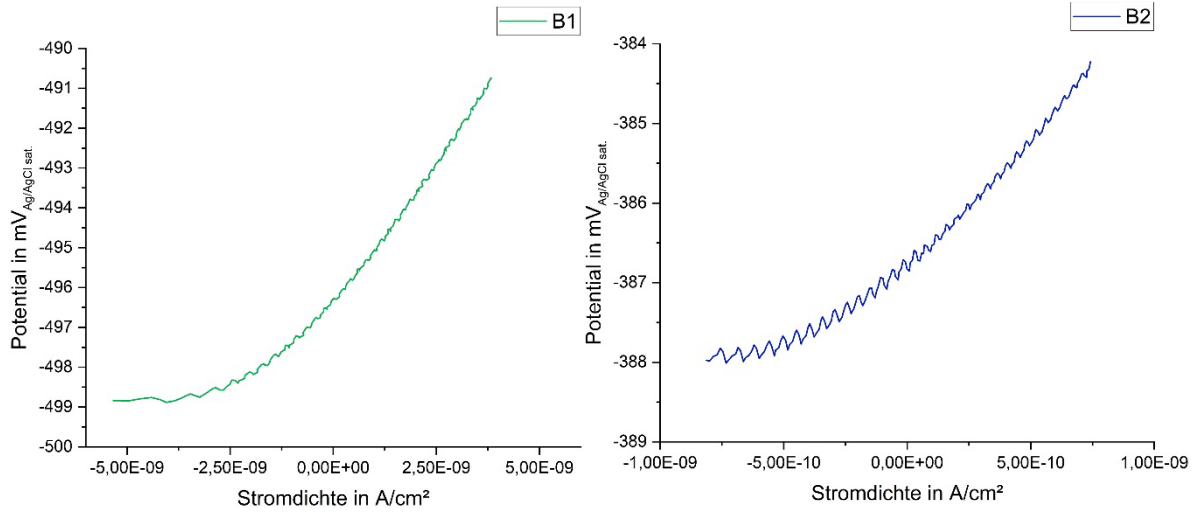


Abb. 90: Lineare potentiodynamische Polarisation zur Bestimmung des Polarisationswiderstandes, links Anodensystem B1 und rechts B2

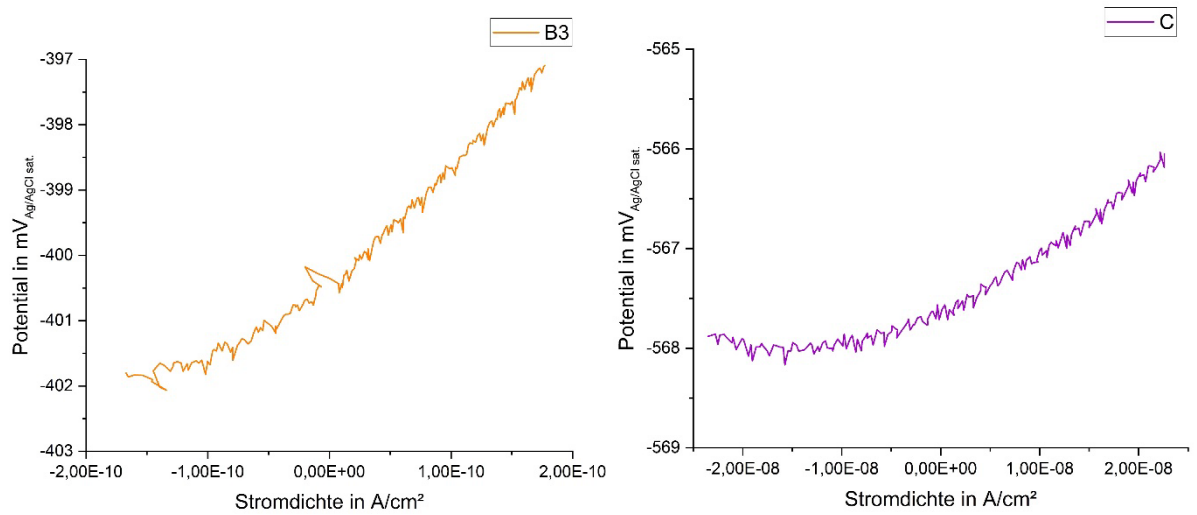


Abb. 91: Lineare potentiodynamische Polarisation zur Bestimmung des Polarisationswiderstandes, links Anodensystem B3 und rechts C

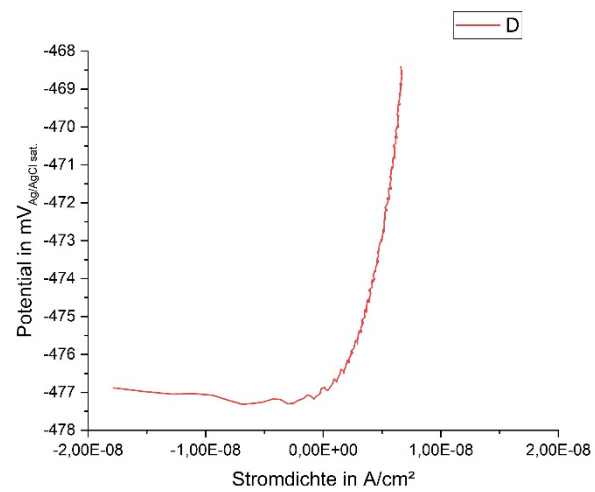


Abb. 92: Lineare potentiodynamische Polarisation zur Bestimmung des Polarisationswiderstandes, Anodensystem D

Als Vergleich für das Anodensystem A2 sind die LPR-Messkurven nach 54 und nach 112 Wochen in Abb. 93 dargestellt. Anhand des deutlich steileren Potentialanstiegs unter anodischer Polarisation des Prüfkörpers A2-2 nach 112 Wochen, ist deutlich zu erkennen, dass sich eine signifikante anodische Hemmung über die Zeit eingestellt hat. Dies erklärt auch die Änderung des Potentials unter galvanostatischer Polarisation. Anders als bei der Betrachtung der Lebensdauer auf Basis der Simulation für rF 65 % ist eine Limitierung der Lebensdauer durch eine signifikante anodische Hemmung binnen weniger Jahre wahrscheinlich.

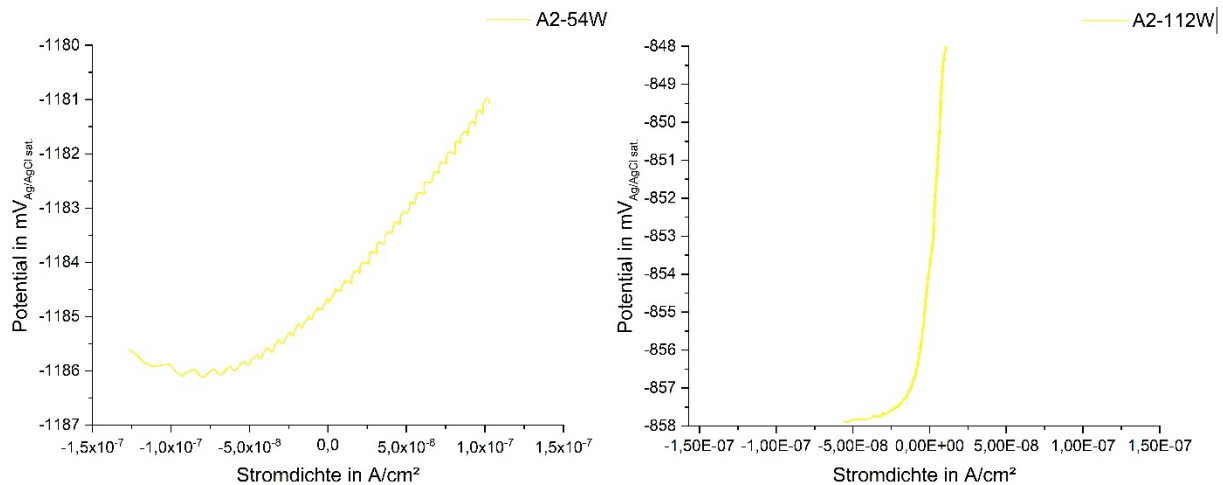


Abb. 93: Vergleich der LPR-Messkurve zwischen einem Probenalter von 54 Wochen und nach 112 Wochen für das Anodensystem A2

Vergleichend dazu ist das Anodensystem C nach 54 und 112 Wochen in Abb. 94 dargestellt. Auch hier ist eine signifikante Änderung des Polarisationswiderstandes auf eine anodische Hemmung zurückzuführen. Im Gegensatz zum Anodensystem A2 liegt bei dem System C nach 112 Wochen auch eine kathodische Hemmung vor.

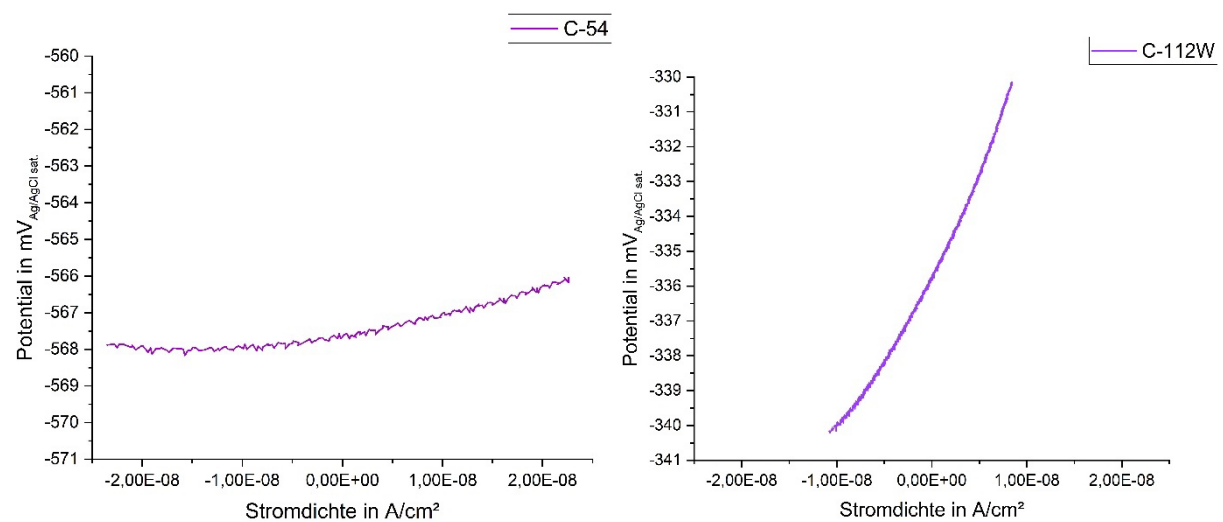


Abb. 94: Vergleich der LPR-Messkurve zwischen einem Probenalter von 54 Wochen und nach 112 Wochen für das Anodensystem C

Die Ergebnisse aus den galvanostatischen Halteversuchen für die untersuchten 7 Anodentypen zeigen deutlich, dass eine allgemeingültige Aussage hinsichtlich des Leistungsvermögens der Anodensysteme nicht getätigt werden kann. Bei Betrachtung der Entwicklung der Polarisationswiderstände über die

Zeit und unter Zugrundelegung eines galvanischen Elementes mit einer effektiven anodischen Stromdichte von $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ wird deutlich, dass alle Systeme eine begrenzte Nutzungsdauer infolge Deckschichtbildung und daraus resultierender anodischer Hemmung haben. Die in Abb. 95 dargestellten Regressionen sollen lediglich einen Eindruck verschaffen, in welche Richtung sich die Systeme entwickeln. Bei der Ableitung der Eigenkorrosion aus einer Betrachtung des Polarisationswiderstandes ist zwingend zu berücksichtigen, dass die Anodensysteme systemspezifische B-Werte aufweisen und nicht etwa gleichartige Eigenkorrosion bei ähnlichem Polarisationswiderstand.

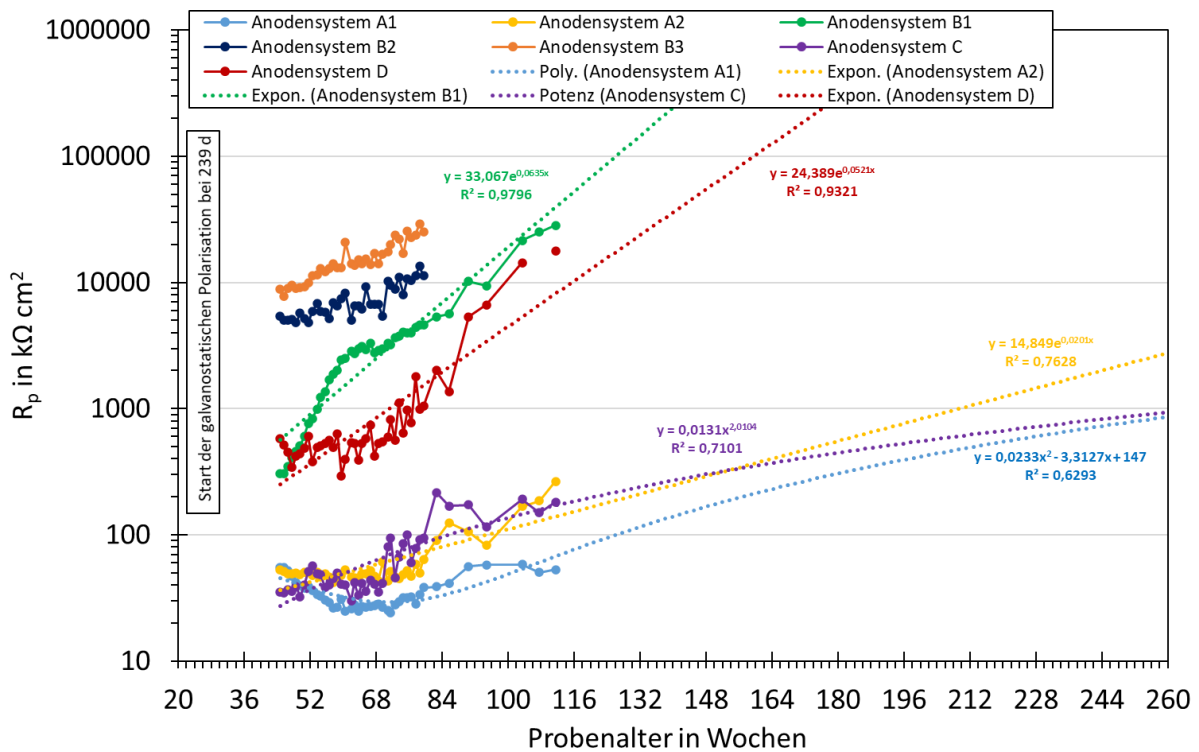


Abb. 95: Prognose zur Entwicklung des Polarisationswiderstandes der Anodensysteme, die am galvanostatischen Halteversuch beteiligt waren, über den Prüfzeitraum hinaus

Bei galvanischen Elementen, deren Elementstrom auf der jeweiligen Treibspannung, dem Polarisationswiderstand und dem Elektrolytwiderstand basieren, ist eine größtmögliche Anodenfläche anzustreben. In Abb. 96 ist die Darstellung der Eigenkorrosionsstromdichten basierend auf den Polarisationswiderständen und den spezifische B-Werten dargestellt. Die dort hinterlegten exponentiellen Regressionen dienen der Abschätzung einer möglichen Entwicklung der Eigenkorrosionsstromdichte der Anodensysteme über den Prüfzeitraum hinaus. Das Bestimmtheitsmaß R^2 der jeweiligen Regression ist nicht belastbar. Der mögliche anodische Elementstrom ohne signifikante Polarisation der Anode basiert auf der Eigenkorrosionsstromdichte multipliziert mit der Anodenoberfläche. Eine mögliche Reduktion der effektiven Fläche infolge Korrosion ist dabei nicht berücksichtigt worden. Aufgrund der geringen Korrosionsraten ist die Entkopplung des Systems infolge Deckschichtbildung jedoch weitaus wahrscheinlicher als eine signifikante Reduktion der Anodenoberfläche. Für die Anodensystem A1 und A2 liegt die Eigenkorrosionsstromdichte in den ersten 52 Wochen unter galvanostatischer Polarisation oberhalb bzw. gleich der Polarisationsstromdichte, sinkt dann jedoch infolge der anodischen Hemmung ab. Die Systeme entkoppeln sich zunehmend und sind nur für einen begrenzten Zeitraum effektiv.

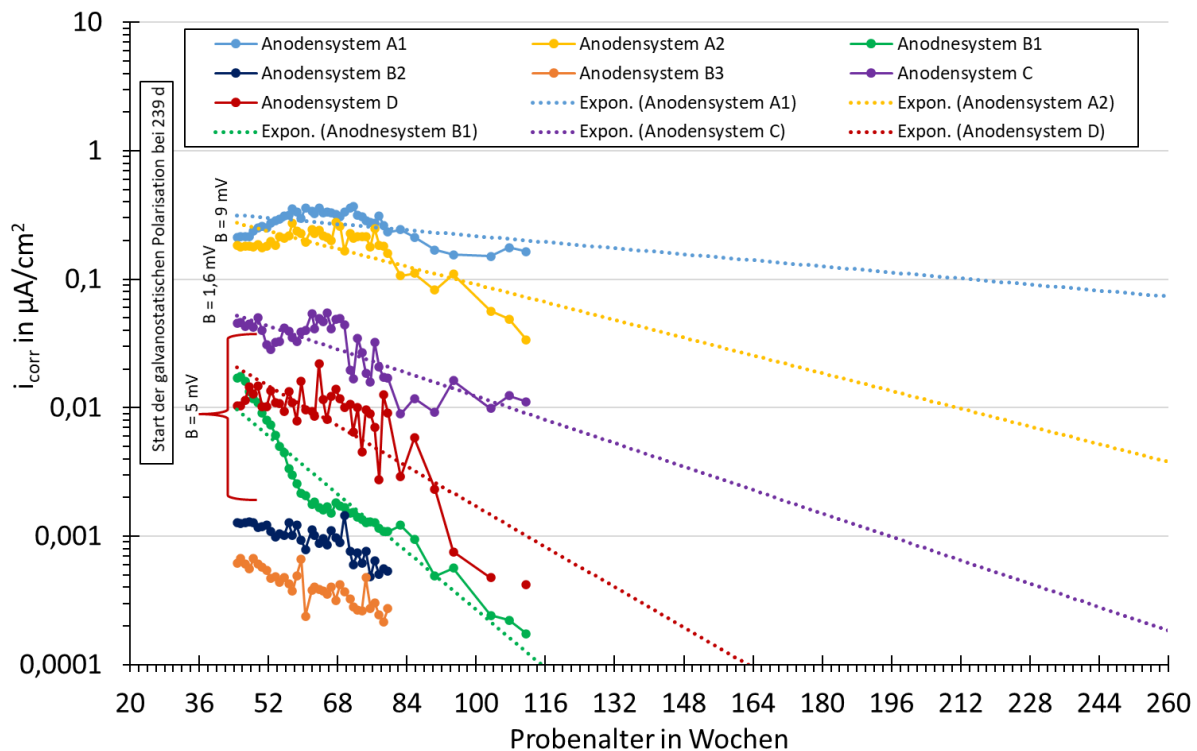


Abb. 96: Prognose zur Entwicklung der Korrosionsstromdichte der Anodensysteme, die am galvanostatischen Halteversuch beteiligt waren, auf Basis einer exponentiellen Regression über den Prüfzeitraum hinaus

Sämtliche im Rahmen dieses Forschungsvorhabens geprüften Anodensysteme wurden über die offiziellen Vertriebswege der Hersteller bezogen und gemäß Herstellerangaben gelagert und verarbeitet. Die Frage, ob die festgestellte grundsätzliche Nichteignung einzelner Systeme system- oder chargenspezifisch ist, kann somit nicht beantwortet werden. Insbesondere, da die zumeist als ursächlich festgestellte anodische Hemmung durch Korrosionsprodukte theoretisch auch durch andauernde Eigenkorrosion, während einer zu langen oder unsachgemäßen Lagerung entlang des Vertriebsweges erfolgt sein kann. Hieraus leitet sich aber in jedem Fall die Notwendigkeit einer chargenspezifischen Funktionsprüfung ab.

Es ist daher anzustreben, dass vor der Verwendung der Anodensysteme Eignungstests durchgeführt werden und die Leistungsfähigkeit bezogen auf eine mittelfristig generierbare anodische Stromdichte bestimmt wird. Für die Anodensystem A1 und A2 konnte dies mit $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ anodischer Stromdichte erfolgen. Die übrigen Systeme zeigten für sehr geringe Luftfeuchten und daraus resultierende geringe Bauteilfeuchten, dass B1 und D mit zunehmender Dauer Deckschichten bilden, die die Korrosionsaktivität signifikant behindern. Die Elementstrommessungen am Demonstrator und die numerischen Simulationen zeigen jedoch, dass die Systeme A und C deutlich höhere Elementstromdichten generieren können, dies aber signifikant von der Bauteilfeuchte abhängig ist. Die Reichweite, bis zu der eine Makroelementbildung an lokal instandgesetzten Bereichen infolge des galvanischen Elementes unterbunden werden kann, variiert und ist abhängig von Elektrolytwiderstand, Größe und Polarisationswiderständen der beteiligten Elektroden sowie der Treibspannung.

An den großformatigen Platten der BAM konnten Potentialrichter mit einem Durchmesser bis zu 1,5 m gemessen werden. Signifikante Potentialverschiebungen von -100 mV konnte jedoch für das System A1 nur mit einem Durchmesser von 1 m und für das System C mit einem Durchmesser von 50 cm um die Anode herum bestimmt werden. Dies wird nachweislich durch den geringeren Elementstrom und dem höheren Elektrolytwiderstand der Platte 2 hervorgerufen. Das Entkoppeln des Systems hin zu einem

gänzlichen Verlust der Treibspannung und des daraus resultierenden Elementstromes nach 98 Tagen attestiert dem System C keine relevante Praxistauglichkeit. Der Vergleich mit Demonstrator zeigt jedoch, dass das System C auch längerfristig Elementströme generieren kann.

Die computertomographischen Untersuchungen zeigen deutlich, dass eine reproduzierbare Phasengrenze zwischen Einbettmörtel und Anodenmaterial nicht gewährleistet werden konnte, inwieweit das auch im industriellen Maßstab vorkommt, kann nicht verifiziert werden.

Ein Einsatz der Anodensystem für einen mittelfristigen kathodischen Korrosionsschutz ist nicht zu gewährleisten. Der Einsatz der Anodensysteme A1 und A2 bzw. C bei höheren Bauteilfeuchten kann jedoch zur Vermeidung des Anodenringeffektes durchgeführt werden. Die Auslegung hinsichtlich der Anodenanzahl ist nicht allgemein quantifizierbar, aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ist eine möglichst große effektive Anodenfläche anzustreben.

4 Literaturverzeichnis

/B1/ Benett, J.; Mizer, D.: Galvanic Anodes for use in reinforced concrete-recent test results. NACE International Corrosion 2012 Conference & EXPO

/B2/ Bruns, M.; Raupach, M.: Einsatz einer KKS-Barriere am Eider Sperrwerk: A Cathodic Protection Barrier for the Eider Sperrwerk. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2011. - In: 2. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Esslingen, 25. und 26. Januar 2011, (Raupach, M. (Ed.)), S. 497-501 ISBN 3-924813-87-6

/B3/ M. Brem, Ph.D. Thesis, Numerische Modellierung der Korrosion in Stahlbetonbauten. Anwendung der Boundary Element Methode, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Switzerland, 2004.

/C1/ Christodoulou, C.; Goodier, C.I.; Austin, S.A.; Glass, G.K.; Webb, J.: A New Arrangement of Galvanic Anodes for the Repair of Reinforced Concrete Structures. In: Construction and Building Materials 50 (2014), Nr. 1, S. 300-307

/D1/ DAfStb-Richtlinie-Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie) - Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze; Teil 2: Bauprodukte und Anwendung; Teil 3: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Ausführung; Teil 4: Prüfverfahren, Ausgabe Oktober 2001

/D2/ DAfStb Empfehlung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) zu den erforderlichen Nachweisen der Bauprodukte für den kathodischen Korrosionsschutz (KKS) im Betonbau

/G1/ Glass, G.; Christodoulou, C.; Holmes, S.: Protection of steel in concrete using galvanic and hybrid electrochemical treatments. CRP Press Taylor & Francis Group, 2012. - In: Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR), Cape Town, South Africa, September 3-5, 2012

/H1/ Holmes, S.P.; Wilcox, G.D; Robins, P.J; Glass, G.K. Roberts, A.C.: Responsive Behaviour of Galvanic Anodes in Concrete and the Basis for its Utilisation. In: Corrosion Science 53 (2011), Nr. 10, S. 3450-3554

/H2/ C.Helm, Modelling of Cathodic Protection of Steel in Concrete Considering Time and Location-dependent Influencing Factors. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Dissertation, 2019.

/H3/ Helm, C, Raupach, M. Numerical evaluation of the capacity of galvanic anode systems for patch repair of reinforced concrete structures. Materials and Corrosion. 2020; 71: 726– 737. <https://doi.org/10.1002/maco.202011578>

/N1/ Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Band 1: Grundlagen, Betonbau. Band 2: Metallbau, Korrosionsprüfung. Wiesbaden; Berlin: Bauverlag, 1995

/N2/ Norm. DIN EN ISO 12696:2022-08: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton (ISO 12696:2022); Deutsche Fassung EN ISO 12696:2022

/N3/ Technische Regel Instandhaltung von Betonbauwerken (TR Instandhaltung): Teil 1 – Anwendungsbereich und Planung der Instandhaltung, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Ausgabe Mai 2020

/R1/ Raupach, M.; Orlowsky, J.: Schutz und Instandsetzung von Betontragwerken. Grundlagen, Planung und Instandsetzungsprinzipien nach neuer Norm: Protection and Repair of Concrete Buildings. Basis Design and Repair Principles with New Standards. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2008

/R2/ Raupach, M.: Kathodischer Korrosionsschutz mit Zink-Opferanoden. Wildegg: Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton, TFB, 2003. - Fachveranstaltung 824761/62, Betoninstandsetzung - aus Fehlern lernen, Kapitel 5, 12 Seiten

/S1/ Sergi, G.: Ten-year results of galvanic sacrificial anodes in steel reinforced concrete. Material and Corrosion 2011, 62, No.2.Wiley-VHC Verlag GmbH & Co. KgaA.

/T1/ Troconis de Rincon, O.; Hernandez-Lopez, Y.; Valle-Moreno de, A.; Torres-Acosta, A.A.; Barrios, F.; Montero, P.; Oidor-Salinas, P.; Rodriguez-Montero, J.: Environmental Influence on Point Anodes Performance in Reinforced Concrete. In: Construction and Building Materials 22 (2008), Nr. 4, S. 494-503

/W1/ J. Warkus, Einfluss der Bauteilgeometrie auf die Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in Beton bei Markoelementbildung. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Dissertation, 2012.

5 Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die zum Zeitpunkt der Antragstellung identifizierten Unsicherheiten bei der Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahlbeton (KKS) mit diskreten galvanischen Anoden zu beseitigen. Da es sich bei dem Verfahren um ein Instandsetzungsverfahren für von Chlorid induzierter Bewehrungskorrosion betroffener Stahlbetonbauwerke handelt, befindet es sich in Konkurrenz zu den etablierten Instandsetzungsverfahren. Diese reichen vom Ersatz des kontaminierten Betons über Beschichten mit dem Ziel, die Korrosion über eine Steigerung des Elektrolytwiderstandes im Bauteil zum Erliegen zu bringen, bis hin zum vollwertigen KKS mit Fremdstromanoden. Die Wahl des Verfahrens erfolgt dabei in der Regel nach Wirtschaftlichkeitsaspekten. Es wurde davon ausgegangen, dass das betrachtete Verfahren hier für bestimmte Randbedingungen wirtschaftliche Vorteile gegenüber den anderen Verfahren bietet, aber aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten hinsichtlich Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit selten zur Anwendung kommt. Eine klare Definition der Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen bot demnach die Chance, die Verbreitung des Verfahrens zu fördern, Ressourcen zu schonen und neue Anwendungsfelder für die beteiligten KMU zu generieren.

Betrachtet man vor diesem Hintergrund die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse, so muss man festhalten, dass dieses Ziel allenfalls teilweise erreicht wurden. Die im Rahmen des Vorhabens untersuchten Systeme sind demnach nicht geeignet, einen vollwertigen KKS für Stahlbetonbauwerke zu ersetzen. Dies steht im Einklang mit der zwischenzeitlich aktualisierten DIN EN ISO 12696 /N2/, die die Anwendung galvanischer Systeme nur noch vorsieht, wenn die Schutzwirkung überwacht wird, wodurch der wesentliche wirtschaftliche Vorteil der Systeme gegenüber Fremdstromsystemen jedoch entfällt.

Dennoch haben die hier erzielten Ergebnisse zu einem tieferen Verständnis der Funktionsweise und der lebensdauerbegrenzenden Prozesse der Systeme geführt. Diese können seitens der Hersteller Ansätze zur Entwicklung verbesserter Produkte geben. Ebenso konnten die durchgeführten numerischen Untersuchungen sowie die im Rahmen des Vorhabens eingerichteten Demonstratoren die grundlegende Funktionalität einzelner Systeme belegen und aufzeigen, dass die Anwendung des Korrosionsschutz der Bewehrung verbessern kann. Die Anwendung zur Unterdrückung des Anoden-Ring-Effektes, welche unter den in /N2/ beschriebenen "Anodeneinleitungseffekt" zu fassen ist, scheint für entsprechende Randbedingungen sinnvoll möglich zu sein. Abschließend konnte dies im Rahmen dieses Vorhabens nicht geklärt werden, da die offenen Fragestellungen hier eher auf Seiten der Bewehrung zu verorten sind. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Gleiches gilt für die Anwendung der Systeme in Kombination mit Trockenlegen durch Beschichten.

Abschließend ist festzuhalten, dass große Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der untersuchten Produkte beobachtet wurden. Bei der Mehrzahl der untersuchten Produkte kann nicht von einer sinnvollen Verwendbarkeit am Bauwerk ausgegangen werden. Für die geeigneten Produkte existieren Anwendungsnischen, insbesondere im Zusammenhang mit dem beschriebenen Anodeneinleitungseffekt. Von einer deutlich breiteren Anwendung galvanischer Anoden aufgrund der hier erzielten Ergebnisse ist jedoch mittelfristig nicht auszugehen.

6 Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

6.1 Forschungsstelle1: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

- Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans: wissenschaftlich-technisches Personal

Über die Projektlaufzeit wurde wissenschaftlich-technisches Personal für 31,45 PM über das Forschungsvorhaben finanziert. Alle durchgeführten Arbeiten entsprachen der Zielstellung im Forschungsantrag, erfolgten zielgerichtet und waren zur Beantwortung der Fragestellung geeignet. Das eingesetzte wissenschaftlich-technische Personal war für die Auswahl der Parameter, Koordination, Durchführung sowie Aus- und Bewertung der durchzuführenden Untersuchungen notwendig. Die geleistete Arbeit war vom Zeitumfang her angemessen.

- Einzelansatz B des Finanzierungsplans: Geräte
Es wurden keine Geräte im Rahmen des Forschungsvorhabens beschafft.
- Einzelansatz C des Finanzierungsplans: Leistungen Dritter
Es wurde keine Leistung Dritter in Anspruch genommen.

6.2 Forschungsstelle2: ibac - Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen

- Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans: wissenschaftlich-technisches Personal

Über die Projektlaufzeit wurde wissenschaftlich-technisches Personal für 18,13 PM über das Forschungsvorhaben finanziert. Alle durchgeführten Arbeiten entsprachen der Zielstellung im Forschungsantrag, erfolgten zielgerichtet und waren zur Beantwortung der Fragestellung geeignet. Das eingesetzte wissenschaftlich-technische Personal war für die Auswahl der Parameter, Koordination, Durchführung sowie Aus- und Bewertung der durchzuführenden Untersuchungen notwendig. Die geleistete Arbeit war vom Zeitumfang her angemessen.

- Einzelansatz B des Finanzierungsplans: Geräte
Es wurden keine Geräte im Rahmen des Forschungsvorhabens beschafft.
- Einzelansatz C des Finanzierungsplans: Leistungen Dritter
Es wurde keine Leistung Dritter in Anspruch genommen.

7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Erst die Kombination der praxisnahen Untersuchungen und der systematischen elektrochemischen Untersuchungen im Labormaßstab ermöglichte einen Erkenntnisgewinn für dieses Vorhaben. Die konkrete Auswahl der Parameter erfolgte unter besonderer Berücksichtigung praxisorientierter Anwendungen und in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss. Die dabei beschlossene Parametermatrix entspricht z.B. hinsichtlich der applizierten Stromdichten, nicht dem treibspannungsbasierten und widerstandsabhängigem Elementstrom, den die Anodensysteme im Bauteil liefern und führten zum Versagen einiger Systeme. Die Wahl der für die Praxisapplikation verwendeten Systeme zeigte, dass diese auch unter realen Einsatzbedingungen versagen können. Die durchgeführten Untersuchungen waren zur Beantwortung der im Vorhaben zu behandelnden Fragestellungen angemessen, konnten diese jedoch nur teilweise beantworten.

8 Ergebnistransfer

8.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen in die Wirtschaft

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Fortlaufende Diskussion der Ergebnisse im PA; ggf. Anpassung des weiteren Vorgehens	1. PA-Sitzung / Aachen Vorstellung des Vorhabens und Diskussion der geplanten Arbeiten	16.01.2019
		2. PA-Sitzung / Frankfurt Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	03.07.2019
		3. PA-Sitzung / Frankfurt Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	21.01.2020
		4. PA-Sitzung / WebEx online Durchführung der PA-Sitzung als online Konferenz- Diskussion der aktuellen Ergebnisse und Abstimmung des weiteren Vorgehens	27.08.2020
		5. PA-Sitzung / WebEx online Durchführung der PA-Sitzung als online Konferenz- Diskussion der aktuellen Ergebnisse und Abstimmung des weiteren Vorgehens	09.02.2021
		6. PA-Sitzung / WebEx online Durchführung der PA-Sitzung als online Konferenz- Diskussion der aktuellen Ergebnisse und Abstimmung des weiteren Vorgehens	17.08.2021

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
		7. PA-Sitzung / WebEx online Durchführung der PA-Sitzung als online Konferenz- Diskussion der aktuellen Ergebnisse und Abstimmung des weiteren Vorgehens	18.01.2022
		8. PA-Sitzung / WebEx online Durchführung der PA-Sitzung als online Konferenz- Diskussion der aktuellen Ergebnisse und Abstimmung des weiteren Vorgehens	19.05.2022
		Abschließende PA-Sitzung / WebEx online Durchführung der PA-Sitzung als online Konferenz- Diskussion der aktuellen Ergebnisse	19.07.2022
Veröffentlichung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/maco.202011578	2020
Fachveranstaltungen	Vorstellung der Projektergebnisse vor einem breiten Fachpublikum, Diskussion mit nationalen und internationalen Fachleuten	Vortrag auf der Eurocorr 2021	22.09.2021
		Vortrag und Tagungsbandbeitrag im Rahmen von ICCRRR	03.-05.10.2022
		Vorträge und Tagungsbandbeiträge im Rahmen der Aachener Baustofftage	18.08.2022

8.2 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit und Einschätzung der Realisierbarkeit des Ergebnistransfers

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Fortlaufende Diskussion der Ergebnisse im PA; ggf. Anpassung des weiteren Vorgehens	Abschlusspräsentation der ausge- und bewerteten Ergebnisse	2023
Fachveranstaltungen	Vorstellung der Projektergebnisse vor einem breiten Fachpublikum, Diskussion mit nationalen und internationalen Fachleuten	Vorträge und Tagungsbandbeiträge im Rahmen der Veranstaltungen der GfKORR e.V.	2023
		Vorträge und Tagungsbandbeiträge im Rahmen der Veranstaltung „Erhaltung von Bauwerken“ der TAE Esslingen	14.-15.02.2023
		Vorträge und Tagungsbandbeiträge im Rahmen der KKS-Kolloquien der TAE Esslingen	9.-10.11.2023
		62. Forschungskolloquium und 10. Jahrestagung des DAfSt in Aachen	26.-27.09.2023
		Vorträge im Rahmen der EUROCORR	27.-31.08.2023
		Präsentation der Ergebnisse im Rahmen des NA 062-01-78 des NMP “Arbeitsausschuss kathodischer Korrosionsschutz”	final 2023
Veröffentlichung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Beitrag in <i>Materials and Corrosion</i> Beitrag <i>Beton und Stahlbeton</i>	Ab 05.2023

Durch die Mitarbeit der Antragsteller in verschiedenen nationalen und internationalen Gremien wurden und werden die erzielten Ergebnisse in den Fachgruppen dieser Gremien den betreffenden Unternehmen (im wesentlichen KMUs) zur Verfügung gestellt. Außerdem wurde und wird der wissenschaftliche Output des Forschungsvorhabens der Fachwelt auf einschlägigen Tagungen und über wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften vorgestellt. Damit ist sichergestellt, dass die Fachwelt auch über die gewonnenen Erkenntnisse in entsprechender Weise informiert wird. Durch die Mitarbeit der beteiligten Institute in der Normungsarbeit ist außerdem gewährleistet, dass neue Erkenntnisse aus dem Vorhaben auch bei der Überarbeitung der entsprechenden Norm berücksichtigt werden. Des Weiteren werden die Forschungsergebnisse in die Lehre einfließen und ermöglichen zukünftigen Entscheidungsträgern dadurch eine bessere Einschätzung der Einsatzmöglichkeiten von diskreten galvanischen Anoden bei partiellen Instandsetzungsmaßnahmen von Stahlbetonbauwerken.

Förderhinweis und Danksagung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 20408 N der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Korrosionsschutz GfKORR e.V wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Wir bedanken uns bei allen Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die aktive Mitarbeit und für die finanzielle und materielle Unterstützung des Vorhabens.